

Experimental Study on Mechanical Properties of Foamed Lightweight Soil under Different Admixtures

Kai Wang¹, Zhijian Hou^{2,3}, Xiaobin Xu¹, Lei Guo⁴, Liqi Wang^{2,3}, Hongguang Jiang^{2,3*}, Zhanyong Yao^{2,3}

¹Qilu Transportation Development Group Co. Ltd., Jinan Shandong

²School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

³Research Center of Intelligent Perception and Intelligent Construction of Road and Bridge Engineering in Shandong University, Jinan Shandong

⁴Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute, Jinan Shandong

Email: *hongguang_jiang@sdu.edu.cn

Received: Apr. 17th, 2020; accepted: May 8th, 2020; published: May 15th, 2020

Abstract

In this paper, pure cement, 40%, 50% and 60% sintered red mud and 25%, 33% and 40% silty clay were used to prepare foamed lightweight soil. Unconfined compression test, splitting tensile test, resilient modulus test and softening coefficient test were carried out. The experimental results show that the compressive strength, splitting compressive strength and resilient modulus of the lightweight foamed soil decrease with the decrease of cement content, and the three have a good linear relationship. Because of the cementitious activity of red mud, the mechanical properties and softening coefficient of the red mud foamed lightweight soil under the same dosage are obviously better than that of the silty clay foamed lightweight soil. The 28 d compressive strength, splitting compressive strength and resilient modulus of sintered red mud foamed light weight soil at 40% - 60% dosage are 1.2 - 0.81 MPa, 0.24 - 0.17 MPa and 377 - 258 MPa respectively. The 28 d compressive strength and splitting compressive strength of 25% - 40% dosage silty clay foamed light weight soil are 2.43 - 1.02 MPa and 0.44 - 0.2 MPa respectively, and the softening coefficient of different types of foamed lightweight soil is greater than 0.7. Based on the existing code requirements, it is proposed that foamed light soil should be used as roadbed filler, the soil content is not higher than 33%, red mud content is not higher than 40%, foamed lightweight soil is used as Embankment Filler, soil content is not higher than 40%, and red mud content is not higher than 50%.

Keywords

Foamed Lightweight Soil, Silty Clay, Sintering Red Mud, Mechanical Property, Softening Coefficient

*通讯作者。

不同外掺材料下泡沫轻质土力学性能试验研究

王 凯¹, 侯智坚^{2,3}, 许孝滨¹, 郭 磊⁴, 王立旗^{2,3}, 蒋红光^{2,3*}, 姚占勇^{2,3}

¹齐鲁交通发展集团有限公司, 山东 济南

²山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

³山东大学道路和桥梁工程智能感知与智慧建造研究中心, 山东 济南

⁴山东省交通规划设计院, 山东 济南

Email: hongguang_jiang@sdu.edu.cn

收稿日期: 2020年4月17日; 录用日期: 2020年5月8日; 发布日期: 2020年5月15日

摘 要

本文分别采用纯水泥, 40%、50%、60%烧结法赤泥与25%、33%、40%粉质黏土制备泡沫轻质土, 开展了无侧限抗压试验、劈裂抗拉试验、回弹模量试验以及软化系数试验。试验发现, 泡沫轻质土抗压强度、劈裂抗压强度以及回弹模量均随水泥掺量减小而降低, 且三者具有良好的线性关系; 由于烧结法赤泥具有一定的胶凝活性, 相同替代量下烧结法赤泥泡沫轻质土力学性能和软化系数均明显优于粉质黏土泡沫轻质土; 40%~60%烧结法赤泥基泡沫轻质土的28 d抗压强度、劈裂抗压强度以及回弹模量分别为1.2~0.81 MPa、0.24~0.17 MPa和377~258 MPa; 25%~40%粉质黏土基泡沫轻质土28 d抗压强度、劈裂抗压强度分别为2.43~1.02 MPa和0.44~0.2 MPa; 不同类型泡沫轻质土软化系数均大于0.7。基于现有规范要求, 提出以泡沫轻质土作为路床区填料, 土替代量不高于33%, 赤泥替代量不高于40%, 以泡沫轻质土作为路堤区填料, 土替代量不高于40%, 赤泥替代量不高于50%。

关键词

泡沫轻质土, 粉质黏土, 烧结法赤泥, 力学性能, 软化系数

Copyright © 2020 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

随着现有公路的运营能力慢慢满足不了日益增长的交通量, 全国范围内陆续开展了高速公路改扩建工程, 而在其中的一个关键问题便是如何减小新老路基在上覆荷载下会产生不均匀沉降[1]。由于密度低, 泡沫轻质土可以大大减轻路基自重, 减轻新旧路基沉降不均匀的问题[2]。但是, 泡沫轻质土由于较高的水泥掺量, 导致其成本高昂, 制约了其在路基工程中的推广应用。因此, 许多学者从代替部分水泥的角度, 研究不同外掺材料对泡沫轻质土路用性能的影响。蒋宁俊等[3]采用水玻璃和电石渣碱性激发磨细高炉矿渣作为固化材料, 制备出来的轻质土比普通水泥基泡沫轻质土有更好的抗硫酸钠溶液侵蚀性。孙赛炜等[4]采用偏高岭土替代部分水泥制备泡沫轻质土, 掺加 20%偏高岭土可以使轻质土耐久性得到提高。李章珍等[5]采用城市污泥制备轻质土, 当替代量为 45%时, 轻质土密度、流值、抗压强度以及工后

沉降均满足路基各个层位规范要求。Leong 等[6]的研究表明,在以珍珠岩微球为主要原料的轻质土中掺加少量 PP 纤维可使抗拉强度提高 26.7%,并减小轻质土失水导致的干缩。杜延军等[7]研究表明,相较于传统水泥基泡沫轻质土,地聚合物基轻质土强度增长了 1 倍以上,但水稳定性较差。善琦[8]将气泡混合轻质土用于路基隔热层,其中气泡掺量是影响轻质土导热系数的关键因素,两者之间呈正比例关系。辛凌等[9]通过三轴试验,提出橡胶粒掺量的增加、水灰比以及围压的提高均会使 RST 轻质土抗剪强度降低。

目前,我国大宗工业固废得不到合理的利用,大部分都采用堆场堆放处理,对周边环境产生了较大的污染。其中工业制备氧化铝所产生的赤泥由于碱性较高、重金属离子多等原因成为最难处理的工业固废之一[10][11][12]。其中的烧结法赤泥中物相组成中含有 $\beta\text{-C}_2\text{S}$,并且从化学成分来看,赤泥的成分十分接近水泥熟料的成分,因此被广泛应用于建筑行业中。齐建召[13]提出了用于道路基层的二灰稳定赤泥材料,该材料回弹模量远高于普通半刚性基层材料,并提出以赤泥替代 20%以下的水泥,可获得性能相当的水泥混凝土。可见,采用烧结法赤泥将有助于提高水泥基材料的强度,而且相比于传统粉煤灰、电石渣和水玻璃等替代材料,烧结法赤泥更具有成本优势。本文分别采用粉质黏土与烧结法赤泥作为主要原材料制备泡沫轻质土,对比评价两种泡沫轻质土力学性能与软化系数,在满足路用性能要求前提下,提出相应的掺配比,以降低工程材料造价。

2. 试验用原材料与配合比

试验所用土取自山东省淄博市滨莱高速公路改扩建工程沿线,如图 1 与表 1 所示,通过该土级配曲线、液塑限得到该土属于低液限粉质黏土。所用烧结法赤泥取自山东铝业公司,化学成分与矿物组成如表 2 和表 3 所示,矿物组成中以原硅酸钙和水合硅酸钙为主,二者占比达 40%。试验用水泥为 42.5 普通硅酸盐水泥,化学成分如表 4 所示。试验所用发泡剂稀释倍率与发泡倍率分别为 50 倍和 30 倍。

Table 1. Physical properties of testing soil
表 1. 试验土样物理性质

土粒比重	液限 $\omega_L/\%$	塑限 $\omega_p/\%$	塑性指数 I_p
2.78	31	20	11

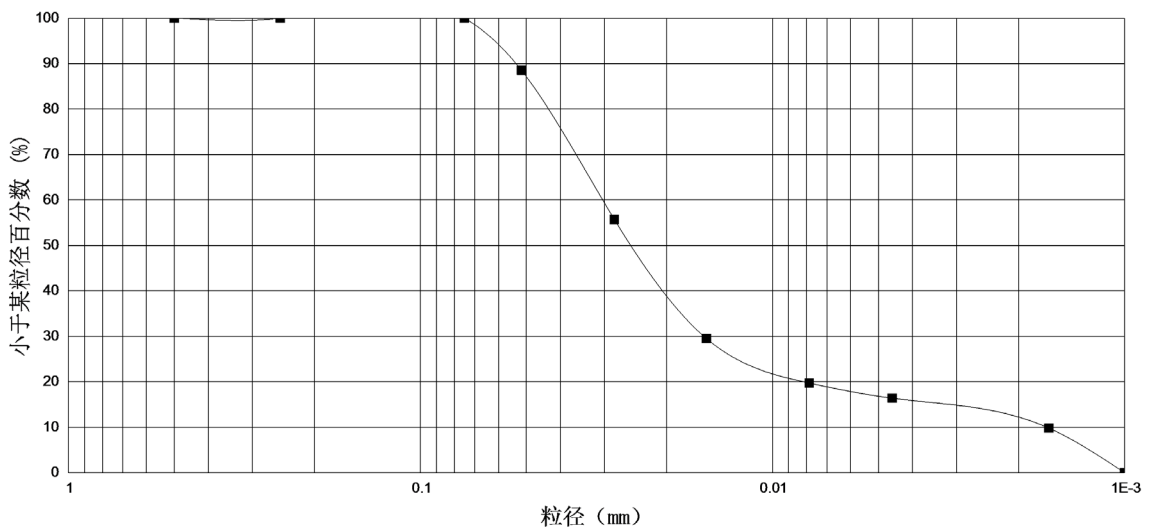


Figure 1. Grain-size distribution curve of testing soil
图 1. 试验土样颗分曲线

Table 2. Chemical compositions of sintering red mud**表 2.** 烧结法赤泥的化学组成

成分	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	其他
含量(%)	22	3.2	6.4	9.02	41.9	2.80	1.70	11.7

Table 3. Mineralogical compositions of sintering red mud**表 3.** 烧结法赤泥的物相组成

物相	含量/%
原硅酸钙	25.0
水合硅酸钙	15.0
水化石榴石	9.0
方解石	26.0
含水氧化铁	7.0
霞石	7.0
水合硅酸钠	5.0
钙钛矿	3.0

Table 4. Chemical compositions of cement**表 4.** 水泥化学成分

成分	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
含量(%)	22	4.2	5.2	63	1.5	2.2

本次试验泡沫轻质土目标密度为 800 kg/m³, 目标流值为 180 ± 20 mm, 改变固体材料中的替代材料与水泥的比例, 其中粉质黏土基泡沫轻质土(SC 轻质土)土替代量分别为 0%、25%、33%、40%; 赤泥中含有水泥主要成分之一硅酸钙, 为进一步降低材料成本, 烧结法赤泥基泡沫轻质土(RM 轻质土)按照赤泥替代量为 40%、50%、60%三组配比进行试验, 共 7 组试验配合, 如表 5 所示。

试验所用土与赤泥均经过晾干破碎, 并过 4.75 mm 方孔筛使其颗粒大小均匀便于搅拌, 并且使其与其余材料充分反应。首先将土/赤泥与水混合搅拌 3 min, 再将水泥加入泥浆搅拌 3 min, 然后降低转速加入泡沫搅拌 3 min, 密度与流值达到目标值后倒入模具中, 并使用保鲜膜包裹, 常温养护, 试件养护 2 d 后脱模, 将试件装入密封袋进行常温养护, 达到指定龄期后进行各项性能指标测试。

Table 5. Mix design of foamed light weight soil**表 5.** 泡沫轻质土配合比设计

序号	粉质黏土(kg/m ³)	赤泥(kg/m ³)	水泥(kg/m ³)	水(kg/m ³)	泡沫(L/m ³)	替代材料/ (替代材料+水泥)
1	/	/	533	266	556	0
2	140	/	399	259	561	25%
3	187	/	355	257	561	33%
4	225	/	320	256	561	40%
5	/	217	309	273	547	40%
6	/	271	271	270	543	50%
7	/	325	207	267	540	60%

3. 力学性能

3.1. 无侧限抗压强度

规范要求采用轻质材料填筑路床区抗压强度 ≥ 1 MPa, 填筑路堤区 ≥ 0.6 MPa [14]。从图 2 中可以看出, 随着水泥掺量降低, 泡沫轻质土前 7 d 抗压强度增长速率变缓, 进而导致 28 d 强度降低, 相同替代量下 (40%), RM 轻质土相对于 SC 轻质土 28 d 强度从 1.02 MPa 提高至 1.2 MPa, 说明赤泥作为泡沫轻质土原材料优于粉质黏土, 粉质黏土主要是作为填充物, 而赤泥中含有的部分 β - C_2S , 但其活性较低, 在碱性条件下赤泥中硅铝质成分会发生键位断裂, 形成活性更高的成分, 更加有利于其与 $Ca(OH)_2$ 发生水化反应, 提高了 RM 轻质土的强度。赤泥替代量或粉质黏土替代量小于 40% 时, 泡沫轻质土可以作为高速公路路床区填料; 当赤泥替代量小于 60% 时, 泡沫轻质土可以作为高速公路路堤区填料。

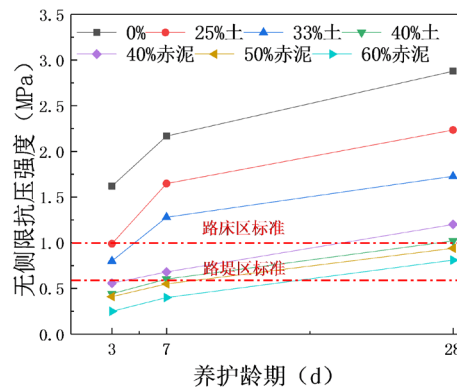


Figure 2. Unconfined compressive strength of lightweight soil with different soil/red mud replacement amount

图 2. 不同土/赤泥替代量泡沫轻质土无侧限抗压强度

3.2. 劈裂抗拉强度

劈裂抗拉强度 f_{ts} 采取以下方法进行测定[15], 将泡沫轻质土试件养护 28 d 后进行测试, 由图 3 可知, 两种泡沫轻质土 f_{ts} 随替代量变化与无侧限抗压强度结果类似, 40% 替代量下, RM 轻质土劈裂抗拉强度 0.25 MPa 比与 SC 轻质土劈裂抗拉强度 0.2 MPa 高出 25%, 说明 RM 轻质土相对于 SC 轻质土抗拉抗裂性能更优, 对分别对 RM 轻质土与 SC 轻质土拉压比进行拟合, 如图 4 所示, 均可以采用 $f_{ts} = 0.20 q_u$ 去预估 RM 轻质土与 SC 轻质土的劈裂抗拉强度, 从而评价抗拉抗裂性能。

3.3. 回弹模量

回弹模量 E 是材料受外界荷载作用下, 竖向应力与回弹应变之比, 是道路设计与施工质量检测中的重要指标之一, 本次试验采用刚性承载板法测定回弹模量, 试验方法参照《公路土工试验规程》[16], 对掺加赤泥与掺加粉质粘土的泡沫轻质土试件养护 3 d、7 d、28 d 后进行回弹模量试验, 如图 5 所示。对 28 d 回弹模量与抗压强度进行拟合, 结果如图 6 所示。RM 轻质土的回弹模量远满足路基回弹模量要求。

3.4. 软化系数

泡沫轻质土作为路基填料, 软化系数 K (饱水抗压强度/干燥抗压强度) 不宜小于 0.7 [17]。软化系数采用以下方法进行测定, 首先将养护 28 d 泡沫轻质土试件放入 105℃ 烘箱内, 直至完全干燥, 冷却至

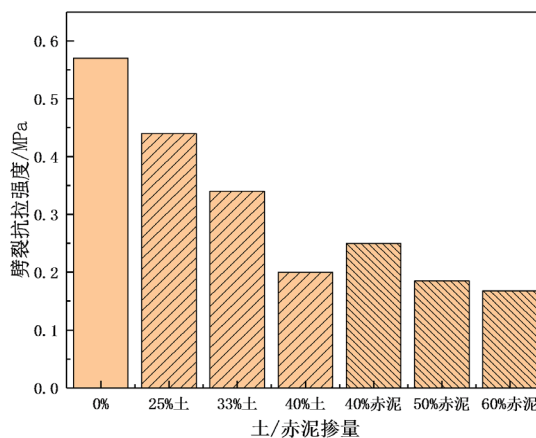


Figure 3. Splitting tensile strength of lightweight soil with different soil replacement amount

图 3. 不同土替代量泡沫轻质土劈裂抗拉强度

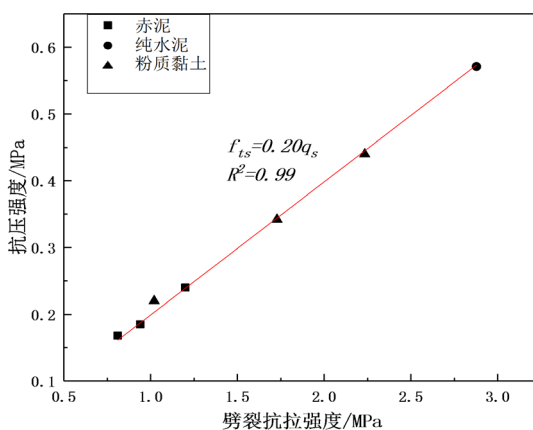


Figure 4. Relationship between splitting tensile strength and UCS of FLS

图 4. 劈裂抗压强度与无侧限抗压强度关系

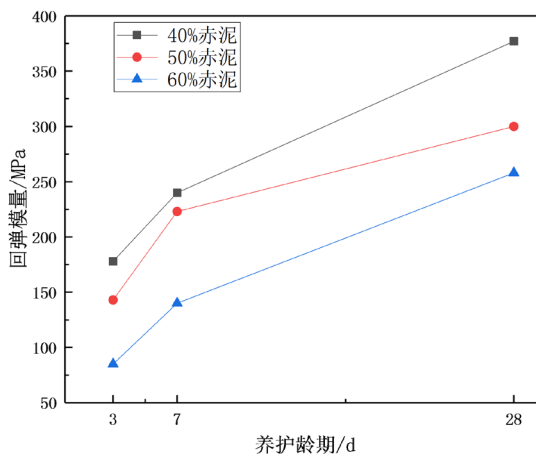


Figure 5. Resilient modulus of lightweight soil with different soil replacement amount

图 5. 不同赤泥替代量泡沫轻质土回弹模量

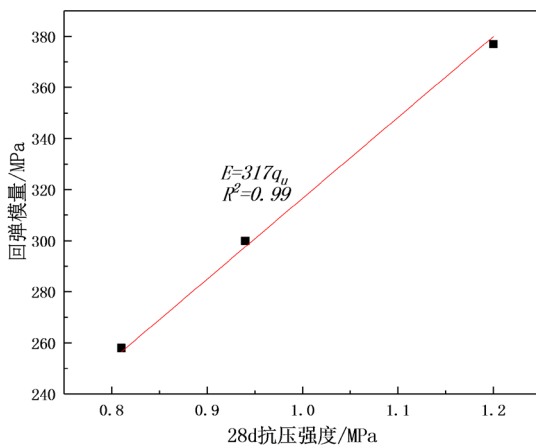


Figure 6. Relationship between resilient modulus and unconfined compressive strength of foamed light weight soil
图 6. 泡沫轻质土回弹模量与抗压强度关系

室温后，测定其抗压强度为 f_0 。再取同样配合比同样养护条件的试件，浸水 72 h 后将表面擦干，记录表干质量为 m_t ，测定其抗压强度为 f_1 。则软化系数 K 按照公式(1)进行计算。

$$K = \frac{f_1}{f_0} \tag{1}$$

两种泡沫轻质土不同状态下抗压强度如图 7 所示。当替代量为 40%时，RM 轻质土在不同状态下的强度均高于 SC 轻质土，其中干燥抗压强度 f_0 提高了 16.7%，自然抗压强度 q_u 提高了 17.6%，饱水抗压强度 f_1 提高了 20.0%。泡沫轻质土软化系数如图 8 所示，所有配合比泡沫轻质土软化系数均大于 0.7，40% 替代量下，RM 轻质土与 SC 轻质土软化系数分别为 0.77 与 0.75，说明相同替代量下 RM 轻质土水稳定性依然优于后者，赤泥中硅酸钙形成的水化产物提高了 RM 轻质土的胶凝材料结构致密性与固化程度，进而提高水稳定性。即使赤泥替代量达到 60%，泡沫轻质土软化系数仍大于 0.7。综合考虑施工误差，以泡沫轻质土作为高速公路路床区填料，土掺量不高于 33%或赤泥掺量不高于 40%，作为高速公路路堤区填料，土掺量不高于 40%或赤泥掺量不得高于 50%。

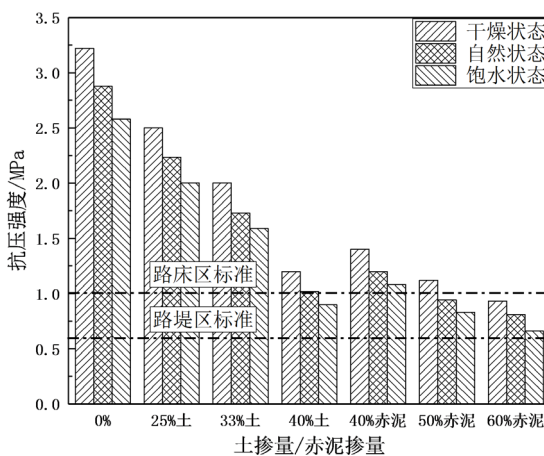


Figure 7. UCS of foamed light weight soil in dry state, natural state and saturated state
图 7. 干燥状态、自然状态、饱水状态下不同土替代量泡沫轻质土抗压强度

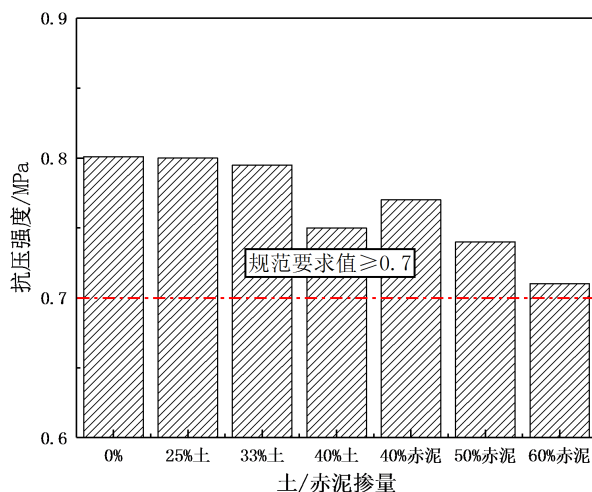


Figure 8. Softening coefficient of lightweight soil with different soil replacement amount

图 8. 不同土替代量泡沫轻质土软化系数

4. 结论

(1) 泡沫轻质土抗压强度 q_u 、劈裂抗拉强度 f_{ts} 、回弹模量 E 之间具有良好的线性关系, 即 $f_{ts} = 0.20q_u$, $E = 317q_u$, 因此可以通过试验得到其中一个指标, 进而预测其余两个指标。

(2) 40%替代量下, RM 轻质土相对于 SC 轻质土的力学性能与软化系数均有提高, 其中 28 d 抗压强度从 1.02 MPa 提高至 1.2 MPa, 劈裂抗拉强度从 0.2 MPa 提高至 0.24 MPa, 软化系数从 0.75 提高至 0.77。

(3) 综合考虑抗压强度、软化系数以及施工导致的误差, 提出高速公路路床区填料推荐配合比为 33% 替代量 SC 轻质土和 40% 替代量 RM 轻质土, 提出高速公路路堤区填料推荐配合比为 40% 替代量 SC 轻质土和 50% 替代量 RM 轻质土。

基金项目

教育部博士后科学基金(2016M590636), 山东省交通厅科技发展计划(2016B20, 2019B47_2), 山东大学青年学者未来计划资助。

参考文献

- [1] 徐伟. 浅析旧路拓宽存在的问题及处理措施[J]. 城市道桥与防洪, 2017(12): 34-36+59+8.
- [2] 陈忠平, 孙仲均, 钱争晖. 泡沫轻质土充填技术及应用[J]. 施工技术, 2011, 40(10): 74-76.
- [3] Jiang, N.J., Du, Y.J. and Liu, K. (2018) Durability of Lightweight Alkali-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) Stabilized Clayey Soils Subjected to Sulfate Attack. *Applied Clay Science*, **161**, 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.04.014>
- [4] 孙赛炜, 刘勇, 陈伟, 何倍, 关宏信, 高英力. 偏高岭土对路基填料泡沫轻质土性能的影响研究[J]. 混凝土, 2020(1): 95-99.
- [5] 李章珍, 唐浩, 梁朋涛, 赵国栋, 高凤春. 污泥含量对气泡混合轻质土性能的影响研究[J]. 路基工程, 2016(6): 103-105+133.
- [6] Leong, G.W., et al. (2020) Mechanical Properties and Drying Shrinkage of Lightweight Cementitious Composite Incorporating Perlite Microspheres and Polypropylene Fibers. *Construction and Building Materials*, **246**, Article ID: 118410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118410>
- [7] Du, Y.J., Yu, B.W., Liu, K., et al. (2016) Physical, Hydraulic, and Mechanical Properties of Clayey Soil Stabilized by Lightweight Alkali-Activated Slag Geopolymer. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **2016**, Article ID: 04016217.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001743](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001743)

- [8] 善琦. 气泡混合轻质土(FCB)路基垫层的保温隔热性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [9] 辛凌, 刘汉龙, 沈扬, 何稼. 废弃轮胎橡胶颗粒轻质混合土强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 428-433.
- [10] 南相莉, 张延安, 刘燕, 豆志河, 赵秋月, 蒋孝丽. 我国主要赤泥种类及其对环境的影响[J]. 过程工程学报, 2009, 9(S1): 459-464.
- [11] 姜怡娇, 宁平. 氧化铝厂赤泥的综合利用现状[J]. 环境科学与技术, 2003(1): 40-42+65.
- [12] 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.
- [13] 齐建召. 赤泥道路材料的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 蒸压加气混凝土性能试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [15] 中国交通运输部. 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2007.
- [16] 李文轩. 土石混填路基压实过程机械配套与压实组合研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [17] 徐礼华, 刘素梅, 李彦强. 丹江口水库区岩石软化性能试验研究[J]. 岩土力学, 2008(5): 1430-1434.