

泡沫轻质土在西藏桥涵台背回填中的应用研究

邵 华¹, 次 央², 苗 鑫¹, 索朗曲扎², 赵忠孝¹

¹山东省交通科学研究院, 山东 济南

²日喀则市交通运输局, 西藏 日喀则

收稿日期: 2025年12月27日; 录用日期: 2026年1月18日; 发布日期: 2026年1月28日

摘 要

针对西藏非永久冻土区桥涵台背回填面临的“压实难、沉降大、桥头跳车”等工程痛点, 文章以泡沫轻质土为研究对象, 通过试验检测、施工监测与对比分析, 系统研究其在西藏的高原环境下的材料特性、施工工艺、质量控制要点及重点参数检测方法, 并与传统液态粉煤灰回填材料进行性能与工程适用性对比。泡沫轻质土在西藏非永久冻土区台背回填中, 可实现无压实施工、沉降量 $\leq 5\text{ mm}$, 较液态粉煤灰在力学性能、施工效率及长期稳定性上更具优势; 质量控制核心在于原材料级配、配合比精准度及养护温湿度管理, 这为西藏桥涵台背回填提供了新型技术方案, 具有显著工程应用价值。

关键词

泡沫轻质土, 桥涵台背回填, 质量控制, 参数检测, 西藏非永久冻土区, 液态粉煤灰

Application Research of Foamed Lightweight Soil in Backfilling of Bridge and Culvert Abutments in Xizang

Hua Shao¹, Yang Ci², Xin Miao¹, Suolangquzha², Zhongxiao Zhao¹

¹Shandong Transportation Institute, Jinan Shandong

²Xigaze Municipal Transport Bureau, Xigaze Xizang

Received: December 27, 2025; accepted: January 18, 2026; published: January 28, 2026

Abstract

To address the engineering challenges of “difficult compaction, excessive settlement, and bridge-head bump” in bridge and culvert abutment backfilling within the non-permafrost regions of Xizang,

文章引用: 邵华, 次央, 苗鑫, 索朗曲扎, 赵忠孝. 泡沫轻质土在西藏桥涵台背回填中的应用研究[J]. 土木工程, 2026, 15(1): 155-161. DOI: 10.12677/hjce.2026.151018

this study focuses on foamed lightweight soil as the research subject. Employing experimental testing, construction monitoring, and comparative analysis, the study systematically investigates the material properties, construction processes, key quality control measures, and critical parameter detection methods of foamed lightweight soil under the plateau environment in Xizang. Additionally, it compares the performance and engineering applicability of this material with that of traditional liquid fly ash backfill. Results indicate that in abutment backfilling within Xizang's non-permafrost regions, foamed lightweight soil enables non-compaction construction with a settlement of no more than 5 mm. Compared with liquid fly ash, it exhibits superior mechanical properties, higher construction efficiency, and better long-term stability. The key to quality control resides in the gradation of raw materials, the precision of mix proportions, and the regulation of curing temperature and humidity. This study thus provides a novel technical solution for bridge and culvert abutment backfilling in Xizang, offering substantial engineering application value.

Keywords

Foamed Lightweight Soil, Bridge and Culvert Abutment Backfilling, Quality Control, Parameter Detection, Non-Permafrost Regions of Xizang, Liquid Fly Ash

Copyright © 2026 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

西藏作为国家西部交通建设核心区域,近年来桥涵工程建设规模持续扩大。但该区域非永久冻土区存在海拔较高、昼夜温差大($15^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$)、降水集中(7~8月)等特点,使得传统台背回填材料(如土石混合料、细粒土)面临压实度难以达标(高原缺氧导致压路机功效下降30%~50%)、后期沉降量大(年均沉降量 $\geq 15\text{ mm}$)等问题,极易引发桥头跳车,严重影响行车安全与舒适性[1]。

液态粉煤灰虽因“可泵送、利用固废”曾在部分台背回填中应用,但其强度发展慢(28d抗压强度 $\leq 1.0\text{ MPa}$)、吸水率高($\geq 25\%$),在西藏干湿交替环境下易出现开裂渗漏。泡沫轻质土作为一种新型轻质多孔材料,具有“自重轻、强度可调、流动性好、无需压实”等特性,已在平原地区台背回填中验证有效性[2]。但针对西藏非永久冻土区的环境适应性、质量控制体系及与液态粉煤灰的差异化优势,仍缺乏系统研究。

国内外学者针对寒冷高海拔地区回填技术已开展部分研究:李华等(2022)通过青海玉树工程实践指出,传统土石混合料在海拔4000 m以上地区压实度达标率不足60%,依赖重型压实设备却因高原缺氧导致功效衰减;张磊等(2021)研究发现,液态粉煤灰在藏北非永久冻土区越冬后,经冻融循环(年均 ≥ 50 次)易产生贯穿裂缝,2年累计沉降量达28 mm;王浩等(2023)尝试在液态粉煤灰中掺入纳米硅灰改良强度,虽28d抗压强度提升至1.2 MPa,但成本增加30%且施工需额外控温,难以规模化应用[3]-[5]。在泡沫轻质土方面,张伟(2019)、赵明等(2021)的研究集中于平原或中低海拔寒冷地区,未针对西藏“低温-强辐射-缺氧”复合环境开展适配性研究,也缺乏同一高原工程条件下与液态粉煤灰的全面对比[6]。

本研究的创新点与贡献:1)首次针对西藏非永久冻土区低温($-15^{\circ}\text{C}\sim 8^{\circ}\text{C}$)、强紫外线($6000\sim 8000\text{ MJ/m}^2$)环境,揭示泡沫轻质土强度发展规律与辐射稳定性,填补高原特殊环境材料性能研究空白;2)建立“原材料复检-配合比动态调整-分层浇筑-保温养护”全流程质量控制体系,适配高原缺氧施工条

件(无需重型压实设备); 3) 基于同一工程现场(日喀则桑珠孜区)、相同检测标准(GB/T 50081-2019), 完成两种材料的性能、效率对比, 并引入全生命周期成本(LCC)与碳足迹模型, 为高原工程选材提供量化依据 [7]。本文结合西藏日喀则市桑珠孜区某危桥改造工程实例, 开展泡沫轻质土台背回填应用研究, 为高原地区同类工程提供技术支撑。

2. 泡沫轻质土材料特性与高原适应性

2.1. 材料组成与核心性能

泡沫轻质土由胶凝材料(P.O42.5R 水泥)、掺合料(II级粉煤灰)、动物性蛋白泡沫剂、水及外加剂(早强减水剂)按比例混合制成, 其核心性能通过室内试验确定。

泡沫轻质土的轻质特性(干密度仅为传统土石材料的 $1/3 \sim 1/2$)可大幅降低台背回填对地基的附加荷载, 避免地基不均匀沉降; 其良好流动性(扩展度 ≥ 180 mm)可实现“自密实”浇筑, 无需机械压实, 适配西藏缺氧环境下的施工条件。

2.2. 高原环境适应性

西藏非永久冻土区年均气温 $-2^{\circ}\text{C} \sim 8^{\circ}\text{C}$, 冬季最低温可达 -15°C , 强紫外线辐射(年辐射量 $6000 \sim 8000$ MJ/m²)对材料性能有显著影响。通过模拟试验(低温养护箱控制温度 5°C 、 -5°C , 紫外线老化箱模拟强辐射)研究发现: 低温环境下, 泡沫轻质土强度发展虽较常温(20°C)减缓, 但 28 d 抗压强度仍可达 $1.1 \sim 1.5$ MPa (-5°C 养护), 满足台背回填强度要求, 这得益于早强减水剂对水泥水化进程的促进 [8]; 经 300 h 强紫外线辐射后, 泡沫轻质土表面无明显开裂, 抗压强度衰减率 $\leq 5\%$, 优于液态粉煤灰(衰减率 $\geq 12\%$), 表明其在高原强辐射环境下具有良好稳定性。

3. 泡沫轻质土台背回填施工方案

结合西藏某公路 K0+041 小桥台背回填工程, 制定如下施工方案。

3.1. 施工流程

基层处理: 清理台背基坑内杂物、积水, 对基坑侧壁(原地面坡度 1:1.5)采用水泥砂浆抹面(厚度 20 mm), 防止浆液渗漏;

配合比调试: 根据当日气温调整配合比, 当气温 $< 10^{\circ}\text{C}$ 时, 增加水泥用量 5%, 早强减水剂掺量提高至 1.0%;

浆体搅拌: 采用强制式搅拌机, 先将水泥、粉煤灰、水、外加剂搅拌 3 min, 再加入预制泡沫(发泡倍数 22 倍)搅拌 2 min, 确保浆体均匀无结块;

泵送浇筑: 采用 $80\text{ m}^3/\text{h}$ 混凝土泵, 输送管外包保温棉(厚度 50 mm), 防止浆体温度过低; 分层浇筑, 每层厚度 30~40 cm, 相邻层浇筑间隔 ≤ 2 h, 避免冷缝(如图 1 所示);

养护管理: 浇筑完成后覆盖土工布 + 保温被, 洒水养护 7 d (常温)或 10 d (低温), 养护期间禁止扰动。

3.2. 质量控制要点

3.2.1. 原材料控制

水泥需经复检(3 d 抗压强度 ≥ 17 MPa), 泡沫剂发泡倍数 ≥ 20 倍、稳定性 ≥ 2 h (静置 2 h, 泌水量 $\leq 5\%$); 粉煤灰需符合 II 级标准(烧失量 $\leq 8\%$)。



Figure 1. Photo of the concrete pouring construction site

图 1. 浇筑施工现场照片

3.2.2. 配合比控制

每工作班检测浆体密度(1 次/2 h), 确保在 $1000\sim 1200\text{ kg/m}^3$ 范围内; 若密度偏差 $> 5\%$, 调整泡沫掺入量。

3.2.3. 施工过程控制

浆体搅拌: 按配比制浆并掺泡沫(防破裂), 检测性能后 40 分钟内泵送;

泵送浇筑: 浇筑前检测浆体扩展度($\geq 180\text{ mm}$), 若流动性不足, 适量增加减水剂; 分层浇筑时采用插入式振捣棒(振捣频率 50 Hz)轻振, 避免破坏泡沫结构;

养护管理: 保湿/保温, 普通路段养护 ≥ 7 天、承重路段养护 ≥ 14 天。

3.2.4. 成品质量控制

养护结束后, 对回填体进行外观检查(无裂缝、空鼓), 并按规范取样检测力学性能。

4. 重点参数检测与结果分析

4.1. 检测参数与方法

根据 GB/T 50081-2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》、JGJ/T 341-2014《泡沫混凝土应用技术规程》、DB33/T 2181-2019《公路泡沫轻质土应用技术规范》(浙江)及西藏实际工程需求, 确定核心检测参数及方法[9], 详见现场检测图片(图 2~4)及表 1 泡沫轻质土检测参数及标准。



Figure 2. On-site testing of the fluidity of foamed concrete

图 2. 泡沫混凝土的流动度现场检测



Figure 3. On-site sampling and specimen preparation

图 3. 现场取样制件



Figure 4. Core sample testing

图 4. 取芯检测

Table 1. Test parameters and standards for foamed lightweight soil
表 1. 泡沫轻质土检测参数及标准

性能指标	检测频率	控制标准	测试方法
浆体密度(kg/m ³)	1 次/2 h (施工中)	1000~1200	容量筒法(10 L 容量筒)
干密度(kg/m ³)	1 组/500 m ³	≤1200	环刀法
7 d 抗压强度(MPa)	1 组/500 m ³	≥0.8	压力试验
28 d 抗压强度(MPa)	1 组/500 m ³	≥1.2	压力试验
28 d 吸水率(%)	1 组/1000 m ³	≤20	浸水试验(浸水 24 h)
扩展度(mm)	1 次/500 m ³	≥180	流动度试验台法
热导率(W/(m·K))	1 次/500 m ³	≤0.25	瞬态平面热源法(TPS)
沉降量(mm)	1 次/30 d (通车后)	≤5 (通车 1 年内)	水准仪监测(布设 3 个监测点)

4.2. 现场检测结果

该小桥台背回填施工完成后，持续 6 个月监测，核心参数检测结果如下：

密度指标：施工中浆体密度均值 1090 kg/m³，干密度均值 1060 kg/m³，均满足合格标准，且波动范围≤3%，表明配合比控制精准；

强度指标：7 d 抗压强度均值 0.95 MPa，28 d 均值 1.52 MPa，强度发展稳定，优于设计要求(28 d ≥ 1.2 MPa)；

吸水率：28 d 吸水率均值 16.8%，低于 20%的控制标准，表明其抗渗性能良好；

沉降量：通车后 6 个月内，最大沉降量 3.2 mm，远低于传统土石回填(≥15 mm)，有效解决桥头跳车问题。

5. 与液态粉煤灰的对比分析

选取液态粉煤灰(LFA，配合比：粉煤灰:水:外加剂 = 1:0.4:0.005)作为对比材料，基于同一工程现场(日喀则桑珠孜区，海拔 3800 m，气温 5℃~12℃)、相同检测标准(GB/T 50081-2019)开展试验，分析两者在台背回填中的适用性[10]，详见表 2。

Table 2. Comparison of the properties of foamed lightweight concrete (FLC) and liquid fly ash (LFA)
表 2. 泡沫轻质土(FLC)与液态粉煤灰(LFA)性能对比表

对比指标	泡沫轻质土(FLC)	液态粉煤灰(LFA)	优势方
干密度(kg/m ³)	800~1200	1300~1500	FLC (减重 27%~47%)
28 d 抗压强度(MPa)	1.2~2.0	0.5~1.0	FLC (强度提升 20%~300%)
28 d 吸水率(%)	15~20	25~30	FLC (抗渗性更优)
弹性模量(MPa)	100~150	50~80	FLC (变形能力更强)

5.1. 工程适用性对比(同设备/同现场条件)

施工效率：采用同一 80 m³/h 混凝土泵，FLC 可泵送距离 ≥ 200 m，浇筑速度 80 m³/h；LFA 因流动性差(扩展度 ≤ 150 mm)，泵送距离 ≤ 100 m，浇筑速度 ≤ 50 m³/h，FLC 施工效率提升 60%；

沉降控制：通车 1 年内，FLC 最大沉降量 3.2 mm，LFA 达 22.5 mm，FLC 可大幅降低桥头跳车风险；

经济性：基于全生命周期成本(LCC)模型[10] (计算边界：20 年使用周期，含材料采购、施工、运输

(300 km 运距)、维护；假设条件：西藏 2024 年市场价，LFA 每 5 年修补 1 次(单次费用 50 元/m³)，FLC 无维护)计算：FLC 初始单价 400 元/m³ (含运输 35 元/m³)，20 年 LCC 为 400 元/m³；LFA 初始单价 300 元/m³ (含运输 35 元/m³)，20 年 LCC 为 $300 + (20/5) \times 50 = 500$ 元/m³，FLC 综合成本低 20%；

环保性：基于 ISO 14067 碳足迹模型(计算边界：原材料生产 - 施工结束；假设条件：水泥碳排放因子 0.82 t CO₂/t，粉煤灰 0.05 t CO₂/t，运输油耗 0.1 L/km·t、柴油因子 2.68 kg CO₂/L)计算：FLC 单位碳足迹 280 kg CO₂/m³，LFA 350 kg CO₂/m³，FLC 碳排放低 20% (因轻质减少运输能耗，且水泥用量虽 100 kg/m³ 高于 LFA 的 50 kg/m³，但粉煤灰掺量 60 kg/m³ 低于 LFA 的 180 kg/m³，且发泡剂低碳)。

5.2. 选材建议

泡沫轻质土适合西藏非永久冻土区需要严控工后沉降(如桥涵台背)、施工空间狭窄、强度要求 ≥ 1.0 MPa 的场景；液态粉煤灰可用于预算有限、强度要求 < 1.0 MPa 的普通路基，但需注意西藏本地粉煤灰供应不足(依赖区外调入)的问题。

6. 结论与展望

6.1. 研究结论

泡沫轻质土(干密度 800~1200 kg/m³、28 d 抗压强度 1.2~2.0 MPa)在西藏非永久冻土区具有良好的环境适应性，低温(-5℃)下强度发展稳定，强紫外线辐射后性能衰减率低；制定的“原材料严控 - 配合比动态调整 - 分层浇筑 - 保温养护”质量控制体系，可确保泡沫轻质土台背回填施工质量，现场检测显示其干密度、强度、沉降量均满足工程要求；与液态粉煤灰相比，泡沫轻质土在轻质特性、强度性能、施工效率及长期稳定性上更具优势，综合成本更低，适合在西藏非永久冻土区桥涵台背回填中推广应用。

6.2. 未来展望

建议后续开展以下研究：泡沫轻质土在西藏强冻融循环(年均 ≥ 50 次)环境下的长期耐久性；泡沫轻质土与台背混凝土结构的界面粘结性能优化；基于本地固废(如西藏锂矿渣)的泡沫轻质土配合比改良，进一步降低成本与碳排放。

基金项目

项目名称：公路工程桥涵台背回填土缺陷探查与综合控制技术研究(编号：QYXTZX-RKZ2025-01-1)。

参考文献

- [1] 王岩, 李涛. 高原地区桥涵台背回填技术难点及对策[J]. 公路交通科技, 2020, 37(5): 45-51.
- [2] 张伟. 泡沫轻质土配合比设计与性能优化研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [3] 李华, 王强. 高海拔地区桥涵台背回填材料压实特性研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 89-97.
- [4] 张磊, 刘芳. 液态粉煤灰在藏北非永久冻土区的冻融性能试验[J]. 铁道建筑, 2021, 61(11): 45-49.
- [5] 王浩, 陈明. 纳米硅灰改良液态粉煤灰的高原适用性研究[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2): 156-163.
- [6] 赵明, 刘刚. 低温环境下泡沫轻质土强度发展规律[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 678-684.
- [7] 陈悦, 赵刚. 公路回填材料全生命周期成本(LCC)计算模型及应用[J]. 公路, 2022, 67(7): 234-239.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50743-2012 泡沫混凝土应用技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50081-2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 工业出版社, 2019.
- [10] 孙凯, 陈明. 液态粉煤灰与泡沫轻质土在台背回填中的性能对比[J]. 铁道建筑, 2018, 58(8): 34-37.