

泡沫轻质土在公路路基修筑中的应用

林 星

(四川路航建设工程有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要 随着公路建设向复杂地质区域延伸, 软基处理、高填方沉降控制及狭窄空间回填等难题日益突出。泡沫轻质土作为一种新型路基材料, 凭借其轻质高强、施工便捷等特点, 在公路路基工程中得到推广。本文阐述了泡沫轻质土的技术特性, 分析了其原材料组成及规格要求, 在此基础上重点探讨了泡沫轻质土路基的施工工艺, 涵盖施工准备、基础与边坡处理、面板安装、现场浇筑及养护等关键环节, 以期同类公路路基工程的施工提供参考。

关键词 泡沫轻质土; 公路路基; 软基处理

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.016

0 引言

公路路基作为公路工程的核心承重结构, 其施工质量直接决定公路的承载能力、行车安全性及长期服役寿命。在我国公路建设不断发展的背景下, 工程建设面临的地质条件愈发复杂, 对路基材料的性能提出了更高要求。而泡沫轻质土是指在胶凝材料中掺入发泡剂, 经搅拌、发泡、浇筑及养护形成的一种多孔轻质材料, 弥补了传统路基填料的不足, 成为解决复杂路基工程难题的理想材料。

1 泡沫轻质土特性及原材料

1.1 泡沫轻质混凝土特性

泡沫轻质土之所以能够在公路路基修筑中得到广泛应用, 关键在于其多种技术特性能够与复杂路基工况形成较高匹配度。与常规填土相比, 泡沫轻质土最突出的优势在于轻质性, 其密度通常控制在 $300 \text{ kg/m}^3 \sim 1\,200 \text{ kg/m}^3$, 明显低于普通路基填料约 $1\,800 \text{ kg/m}^3 \sim 2\,000 \text{ kg/m}^3$ 的水平, 这使其在填筑后能够显著减小路基对下卧地基产生的附加应力, 从而控制总沉降及差异沉降^[1]。在具备轻质优势的同时, 泡沫轻质土并非单纯追求低容重, 而是在轻质与强度之间建立合理平衡, 这正体现出其强度可控性, 施工中可调节水泥掺量、泡沫掺量及整体配合比, 使其抗压强度保持在 $0.3 \text{ MPa} \sim 5.0 \text{ MPa}$ 范围内, 以适应不同路基部位对承载性能和变形性能的差异化要求。除此之外, 泡沫轻质土在新拌状态下具有良好的流动性及自密实性, 材料经泵送后可在模板或受限空间内自行流展、找平并实现较为均匀的填充, 无需传统填土施工中的分层碾压与机械振捣, 这一特征使其尤其适用于桥台背后、挡墙后侧及

异形狭窄区域的回填作业, 有助于减少压实盲区 and 局部填筑不实问题^[2]。待材料固化后, 泡沫轻质土又具备一定的自立性及施工高效性, 可在一定条件下减小边坡放坡需求, 简化支挡及防护处理, 同时依托连续浇筑工艺提升施工效率, 降低现场机械反复作业强度。从长期服役表现看, 泡沫轻质土以无机胶凝材料体系为主, 具备较好的耐久性及环保性, 其抗冻融性、抗渗性和化学稳定性较为可靠; 在材料配制过程中, 还可合理掺入粉煤灰、矿渣粉等工业副产物, 在改善材料性能的同时资源再利用, 较好契合绿色公路的发展要求。

1.2 泡沫轻质土原材料

泡沫轻质土的基本材料主要由胶凝材料、发泡剂、水、掺和料及外加剂构成(如表1所示), 其中, 胶凝材料通常以强度等级42.5级及以上的硅酸盐水泥为主, 主要起到胶结、硬化和承载作用; 在部分工程或研究中, 也会掺入矿渣粉、粉煤灰等活性材料或工业副产物替代部分水泥, 以降低材料成本并改善综合性能。发泡剂则用于制备稳定泡沫, 使材料内部形成大量均匀封闭气孔, 从而达到轻质化效果, 常见类型包括过氧化氢溶液等化学发泡剂以及表面活性剂类物理发泡剂^[3]。水是泡沫轻质土制备过程中不可缺少的介质, 一方面用于与水泥等胶凝材料拌和形成浆体, 另一方面也参与发泡和硬化过程, 掺和料主要包括粉煤灰、矿渣粉、细砂、石灰石粉等, 其作用在于调节浆体性能, 减少水泥用量并提升后期耐久性, 外加剂则依据工程实际需求灵活选用。上述材料经科学配比、均匀搅拌及规范养护后, 最终形成具有轻质、高强和自密实等特征的泡沫轻质土。

作者简介: 林星(1980-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁工程。

表 1 泡沫轻质土原材料及规格要求

材料类别	具体材料	规格要求
胶凝材料	水泥	强度等级 ≥ 42.5 级，普通硅酸盐或复合硅酸盐水泥
	矿渣粉	S95 级以上，比表面积 $\geq 400\text{ m}^2/\text{kg}$
	粉煤灰	I 级或 II 级，细度 $\leq 25\%$
发泡剂	物理发泡剂	发泡倍数 ≥ 15 ，1 h 沉降距 $\leq 5\text{ mm}$ ，1 h 泌水率 $\leq 30\%$
	化学发泡剂	过氧化氢浓度 27.5% ~ 35%
水	拌和水	符合混凝土用水标准，无有害杂质
掺和料	细砂	粒径 $\leq 2.36\text{ mm}$ ，含泥量 $\leq 3\%$
	石灰石粉	CaCO_3 含量 $\geq 75\%$
	稳泡剂	提高泡沫稳定性，掺量经试验确定
外加剂	速凝剂	初凝 $\leq 30\text{ min}$ ，终凝 $\leq 60\text{ min}$
	防水剂	提高抗渗性，降低吸水率
	减水剂	聚羧酸系，减水率 $\geq 20\%$

2 泡沫轻质土路基施工工艺

2.1 施工准备

施工准备是泡沫轻质土路基质量控制的起点，其充分性直接决定了后续工序的顺畅程度及成型质量，若准备工作不充分，极易导致浇筑过程中出现密度波动、泵送中断或浇筑面结合不良等问题，进而影响路基整体均匀性^[4]。泡沫轻质土路基施工准备并非简单的材料进场及设备就位，而是围绕后续连续浇筑形成的一体化前置组织过程，施工单位应先结合设计文件、地勘资料及路基断面条件，再次核对泡沫轻质土适用区段，重点梳理软弱地基分布、桥台背衔接段、狭窄作业面及高差变化位置，明确各区段的填筑标高、厚度变化及边界约束形式，使施工准备精准对应具体路基工况。随后围绕配合比设计开展针对性试验，按照设计湿密度、流动度和强度指标，对水泥、发泡剂、掺合料及用水比例进行比选，重点验证泡沫稳定性、浆体均匀性及不同温湿环境下的适应能力，避免单纯依据经验参数组织施工。与此同时，施工准备阶段应同步建立数字化测控基础，利用无人机航测、三维地形复核或 BIM 断面校核方式，确认基底高程、边界线形及浇筑范围，使后续方量控制、分仓划分和浇筑顺序更具可视性。对原材料管理，也不能停留在常规验收层面，而应突出批次稳定性控制，重点核查水泥活性波动、发泡剂稀释比例和掺合料含水状态，保证现场制备参数具有可复制性。

2.2 基础与边坡处理

基础与边坡处理的本质是构建泡沫轻质土与原地基之间的可靠连接界面，保证两者协同受力，泡沫轻质土虽具有轻质性优势，但其与原地基的界面结合能

力仍取决于基底的处理质量。传统处理方法多为单纯的台阶开挖与基底整平，对轻质土与原地基之间的界面黏结缺乏系统考量，无法充分发挥泡沫轻质土轻质优势。当前先进做法是引入高压旋喷桩及 MJS 工法相结合的复合地基处理技术，在基底软弱区域预先形成水泥土增强体，既提升地基承载力，又通过桩体与轻质土的有效嵌固形成整体受力结构，使桩体与轻质土形成刚度梯度过渡层，消解差异沉降引发的应力集中。在边坡处理方面，摒弃传统单一台阶开挖方式，采用三维激光扫描引导下的精准开挖技术，依据地质雷达探测结果动态调整台阶位置与坡度，保证台阶面进入稳定持力层，同时利用点云数据生成开挖面三维模型，与设计模型进行实时比对，实现开挖精度的毫米级控制。为增强界面抗剪能力，在台阶面铺设高强土工格栅并喷涂界面增强剂，土工格栅采用双向拉伸型，抗拉强度不低于 80 kN/m，界面增强剂为水性环氧树脂改性材料，渗透深度可达 5 mm 以上，形成机械咬合与化学黏结的双重界面强化机制。基础处理完成后，采用连续压实检测系统全覆盖监测基底压实度，系统集成加速度传感器及 GNSS 定位模块，以每 5 cm 深度采集一组数据的方式生成压实度云图，替代传统的每 200 m 抽检一点的方式，保证每一处基础均达到设计承载要求。

2.3 面板安装

面板安装的根本目的在于为泡沫轻质土提供侧向约束条件，使其在自重及上部荷载作用下保持结构完整性。泡沫轻质土固化后虽具有一定的自立性，但作为一种类混凝土材料，其抗拉强度远低于抗压强度，若无有效的侧向约束，路基边缘易在温度变化、干缩或水平荷载作用下产生开裂甚至失稳，面板承担侧向

土压力、限制土体侧向变形,使泡沫轻质土处于三向受压状态,从而发挥其抗压强度优势^[6]。

面板安装的技术发展体现在预制装配化与结构功能一体化方向,其本质在于为泡沫轻质土提供可靠的侧向约束条件,使其在自重及上部荷载作用下保持结构完整性。当前主流设计采用高精度预制装配式面板系统,面板单元在工厂采用高强混凝土及自动化模具成型,混凝土强度等级不低于C40,尺寸精度控制在 $\pm 2\text{ mm}$ 以内,表面预留与轻质土体连接的抗剪键槽及锚固凹槽,抗剪键槽深度不小于 30 mm ,间距按 500 mm 均匀布置。安装过程中引入三维激光定位技术,利用全站仪及智能棱镜系统实时校正面板轴线与高程,安装误差控制在 $\pm 5\text{ mm}$ 以内,远低于传统施工 $\pm 20\text{ mm}$ 的控制标准。面板及面板之间采用榫卯式连接构造,凸榫与凹槽配合间隙不超过 3 mm ,配合高性能聚氨酯密封胶填充接缝,既保证结构整体性,又适应温度变形及轻微沉降。为提升面板与泡沫轻质土的整体受力性能,在面板背面设置多排连接钢筋网片,钢筋采用直径 12 mm 的HRB400级螺纹钢,间距按 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 布置,钢筋伸入轻质土浇筑层内长度不小于 500 mm ,形成可靠的锚固结构,使面板与轻质土在受力过程中协同受力。

2.4 现场浇筑

现场浇筑是泡沫轻质土路基结构成形的核心环节,其控制逻辑在于保证材料性能的均质性与结构成型的连续性。泡沫轻质土的性能高度依赖气泡分布均匀性,若浇筑过程中出现单点堆积、分层间隔过长或密度控制失当状况,易导致气泡上浮、密度分层或层间冷缝等问题,使路基局部区域出现强度薄弱带。

现场浇筑的技术突破集中于智能化泵送以及过程质量控制一体化,预设浇筑路径及分层厚度,由机械臂控制泵管移动均匀布料。浇筑过程中集成在线密度监测装置,实时采集湿密度数据并自动反馈至拌合控制系统,当密度偏离设定值时系统自动调整发泡剂掺量或水胶比,确保浇筑质量始终处于受控状态。分层浇筑的界面处理引入智能界面识别技术,利用红外热成像或超声检测判断下层终凝状态,自动确定最佳浇筑时机,避免因间隔过长产生冷缝或间隔过短导致气泡扰动。对于大体积填筑段,创新性地采用分层分块跳仓浇筑工艺,利用数字孪生模型优化分块尺寸与浇筑顺序,控制水化热积聚及收缩裂缝。浇筑过程中同步布设分布式光纤传感系统,将传感光纤埋入轻质土体内部实时监测温度场变化,为调整养护参数提供数据支撑。

2.5 养护

养护措施的核心在于为水化反应提供稳定的温湿度环境,延缓水分蒸发速率。从工程角度看,养护不

仅关乎材料最终强度是否达标,更直接影响路基抗裂性能及长期耐久性,养护工作执行程度决定了前期各工序投入能否转化为可靠的工程品质。养护的技术创新体现在智能感知与自适应调控方向,搭建基于物联网的智能养护系统,在浇筑层内预埋温湿度传感器及应变计,实时监测轻质土内部的温度、湿度及收缩变形数据,利用无线传输模块上传至云端养护管理平台。平台依据水化热演化规律、环境气象数据及内部应变反馈,自动生成养护策略,控制现场智能喷淋系统或雾化养护装置启停。对于大面积填筑段,创新性地采用养护膜及微渗管组合系统,在浇筑层表面铺设高分子养护膜,膜内布设微渗管道,使轻质土表面始终保持湿润状态,同时避免过量水冲刷造成表层劣化。在高温季节或干燥气候条件下引入蒸发抑制技术,喷洒高分子成膜养护剂,在轻质土表面形成透光不透水的封闭膜,而养护剂在 $7\text{天}\sim 10\text{天}$ 后自然降解,无需人工揭膜。养护期结束后,采用非破损检测技术综合评定轻质土强度及均匀性进行,结合养护过程数据生成养护质量报告为后续工序提供可靠依据。

3 结束语

泡沫轻质土作为一种兼具多重优势的新型路基材料,解决了公路路基修筑中软基沉降、狭窄空间回填、高填方变形控制等传统难题,在公路工程建设中展现出广阔的应用前景。在施工过程中,施工准备的充分性、基础与边坡处理的可靠性、面板安装的精准性、现场浇筑的均质性及养护的及时性,是保障泡沫轻质土路基性能的关键环节。随着材料科学及施工技术的不断进步,应进一步加强泡沫轻质土的性能优化研究,探索其在更复杂地质条件下的应用技术,为我国公路工程的高质量发展提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 李华治.高速公路泡沫轻质土路基施工技术[J].交通世界,2025(32):60-62.
- [2] 陈燕芳.泡沫轻质土施工技术在公路提升改建工程中的应用[J].运输经理世界,2025(30):20-22.
- [3] 韩雨生,李志虎,程咏春.泡沫轻质土在路基拼宽及抬升改扩建中的应用研究[J].甘肃科学学报,2025,37(05):118-123.
- [4] 王晋.公路改扩建项目中泡沫轻质土的应用效果分析[J].交通世界,2025(18):45-47.
- [5] 刘兆瑞.公路软基处理中的泡沫轻质土模拟研究[J].交通世界,2025(16):122-124.