

泡沫轻质混凝土应用于高速公路扩建拼宽路基的关键施工技术及工程效益分析

薛理家

中铁大桥局第九工程有限公司, 广东 中山

收稿日期: 2025年7月15日; 录用日期: 2025年8月5日; 发布日期: 2025年8月19日

摘要

随着我国高速公路交通量增加, 早期路段通行能力不足问题日益突出, 改扩建工程成为重要解决方案。本文以长春至深圳国家高速公路河源至惠州段改扩建工程为例, 重点介绍了泡沫轻质混凝土在路基拓宽中的应用及其关键技术。研究表明, 泡沫轻质混凝土的应用具有减小填土荷载、降低沉降差异、施工便捷、占地少等优点, 能有效缓解新旧路基沉降差异, 提升工程质量和安全性。同时, 其作为新型环保材料, 具有良好的经济效益与社会效益, 具备良好的推广价值。

关键词

高速公路拼宽路基, 泡沫轻质混凝土, 施工技术, 效益分析

Key Construction Techniques and Engineering Benefits Analysis of Foam Lightweight Concrete Applied to Highway Expansion and Widening Subgrade

Lijia Xue

The 9th Engineering Co., Ltd., MBEC, Zhongshan Guangdong

Received: Jul. 15th, 2025; accepted: Aug. 5th, 2025; published: Aug. 19th, 2025

Abstract

With the increase in highway traffic volume in China, the problem of insufficient capacity in early-stage sections has become increasingly prominent, making reconstruction and expansion projects an

文章引用: 薛理家. 泡沫轻质混凝土应用于高速公路扩建拼宽路基的关键施工技术及工程效益分析[J]. 土木工程, 2025, 14(8): 1945-1957. DOI: 10.12677/hjce.2025.148212

important solution. This paper takes the reconstruction and expansion project of the Heyuan-Huizhou section of the Changchun-Shenzhen National Expressway as an example to focus on the application and key technologies of foamed lightweight concrete in subgrade widening. Studies have shown that the application of foamed lightweight concrete offers advantages, including reduced embankment load, decreased differential settlement, convenient construction, and less land occupation. It can effectively mitigate differential settlement between new and old subgrades, thereby improving project quality and safety. At the same time, as a new type of environmentally friendly material, it has good economic and social benefits and possesses excellent promotional value.

Keywords

Highway Widening Roadbed, Foam Lightweight Concrete, Construction Technology, Benefit Analysis

Copyright © 2025 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

经济快速增长在驱动物流与旅游业发展的同时，也在持续加剧着交通网络的压力，包括中国在内的许多国家，虽已建成大规模高速公路系统，但交通需求的快速增长远超预期，大量路段实际通行量已经接近或超过其设计能力。过去几年，我国的高速公路建设规模虽大，却仍难以匹配急剧增长的交通需求。因此，通过拓宽路堤增加车道的数量，已成为行业应对交通流量攀升、缓解道路通行压力的关键技术手段。京哈高速[1]、沪武高速[2]、长深高速[3]等高速公路改扩建工程，正是这一措施的具体体现。

扩宽路基的首要问题是控制新旧路基间的差异沉降——过大的沉降差将直接诱发路面结构层开裂、车辙变形乃至整体失稳，模型试验[4]、数值建模[5]和现场试验[6]是分析加宽路堤变形特征和机制的常用方法。Allersma 等[7]在早期提出的路堤拓宽间隙法，即通过在旧路堤与加宽体间预设施工间隙，能有效缓解软基拓宽中的差异沉降问题，该技术至今仍是高含水量软土地区改扩建工程的优选工法。目前，国内外学者均通过模型试验与实际工程证实：将土工格栅单侧锚固于旧路基可有效稳定土拱效应，显著降低差异沉降，提升拓宽路基服役性能[8]-[10]。间隙法和土工格栅虽然在一定程度上能控制新旧路基间的差异沉降，但在使用过程中还是暴露出了一些问题：微小差异沉降在长期积累后引发纵向裂缝、加筋层失效区应力集中加速路面层开裂等。因此，研究人员转向开发环保的轻质路堤填充材料，通过降低填筑体自重以减少现有和加宽路堤下地基的额外应力。

泡沫轻质混凝土作为一种新型路基填料，凭借其轻质、环保、高强的特性[11]，成为高速公路扩建的创新解决方案。在中铁大桥局承建的长春至深圳国家高速公路河源水至惠州平南段改扩建工程 T2 标段中，面对地形受限、常规放坡施工影响周边构筑物的难题，创新性地采用泡沫轻质混凝土实现直立填筑，有效解决了空间约束问题，为类似工程提供了宝贵的实践验证。

2. 技术原理

轻质路堤是近年来发展的新技术，采用轻质的填料(主要有 EPS 泡沫塑料和泡沫轻质混凝土两种材料)代替传统的砂土填料，使软土路基荷载大幅度降低，从而达到软基不处理或弱处理即可满足沉降和稳定要求的目的。本工程轻质泡沫混凝土性能要求：路面底面以下 80 cm 以下，湿容重 6.5 kN/m^3 ，泡沫混凝土 28 d 抗压强度 $\geq 0.6 \text{ Mpa}$ ；流动度为 $180 \pm 20 \text{ mm}$ 。

2.1. 泡沫轻质混凝土特性

泡沫轻质混凝土具备微孔性、轻质性、高流动性与凝结直立性等特点，其具体特性如表 1 所示。

Table 1. Foam lightweight concrete characteristics
表 1. 泡沫轻质混凝土特性

特性	技术参数与机理	工程应用优势
微孔性	内含无数个细微独立均匀气泡，气泡含有率 20%~90%	阻断水分渗透路径，提升抗冻融性
轻质性	(1) 容重一般取 4~6 kN/m ³ ，较传统填土降低 60%~70%； (2) 每 1 m 填筑厚度减少附加荷载 12~14 kPa (等效减载 0.2~0.3 m 普通填土)	降低软基沉降风险，适用于桥头跳车防治
高流动性	水平泵送距离 ≥ 500 m，垂直泵送高度 ≥ 30 m	解决狭小空间/复杂地形浇筑难题，减少施工便道占地
凝结直立性	(1) 初凝时间 40~90 min，硬化后侧向土压力 = 0 kPa (2) 弹性模量 100~500 MPa (28 d 龄期)	可垂直填筑(坡度 90°)，消除桥台侧向位移风险
力学行为	无侧限破坏特性以脆性破坏为主，在脆性破坏之前，应力 - 应变呈线性弹性	适用于低应力路基结构层，需配合加筋措施防治突发沉降
耐久性	碳化深度 ≤ 5 mm (50 年服役期)	与普通混凝土等效的服役寿命

2.2. 泡沫轻质混凝土在道路加宽工程中的优势

- (1) 提高土壤的承载力：泡沫轻质混凝土的注入可以增加土壤的孔隙率减小土壤的密实度，从而提高土壤的承载力。这对于高速公路等承载力要求较高的工程非常重要。在软基路段加宽，可不进行软基处理或降低软基处理强度和范围；
- (2) 提升工程的抗震性能：泡沫轻质混凝土的轻质材料本身具有一定的抗震性能，可以减小地震对工程的影响，提高工程的安全性。
- (3) 减少施工成本：相比传统的土石方工程，泡沫轻质混凝土工艺不仅施工周期短，而且材料成本相对较低，可以有效降低工程的施工成本
- (4) 环保节能：泡沫轻质混凝土工艺可以充分利用废弃物和再生材料，减少对自然资源的消耗，符合可持续发展的理念。

2.3. 解决问题所带效益

- (1) 主要效益：利用泡沫轻质混凝土的自立性，采用挂板直立式路堤，可以减少因道路放坡占地，有效减少拆迁工程，降低征地拆迁成本、减少软基处理、预防桥头跳车。
- (2) 附属效益：新旧路基受差异沉降影响易产生纵向裂缝，利用泡沫轻质混凝土填筑路堤可以大幅降低填土荷载及地基附加应力，有效控制路基工后沉降量，避免纵向裂缝病害的产生。此外，泡沫轻质混凝土因固化后可直立，其对桥台的侧向土压力趋近于 0。基于此特性，桥台及桥台桩基可进行简化，由此节省了造价。

3. 材料与养护

- (1) 施工所需主要材料清单如下表 2 所示。
- (2) 浆料储存：将搅拌好的浆料存储在具备搅拌功能的储罐内，避免浆料沉淀；浆料在储罐中的存储

时间不超过 1.5 h;

Table 2. List of construction materials
表 2. 施工材料表

材料名称	规格和要求
水泥	42.5 级硅酸盐水泥
水	自来水
发泡剂	HC-F11 植物性发泡剂
级配碎石	最大粒径不大于 37.5 mm，粒径 4.75 mm 以下的细粒含量不超过 10%， 粒径 2.36 mm 以下细粒含量不超过 6%，基本无 1.18 mm 以下细粒料
PVC 排水管	本项目采用的埋地 PVC 管材须满足标准：GB/T18477.1-2007《埋地排水用硬聚氯乙烯 (PVC-U) 双壁波纹管材》的要求，其环刚度要求大于或等于 8 kN/m ²
防渗土工膜	M2/PE 型号，厚度为 2 mm，伸长率大于 50%
土工格室	格室片高度 50 mm，网格尺寸 400 mm × 400 mm

- (3) 发泡工艺：采用压缩空气物理法发泡，禁用搅拌法生产泡沫；
- (4) 养护要求：浇筑后需覆盖保湿养护≥7 天；当泡沫轻质混凝土顶面有坡度要求时，应设置台阶满足坡度变化，台阶高差应小于 0.2 m。施工现场的泡沫轻质混凝土养护如图 1 所示。



Figure 1. Curing of finished foam lightweight concrete products
图 1. 泡沫轻质混凝土成品养护

4. 关键施工技术

整个工程的施工流程以直观的形式呈现于图 2 中。该流程包括以下四个核心阶段：现场准备工作、泡沫轻质混凝土的制备、泡沫轻质混凝土的浇筑、面层及附属工程施工，其中新老路基衔接、分层浇筑以及泡沫轻质混凝土制备是施工的关键。

4.1. 新老路基衔接处理技术

- (1) 当高速公路边坡高度超过 5 m 时，为防止削坡过程中原有波形护栏发生倾倒，需在削坡前对其进行加固，加固施工示意图如图 3 所示。具体措施为：先在波形护栏外侧的土路肩处按 1:1.5 的坡比向下放坡至路面以下 1.2 m 处；随后，在对应每个波形护栏立柱的位置使用 U 型钢筋进行加固。

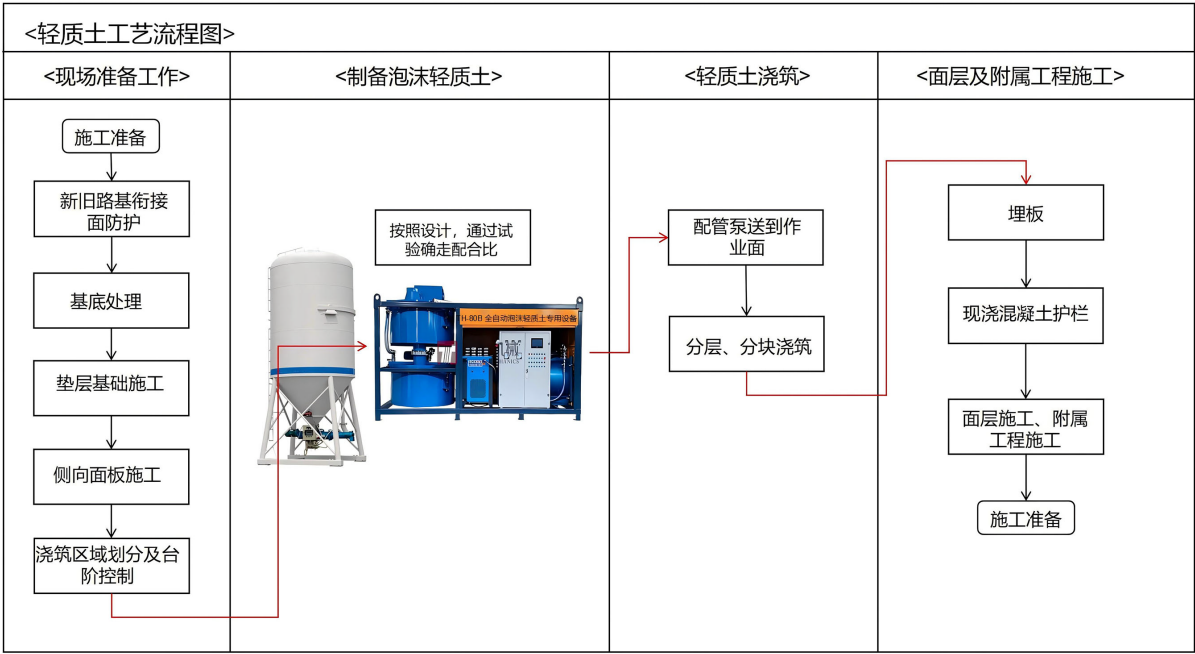


Figure 2. Lightweight soil construction process flow chart
图 2. 泡沫轻质混凝土施工工艺流程图

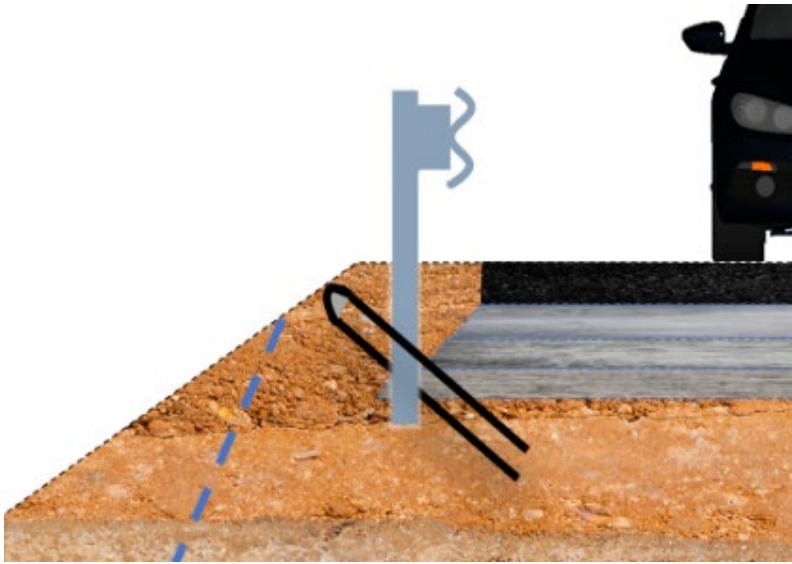


Figure 3. Reinforcement construction diagram
图 3. 加固施工示意图

(2) 波形护栏加固完成后, 按设计单位设计的 1:0.75 坡比进行削坡(见图 4), 现场的削坡施工按图 5 示意图进行。削坡作业结束后, 沿坡面垂直方向、间距 2 m 植入 L 型锚杆钢筋(钢筋端头外露并朝坡顶方向)。然后在边坡上铺设钢筋网片并固定, 最后进行喷锚处理。

(3) 高速公路边坡高度 ≤ 5 m 的边坡采用一次开挖成型。随后按以下顺序施工:

① 锚杆: 按横、纵向间距均为 2 m 布置锚杆, 钻孔深度 2 m, 采用钻孔注浆工艺安装。完成后报请监理验收。

- ② 钢筋网：在验收合格的坡面上铺设 $\phi 3.2 \text{ mm} @ 10 \times 10 \text{ cm}$ 钢筋网片，网片搭接长度不小于 $30 d$ (d 为钢筋直径)。挂网完成报请监理验收。
- ③ 喷混凝土：验收合格后，使用湿喷机喷射混凝土完成坡面防护。

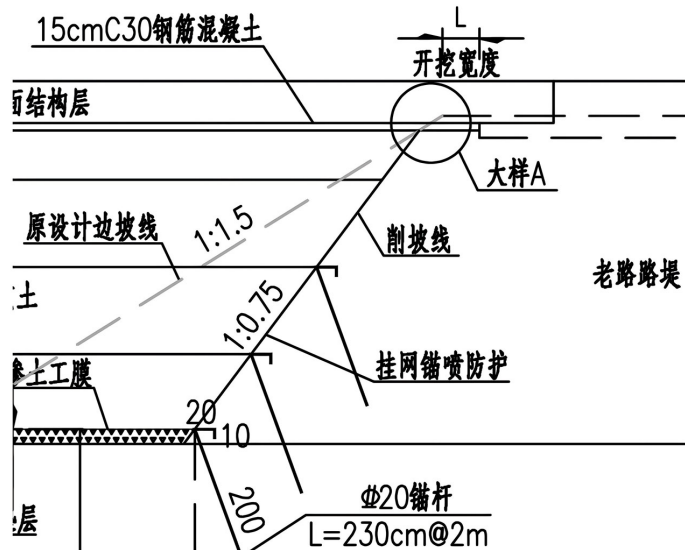


Figure 4. Slope cutting design drawing
图 4. 削坡设计图



Figure 5. Slope cutting construction diagram
图 5. 削坡施工示意图

4.2. 基底、垫层、面板施工技术

基底处理是保证荷载均匀传递的关键，避免沉降不均；垫层施工通过排水管 + 土工格室 + 碎石层组合，增强排水能力与整体稳定性；面板安装形成直立路堤防护结构，利用泡沫轻质土零侧压特性，减少桥台负荷。此三大核心工序，为泡沫轻质土路堤的稳定性和耐久性奠定基础。

4.2.1. 基底处理

- (1) 施工要求：① 按设计高程和尺寸进行开挖、清理、整平、压实，压实度 $\geq 92\%$ ；② 设置排水沟或其他排水设施，确保基底无积水、无松软土；③ 清除浇筑区杂物，基底土层需按图 6 所示进行碾压处理。
- (2) 验收标准：① 基底无明显积水、无松软土；② 浇注区平面尺寸不小于设计值，基底高程偏差 $\leq \pm 10 \text{ cm}$ 。

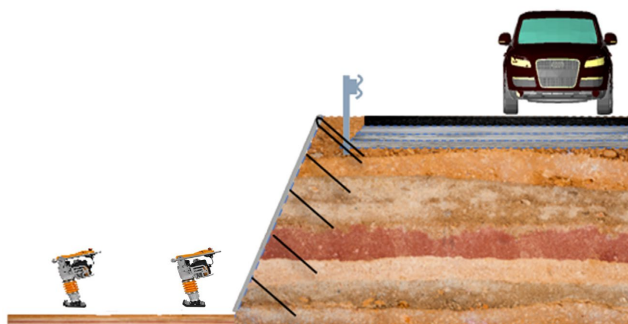


Figure 6. Compaction treatment of the subgrade soil layer

图 6. 基底土层的碾压处理

4.2.2. 垫层施工

垫层施工工艺流程如图 7 所示。

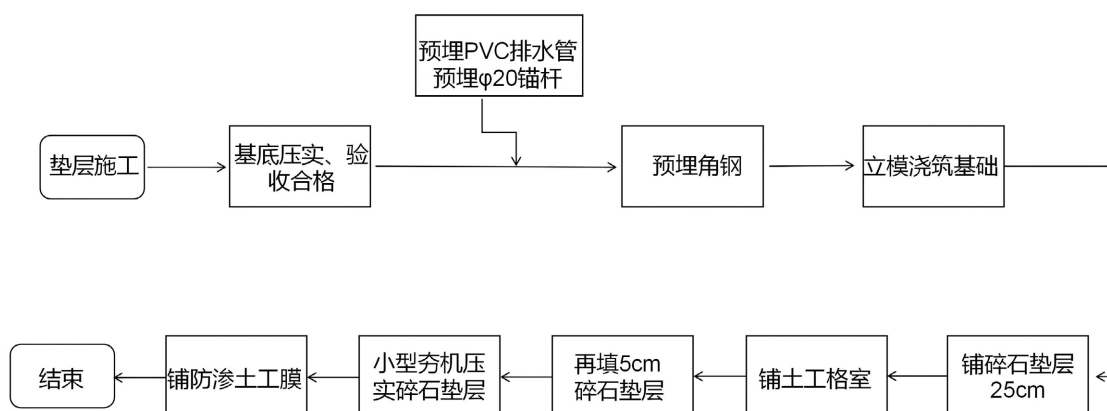


Figure 7. Construction flow chart for subgrade foundation

图 7. 垫层基础施工流程图

(1) 基底压实：在基底开挖完成用压路机对基底进行压实，待基底验收合格后，立即浇筑 C30 混凝土基础(宽 2 m、高 30 cm，尾端加高 30 cm)，提前按设计间距预留变形缝。

(2) 预埋排水管：在基础中埋设 PVC 排水管($\phi 10\text{ cm}$ @ 5 m)，用于疏导轻质土与喷混面下渗的雨水，排水管靠砂垫层侧，采用透水土工布包裹，深入碎石层侧 10 cm。垫层基础预埋示意图如图 8 所示。

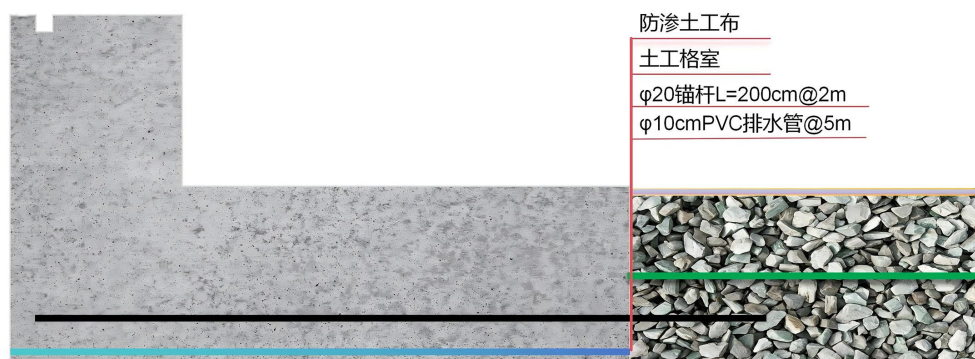


Figure 8. Schematic diagram of embedded foundation base

图 8. 垫层基础预埋示意图

(3) 碎石垫层施工：铺设 25 cm 级配碎石→满铺土工格室(网格 400 mm × 400 mm)→U 型钉固定绷紧→覆盖 5 cm 碎石→小型夯机压实。作业人员拍摄的土工格室铺设现场如图 9 所示，碎石垫层铺设土工布现场如图 10 所示。



Figure 9. Foam lightweight concrete geocell installation
图 9. 泡沫轻质混凝土土工格室铺设



Figure 10. Laying geotextile on a crushed stone base layer
图 10. 碎石垫层铺设土工布

4.2.3. 面板安装

(1) 面板规格与制作：采用小石子混凝土预制面板，确保表面平滑美观。标准块尺寸为 900 × 300 × 40 mm (长 × 宽 × 厚，面板尺寸示意图如图 11 所示)。边板与顶板为异形块，安装时可通过钢锯切割标准块成型。

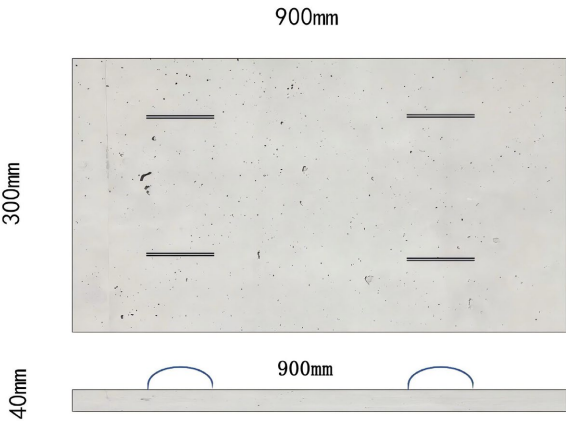


Figure 11. Panel size diagram
图 11. 面板尺寸示意图

- (2) 安装技术要点：
- ① 连接方式：拉杆与角钢点焊连接，焊接人员需严格按照面板与角钢连接示意图(见图 12)进行焊接；
 - ② 沉降缝处理：面板及基础在沉降缝处断开，缝内填塞沥青木板/夹板，缝口表面采用混凝土砌块专用砂浆进行勾缝处理，确保勾缝光滑、圆顺、美观；
 - ③ 排水预留：浇筑基础时预留渗水盲沟出水空间；
 - ④ 现场施工：采用挂板工艺，确保垂直度与稳定性。

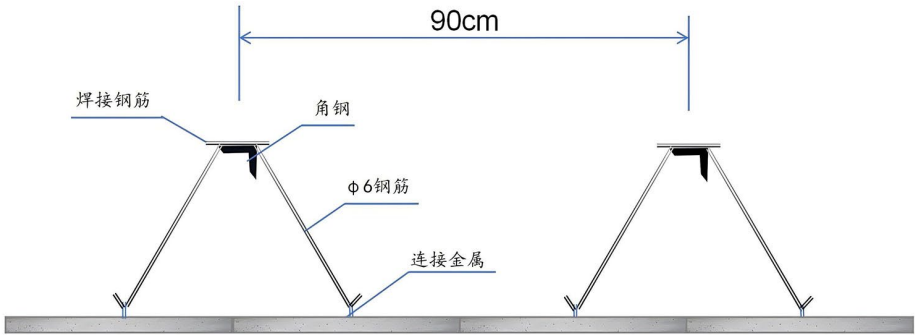


Figure 12. Schematic diagram of panel connection with angle steel
图 12. 面板与角钢连接示意图

4.3. 浇筑工艺控制

4.3.1. 三区段控制

为有效控制泡沫轻质混凝土浇筑过程中的温度应力、收缩裂缝，并确保施工质量与效率，浇筑作业必须严格执行“三区段控制”，即分段、分区、分层，浇筑区域划分如图 13 所示。具体操作要求如下：

- (1) 分段浇筑(纵向分隔)：为释放纵向收缩应力并防止不规则开裂，沿纵向每隔 10 m~15 m 设置变形缝，并以 18 mm 胶合板或 20 mm~30 mm 聚苯乙烯板填充。
- (2) 分区浇筑(水平分块)：当填筑面积较大，在泡沫轻质混凝土初凝前不能完成整层填筑时，必须分块。分块面积的大小应根据泡沫轻质混凝土的初凝时间、设备供料能力以及分层厚度确定。单个浇注区最大浇注面积不得大于 400 m²。
- (3) 分层浇筑(竖向分层)：将每个浇注区划分为若干浇注层，每个浇注区单层浇注厚度宜为 0.3 m~1.0 m。同一区段上下相邻浇注层，当施工期气温不低于 15℃，最短浇注间隔时间可按 8~12 个小时控制(本项目设计图中规定间隔时间至少 24 小时)；否则，每层浇注间隔时间应不低于 2 天。

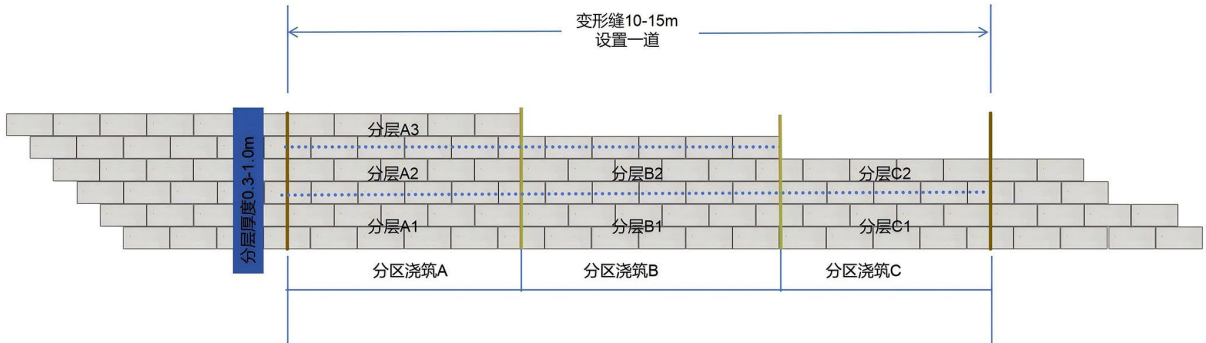


Figure 13. Schematic diagram of pouring area division
图 13. 浇筑区域划分示意图

4.3.2. 浇筑要点

(1) 泡沫轻质混凝土浇筑应符合下列要求:

① 浇筑准备: 每层泡沫轻质混凝土浇筑前, 应在浇筑层顶面设置标高控制点。浇筑必须采用管路泵送方式。泵送前, 须检查并确认所有管接头紧固、密封可靠, 无泄漏风险。

② 输送距离: 水平泵送距离不大于 500 m, 垂直泵送距离不大于 30 m, 超过此距离时增加中继泵送设备。

③ 浇筑方法: 应从软管前端直接浇筑, 出料口应埋入泡沫轻质混凝土中或尽量靠近其表面。浇筑可采用从浇筑点中心向四周扩散或多点浇筑的方式, 且浇筑点不得正对冲击模板。若需移动浇筑管, 应沿其放置方向前后移动, 避免左右挪动。作业人员拍摄的泡沫轻质混凝土的现场浇筑如下图 14 所示。

④ 振动控制: 为确保泡沫轻质混凝土中的气泡独立且均匀分布, 同时将气泡消泡及材料离析问题控制在最小程度, 施工过程中应避免过度振动。

⑤ 泡沫轻质混凝土每浇筑 2 m 需设置一道钢筋网, 图 15 为现场作业人员拍摄的钢筋设置图。



Figure 14. Foam lightweight concrete on-site pouring diagram
图 14. 泡沫轻质混凝土现场浇筑图



Figure 15. Foam lightweight concrete reinforcement mesh installation
图 15. 泡沫轻质混凝土钢筋网设置

(2) 埋板浇筑

埋板的施工示意图如图 16 所示, 其施工注意事项如下:

① 浇筑准备: 埋板浇筑前需要移除原有波形梁护栏确保作业面无障碍物, 并在施工区域安装临时护栏保障行车及施工安全。

② 钢筋网与埋板定位: 在预埋区域绑扎钢筋网片, 确保网格尺寸、间距及保护层厚度符合规范。将

预埋板(如锚固钢板)精确固定于钢筋网片上,控制平面位置、标高及水平度。

③ 特殊构造处理:埋板时应与老路基搭接 75 cm,防止新老路基衔接处产生应力集中效应,埋板最小厚度为 10 cm。当泡沫轻质混凝土顶面有坡度要求时,需设置台阶满足坡度变化,台阶高差应小于 0.2 m。

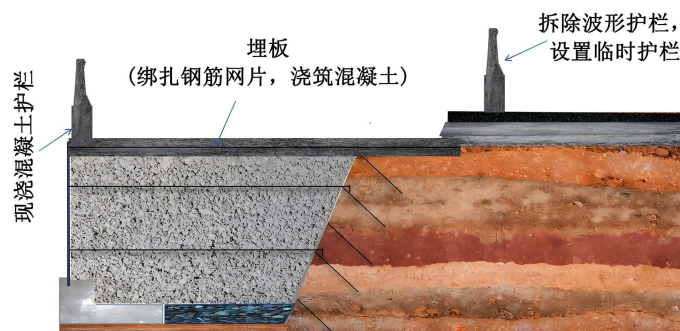


Figure 16. Buried plate construction diagram

图 16. 埋板施工示意图

4.3.3. 质量控制

浇注过程中,泡沫轻质混凝土质量检验应按严格满足下表 3 要求:

Table 3. Allowable deviation in the pouring environment for foam lightweight concrete

表 3. 泡沫轻质混凝土浇筑环境允许偏差

检验项目	湿密度(kg/m ³)	流值(mm)	空气含有率(%)
规定值	A	180	C
容许变动范围	$A \pm 0.1 A$	180 ± 20	$C \pm 5$
检测频率	2 次/浇注层	2 次/工作日	必要时

注:表中 A、C 均为设计值。

当一个工作日内有多次浇注施工时,则每次施工都应进行一次流值检测。对现场取样制作的泡沫轻质土试件强度进行检测,连续浇注少于 1000 m³按每 200 m³取 1 组试件,合格标准为 28 天龄期强度不低于设计值。泡沫轻质混凝土的现场质量检验如下图 17 所示。



Figure 17. On-site quality inspection of foam lightweight concrete

图 17. 泡沫轻质混凝土现场质量检验

5. 工程效益分析

5.1. 经济效益

(1) 降低征地与基础处理成本：泡沫轻质混凝土拼宽路堤可减小道路放坡占地，有效降低了征地拆迁费用。虽然其的单位体积价格(约是普通混凝土的 3~5 倍)较高，但综合考量其对软弱地基的处理效果，相较于传统的排水预压、水泥搅拌桩、预应力管桩等软基处理方法，泡沫轻质混凝土拓宽拼接路堤施工工法可节省工程造价约 22%~38%。

(2) 缩短工期与简化结构：泡沫轻质混凝土施工便捷高效，浇筑完成后仅需 7~14 天即可进行后续路面施工，大幅缩短了工期。以桥台台背处理为例，采用泡沫轻质土方案较常规填筑方案至少可节省 1 个月工期。此外，应用该工法使得桥台结构得以优化(如双排桩简化为单排桩，薄壁台身变为柱式台身)，显著减少了钻孔灌注桩、承台及台身的工程量，简化了施工工序，进一步降低了造价。

(3) 项目实际效益：在本项目路基施工中，共应用泡沫轻质土 156,996 m³，处理路堤长度 6061 m，实际节约用地 37,767 m²，缩短工期 113 天，节约施工费用约 194 万元。

5.2. 社会环保效益

(1) 节约土地资源与保护生态：使用泡沫轻质混凝土拼宽路堤可有效减少工程征地拆迁规模，避免了因传统填方所需大量借土而引发的生态破坏和废弃土方堆填占地问题。

(2) 改善地基性能与保障稳定：采用泡沫轻质混凝土作为路基填料，大幅降低了路基荷载，改善(软弱)地基受力性状态，有效提升了路基的整体稳定性与长期耐久性。同时，该材料能减小路基在施工期及工后的沉降，弱化地基处理。

(3) 降低环境影响与能耗：其施工工法本身具有资源节约、低碳环保的特性，在施工过程中减少了能源消耗，整体上对周边环境影响较小。

(4) 优化施工条件与提升安全性：该方案改善了现场作业环境，降低了施工过程中的安全风险，具有较高的安全可靠性和实用性。

6. 结论

本文以长春至深圳国家高速公路河源水至惠州平南段 T2 标段改扩建工程为例，详细介绍了泡沫轻质混凝土的关键施工技术，并对其工程效益进行分析。主要结论如下：

(1) 泡沫轻质混凝土具有微孔性、轻质性、高流动性及凝结直立性等显著特点。这些特性不仅有助于有效控制新旧路基之间的差异沉降，还能实现直立填筑，从而大幅减少征地拆迁，提高施工效率。

(2) 在道路工程中，新旧路基衔接面是结构稳定性和耐久性的关键控制点。工程实施过程中，首要任务是妥善处理该衔接部位，确保结合紧密、过渡平顺，防止因界面处理不当引发沉降差异、裂缝或结构破坏。同时，还应根据实际情况制定合理的衔接处理方案。

(3) 泡沫轻质混凝土的浇筑工艺是工程实施的关键环节，需严格实施三区段控制，即分段、分区、分层。在浇筑过程中，必须对施工质量进行严密把控，确保各环节符合规范要求。浇筑完成后，应及时进行覆盖和保湿养护，以保障混凝土的正常硬化与强度发展。

(4) 在高速公路扩建拼宽路基项目中，泡沫轻质混凝土具有显著的经济与环保优势。其轻质、高流动的特性可降低基础施工成本，提升施工效率，同时其主要由水泥、泡沫剂和水等环保材料组成，施工过程中碳排放较低，符合绿色施工理念，具有良好的推广价值。

基金项目

中铁大桥局集团有限公司资助项目：高速公路改扩建的绿色智能建造关键技术及应用(2025184)。

参考文献

- [1] 费燕华. 高速公路“四改八”项目沥青路面平整度施工控制研究[J]. 价值工程, 2024, 43(6): 45-47.
- [2] 吴志强, 郑炳锋, 吴威伟, 等. 沪武高速公路太仓北枢纽至董浜枢纽段双向十车道路面扩建方案研究[J]. 现代交通技术, 2025, 22(1): 5-12.
- [3] 刘宗龙. 长深高速公路扩建工程接杆搅拌桩首件施工技术[J]. 黑龙江交通科技, 2024, 47(12): 26-30.
- [4] Chen, T. and Zhang, G. (2024) Centrifuge Modeling of Pile-Supported Embankment on Soft Soil Base for Highway Widening. *Soils and Foundations*, **64**, Article ID: 101422. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101422>
- [5] Buathong, P., Jongpradist, P. and Jamsawang, P. (2025) Performance Evaluation of Lightweight Clay-Air Foam Embankment on Soft Bangkok Clay: A Full-Scale Test and 3D Numerical Analysis. *Results in Engineering*, **27**, Article ID: 105793. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105793>
- [6] Wang, C., Xie, L., Liu, Z., Wu, M., Zhang, T., Cai, G., et al. (2024) Study on Settlement Deformation Law of New and Old Subgrade of Expressway Reconstruction and Expansion Based on CPTU. *Transportation Geotechnics*, **49**, Article ID: 101392. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101392>
- [7] Allersma, H.G.B., Ravenswaay, L. and Vos, E. (1994) Investigation of Road Widening on Soft Soils Using a Small Centrifuge. *Transport Research Record*, **1462**, 47-53. <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1994/1462/1462-006.pdf>
- [8] 张阳. 土工格栅在道路路基拓宽工程中的应用[J]. 四川水泥, 2025(1): 169-171.
- [9] Zhang, J., Li, X., Ding, L. and Xiao, Y. (2021) Reinforcement Effect Investigation of Geogrids in the Junction between New and Existing Subgrades in Highway Widening. *Journal of Testing and Evaluation*, **50**, 1947-1961. <https://doi.org/10.1520/jte20210223>
- [10] Lazorenko, G., Kasprzhitskii, A., Kukharskii, A., Kochur, A. and Yavna, V. (2020) Failure Analysis of Widened Railway Embankment with Different Reinforcing Measures under Heavy Axle Loads: A Comparative FEM Study. *Transportation Engineering*, **2**, Article ID: 100028. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100028>
- [11] Li, W., Yang, J., Sun, M., Xu, F., Zhao, Y. and Xia, H. (2025) A Sludge-Modified Foam Concrete for Road Fill Material: Performance Evaluation and Carbon Footprint Analysis. *Journal of CO₂ Utilization*, **91**, Article ID: 103006. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.103006>