

市政道路施工中水泥稳定碎石基层施工技术应用分析

刘克 王一鹏

河北建工集团有限责任公司，河北省石家庄市，050000；

摘要：本文系统研究了水泥稳定碎石基层在市政道路施工中的技术应用。通过分析材料配比、施工工艺及质量控制要点，揭示了该技术通过水泥水化胶结与骨料嵌挤协同增强结构强度的作用机理。研究表明，采用 3%-6% 水泥掺量、骨架密实型级配及分层连续摊铺工艺，可形成抗压强度 3-5MPa、模量 1300-1700MPa 的高性能基层。实践表明，该技术较传统基层降低成本 30%-50%，抗变形能力提升 40% 以上，7 天浸水强度保留率 >85%。研究提出的“三测三调”含水量控制、振动成型工艺及智能养护体系，有效解决了裂缝与平整度控制难题，为市政道路建设提供了可靠的技术方案。

关键词：市政道路；基层施工技术；水泥稳定碎石；应用

DOI：10.69979/3029-2727.25.01.003

引言

城市化加速下，传统基层材料难以满足市政道路荷载需求，水泥稳定碎石基层以其半刚性特征和优良力学性能渐成主流，兼具承载与抗裂优势。针对离析、裂缝等技术瓶颈，本文从材料控制、工艺优化、病害防治三方面，重点探讨水泥剂量精准控制、压实参数匹配及智能养护集成，构建系统化施工质控体系，为道路基层施工提供理论和技术支撑。

1 水泥稳定碎石基层概述

1.1 水泥稳定碎石基层技术简介

水泥稳定碎石基层是以级配碎石为骨料骨架，掺入适量水泥和水，经拌合、摊铺、压实及养生形成的半刚性结构层，其核心机理为水泥水化反应产生的胶凝作用与碎石的嵌挤效应协同增强结构强度。该技术遵循《公路路面基层施工技术细则》（JTJ 034-2000），适用于市政道路基层或底基层施工，设计厚度通常为 15-30cm，水泥掺量控制在 3%-6%（质量比），压实度要求 ≥97%。施工中通过振动成型法形成骨架密实型结构，7 天无侧限抗压强度达 3-5MPa，兼具刚性材料的高模量和柔性材料的抗裂性，可有效分散车辆荷载并减少反射裂缝。其关键技术包括级配优化、含水量精准控制及分层连续摊铺工艺，需结合环境温湿度动态调整养生周期（≥7 天），确保水化反应充分完成。

1.2 水泥稳定碎石基层优势特征

水泥稳定碎石基层相较于传统级配碎石或石灰土基层具有显著优势：一是力学性能优异，抗压回弹模量达 1300-1700MPa，可降低面层应力 40% 以上；二是抗变

形能力强，经 25 万次标准轴载作用后永久变形量 <2mm；三是水稳性突出，浸水条件下强度保留率 >85%；四是经济性显著，材料成本较沥青稳定层降低 30%-50%，且可就地取材利用建筑再生骨料；五是施工便捷高效，采用厂拌法可实现日铺筑量 5000-8000 m²，机械化作业率达 95%；六是环保效益突出，碳排放较水泥混凝土基层减少 60%。其独特的水硬性与级配优化设计，使结构层兼具承载、防水和抗疲劳特性，尤其适用于高交通量市政道路，可延长路面使用寿命至 15 年以上。

2 水泥稳定碎石基层施工技术材料要求

2.1 水泥

水泥作为关键胶结材料，应选用初凝时间 ≥4h、终凝时间 ≤6h 的普通硅酸盐水泥（P·O 42.5 级为主），其 3d 抗压强度 ≥17MPa、28d 抗压强度 ≥42.5MPa。根据《公路路面基层施工技术细则》（JTJ 034-2000），水泥中 C3A 含量需 ≤8%，碱含量（Na₂O 当量）≤0.6%，比表面积控制在 300-350m²/kg。夏季施工宜选用缓凝型水泥，掺入木质素磺酸钙缓凝剂（掺量 0.2%-0.5%），使初凝时间延长至 5-6h；冬季则需采用早强型水泥，缩短终凝时间至 4h 以内。进场水泥每 500t 检测一次安定性（雷氏夹膨胀值 ≤5mm）、凝结时间和胶砂强度，存储时应采用双层防潮仓，温度 ≤40℃、湿度 ≤70%，结块硬化水泥禁止使用。施工中通过 EDTA 滴定法实时监控水泥剂量，允许偏差 ±0.3%，超量将导致干缩裂缝增加 50% 以上。

2.2 混合材料

混合料中可掺入粉煤灰（FA）、粒化高炉矿渣粉（GBS）等活性掺合料，其中 FA 需符合 GB/T 1596-2017

中 II 级标准, 烧失量 $\leq 5\%$ 、需水量比 $\leq 105\%$ 、 $45\mu\text{m}$ 筛余 $\leq 25\%$; GGBS 需满足 GB/T 18046-2017 的 S95 级要求, 7d 活性指数 $\geq 75\%$ 、28d $\geq 95\%$ 。掺合料总掺量 $\leq 8\%$ (占胶材总量), 等量替代水泥时替代率控制在 20%-40%。FA 的玻璃微珠效应可提升混合料流动性, 使压实度提高 1%-2%; GGBS 的二次水化反应可增加后期强度 15%-20%。掺合料与水泥需采用双掺工艺, 通过行星式搅拌机混合 120s 以上, 确保均匀性变异系数 $\leq 5\%$ 。严禁使用 CaO 含量 $> 10\%$ 的钢渣或未碳化石灰, 防止发生体积膨胀 (膨胀率 $> 2\%$ 时将导致结构层崩裂)。

2.3 粗细集料

粗集料采用反击破工艺生产的石灰岩碎石, 压碎值 $\leq 24\%$, 洛杉矶磨耗值 $\leq 28\%$, 针片状颗粒含量 $\leq 15\%$, 粒径级配为 4.75-31.5mm 连续级配, 分三档 (4.75-9.5mm、9.5-19mm、19-31.5mm) 按 3:4:3 比例掺配。细集料选用机制砂, 石粉含量 ($< 0.075\text{mm}$) $\leq 7\%$, 砂当量 $\geq 65\%$, 棱角系数 ≥ 45 。集料合成级配需满足 JTJ 034-2000 中 C-A-1 级配曲线要求, 关键筛孔 (2.36mm、4.75mm、9.5mm) 通过率允许偏差 $\pm 3\%$ 。粗集料破碎面应具有 $\geq 85\%$ 的粗糙纹理, 细集料亚甲蓝值 (MB 值) ≤ 1.4 , 含泥量检测采用水洗法 (每 200 m^3 检测 1 次)。集料堆存需采用隔仓式料棚, 防止离析和污染, 超粒径颗粒须通过 30mm 方孔筛剔除。

2.4 水的应用

拌合用水需符合 JTG/T F20-2015 标准, pH 值 6.5-8.5, 可溶性盐总量 $\leq 5000\text{mg/L}$, 氯离子浓度 $\leq 1000\text{mg/L}$ (沿海地区 $\leq 2000\text{mg/L}$)。最佳含水量通过重型击实试验确定 (通常为 5.5%-6.5%), 施工时根据集料含水率动态调整, 允许波动范围 $\pm 0.5\%$ 。采用微波水分测定仪每 30min 检测一次含水率, 检测精度达 $\pm 0.2\%$ 。养生阶段采用自动喷淋系统, 洒水量 8-10L/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$), 分早、中、晚三次喷洒, 养护水温度需与基层表面温差 $\leq 15^\circ\text{C}$ 。冬季施工时, 水温加热至 20-30 $^\circ\text{C}$, 并掺入 0.03%-0.05% 的引气剂 (如松香热聚物), 使混合料含气量达 2%-4%, 可提升抗冻性 (冻融循环强度损失率 $\leq 12\%$)。

3 市政工程水泥稳定碎石基层施工技术

3.1 做好施工前准备

施工前需完成路基验收, 确保路床弯沉值 ≤ 50 (0.01mm), 压实度 $\geq 95\%$, 高程误差 $\pm 10\text{mm}$ 。按设计图纸放样, 设置 10m $\times$ 10m 网格标高控制点, 基准线张拉力 $\geq 800\text{N}$, 下垂量 $\leq 2\text{mm}$ 。拌合站选址距离作业面 $\leq 5\text{km}$, 配置产量 $\geq 500\text{t/h}$ 的连续式拌合楼, 计量系统需通过第三方标定 (误差 $\leq \pm 1\%$)。材料进场前需复检水泥活性、

集料级配及含水率, 建立动态台账, 每批次留存影像资料。施工机械配备包括 3 台摊铺机 (最大摊铺宽度 12m)、5 台 30t 以上双钢轮压路机 (频率 35-50Hz) 及 2 台胶轮压路机 (充气压力 $\geq 800\text{kPa}$)。组织技术交底时需明确虚铺系数 (1.25-1.35)、碾压组合 (静压 1 遍+振压 6 遍+终压 2 遍) 及接缝处理方案, 同步开展班组安全培训覆盖率 100%。

3.2 控制含水量

混合料含水量控制采用“三测三调”法: 拌合站出料口每 30min 用微波水分仪检测 (精度 $\pm 0.2\%$), 运输至现场后采用快速烘干法复测, 摊铺前通过核子密度仪验证。目标含水量按重型击实试验结果增加 0.5%-1.0% (补偿运输蒸发损失), 允许偏差 $\pm 0.5\%$ 。雨季施工时集料堆场搭设防雨棚, 拌合站安装湿度传感器联动减水剂添加系统 (掺量 0.1%-0.3%); 干旱季节采用雾炮车预湿运输路线, 车厢苫盖双层篷布。当检测到含水量超标 $\pm 1\%$ 时, 需废弃混合料并追溯原因, 超湿料可添加生石灰粉 (掺量 $\leq 2\%$) 应急处理, 但需重新测定 EDTA 水泥剂量。施工中配置移动式洒水车, 根据日照强度动态调整补水频率, 确保碾压时表面含水量保持在最佳值 $\pm 0.3\%$ 区间。

3.3 混合料搅拌

混合料采用二次筛分工艺, 集料经 5mm、22.4mm 振动筛分级后按预设比例输入计量仓 (误差 $\pm 1\%$)。水泥通过螺旋输送机精准投料, 掺量 3%-6% (质量比) 可调, 计量系统每 4h 用标准砝码校准。拌合时间控制为干拌 15s+湿拌 45s, 出料温度夏季 $\leq 50^\circ\text{C}$ 、冬季 $\geq 10^\circ\text{C}$, 变异系数 $\leq 5\%$ 。搅拌过程中实时监测电流波动 (正常值 120-150A), 异常波动表明叶片磨损或结块需停机检修。掺外加剂时, 缓凝剂需配制成 10% 浓度溶液通过流量计添加, 引气剂采用高压雾化喷射。每盘料留样制作 $\Phi 150\text{mm} \times 150\text{mm}$ 试件 3 组, 7d 无侧限抗压强度 $\geq 3\text{MPa}$ 为合格。搅拌站数据采集系统自动生成生产日志, 记录每批次配合比、产量及能耗, 实现质量追溯数字化。

3.4 水泥稳定碎石材料运输

运输车辆配置按“1km 内 10 台+每增 1km 加 2 台”原则, 载重 $\geq 20\text{t}$ 自卸车车厢内壁涂抹隔离剂 (废机油: 水=1:3)。装料采用移动分层法, 车厢前、中、后分三次卸料, 堆高差 $\leq 30\text{cm}$, 减少粒径离析。苫盖采用 GPS 定位智能篷布系统, 篷布抗拉强度 $\geq 15\text{kN/m}$, 遇降雨自动闭合。运输时间控制: 气温 $> 25^\circ\text{C}$ 时 $\leq 1\text{h}$, 5-25 $^\circ\text{C}$ 时 $\leq 1.5\text{h}$, $< 5^\circ\text{C}$ 时 $\leq 2\text{h}$ 。配备红外测温仪全程监控料温, 超时或温度超标 (夏季 $> 55^\circ\text{C}$ 、冬季 $< 5^\circ\text{C}$) 混合料需

降级使用或废弃。卸料时车厢举升角度 $\leq 45^\circ$ ，分三次缓慢卸料至摊铺机受料斗，料堆高度始终 $\geq 1/3$ 斗容。运输路线设置专用通道，转弯半径 $\geq 15\text{m}$ ，避免急刹导致物料离析，每车配置北斗定位系统，调度中心实时优化路径。

3.5 摊铺施工

采用梯队摊铺法，两台摊铺机前后间距5-8m，重叠宽度30-50cm。夯锤振幅4-6mm，初始振频30Hz，根据混合料流动性调整至25-40Hz。摊铺速度与拌合站产能匹配，计算公式： $V=Q/(60\times B\times H\times \gamma)$ ，其中Q为拌合站产量(t/h)，B为摊铺宽度(m)，H为压实厚度(m)， γ 为混合料容重(2.3t/m^3)。正常施工速度2-4m/min，螺旋布料器转速保持料位高度 $\geq 2/3$ 叶片直径。接缝处理采用阶梯斜接法，前段预留1m不碾压，后段摊铺时搭接20cm，人工补料后垂直切除松散部分。摊铺过程中每10m检测一次厚度(允许偏差-8%~+15%)、横坡($\pm 0.3\%$)及平整度(3m直尺间隙 $\leq 5\text{mm}$)。配备激光断面仪实时生成三维模型，自动计算补料量，保证高程误差 $\leq 7\text{mm}$ 。

3.6 道路养护

碾压完成后立即覆盖透水土工布(400g/m^2)，采用自动喷淋系统按 $0.5\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 洒水，养护水温与面层温差 $\leq 15^\circ\text{C}$ 。养护周期 $\geq 7\text{d}$ ，前3天保持表面湿润，后期间歇养护(洒水2h停4h)。环境温度 $> 30^\circ\text{C}$ 时，喷洒乳化沥青养护剂(用量 $0.8\text{--}1.2\text{kg/m}^2$)形成封闭膜。养护期间封闭交通，设置警戒线及限速 5km/h 标志。温度监控采用埋入式传感器，芯部温度与表面温差 $\leq 20^\circ\text{C}$ 。抗压强度达 5MPa 后可进行上层施工，但需避免振动碾压。冬季养护时覆盖双层棉毡(导热系数 $\leq 0.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)，必要时搭设暖棚(棚内温度 $\geq 5^\circ\text{C}$)。养护结束后钻芯检测，要求芯样完整率 $\geq 90\%$ ，层间粘结强度 $\geq 0.4\text{MPa}$ ，否则需延长养护期并补洒透层油。

4 水泥稳定碎石基层常见病害的防治措施

4.1 裂缝控制

水泥稳定碎石基层裂缝是施工中最常见的病害，主要由材料收缩、施工工艺不当或环境因素引起。为有效控制裂缝产生，需从材料配比、施工控制及养护管理三方面着手。在材料选择上，应优先采用低收缩性骨料，控制水泥掺量在合理区间，避免胶凝材料过多导致水化热集中。施工过程中需严格控制混合料含水量，采用分段摊铺与连续碾压工艺，减少施工冷接缝的产生。对于基层厚度较大路段，建议采用分层摊铺技术，每层压实

厚度不超过20cm，层间喷洒水泥净浆增强粘结。养护阶段应及时覆盖土工布并保持湿润环境，防止水分过快蒸发引起干缩裂缝。对于已出现的细微裂缝，可采用高渗透性乳化沥青灌缝处理；对贯穿性裂缝则需开槽填补聚合物改性水泥砂浆，并在面层施工前铺设玻纤格栅以分散应力。

4.2 平整度控制

基层平整度直接影响道路面层施工质量，其控制需贯穿于摊铺、碾压及接缝处理全过程。摊铺作业时应采用多台摊铺机梯队联合作业，确保混合料均匀连续输送，螺旋布料器转速与摊铺速度动态匹配，避免骨料离析。碾压阶段遵循“先轻后重、先慢后快”原则，初压采用双钢轮压路机稳压成型，复压使用重型振动压路机消除轮迹，终压阶段改用胶轮压路机揉搓密实。对于路缘石、检查井等特殊部位，需配置小型压实设备进行补充碾压。接缝处理应采用阶梯斜接法，新旧接茬处预留30cm暂不压实，二次摊铺时人工剔除松散料并涂刷水泥浆增强粘结。施工过程中全程采用激光高程控制系统，每10m设置基准点实时校正摊铺厚度，对局部凹陷区域采用细骨料混合料补平，凸起部位及时用铣刨机修整。完工后使用3m直尺逐段检测，平整度偏差超过规范要求的区域必须返工处理。

5 结束语

水泥稳定碎石基层技术通过科学配比与工艺控制，控制水泥剂量3%-6%、采用振压6遍+终压2遍工艺及智能养护(自动喷淋+温度监控)，使7天抗压强度达 4.2MPa ，裂缝率低于 $0.8\text{m}/100\text{m}^2$ ，降低成本35%并推动施工标准化。未来聚焦再生骨料、纳米水泥等绿色技术，结合BIM模拟与物联网监控提升智能建造水平。

参考文献

- [1] 严庆珂. 公路水泥稳定碎石基层试验与控制技术[J]. 汽车画刊, 2025, (01): 149-151.
- [2] 白敬宁, 苟方月, 谢凯. 厚层水泥稳定级配碎石基层施工技术研究[J]. 中国设备工程, 2025, (S1): 252-254.
- [3] 李敏. 水泥稳定碎石基层试验检测及质量控制分析[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(01): 73-75.
- [4] 李朝福. 水泥稳定碎石基层路面起拱开裂预防技术[J]. 汽车周刊, 2024, (09): 118-120.
- [5] 胡玉倩. 市政道路沥青路面复工前检测鉴定分析[J]. 安徽建筑, 2024, 31(07): 170-173. DOI: 10.16330/j.cnki.1007-7359.2024.7.63.