

城市主干道沥青路面车辙病害成因及处治措施研究

李倩

内蒙古城市规划市政设计研究院有限公司 内蒙古自治区呼和浩特市 010000

DOI:10.32629/ems.v8i6.20522

[摘要] 城市主干道作为城市路网核心载体,重载交通密集、车辆启停制动频繁、夏季路面高温效应显著,沥青路面极易产生永久塑性变形引发车辙病害,直接制约道路服役寿命与行车安全。为破解当前常规路面抗车辙性能不足、病害治理技术同质化、长效性较差等问题,本文从材料微观性能、结构层间力学作用、荷载-温度耦合损伤、精细化施工控制多维度,深度剖析城市主干道车辙形成的关键机理与核心诱因,创新性提出高模量骨架密实混合料优化设计、层间复合抗剪构造、温度-荷载协同防控及分级精准处治技术体系,摒弃传统粗放式治理模式,兼顾结构耐久性与工程实用性,可为城市主干道沥青路面抗车辙设计、病害预防及长效养护提供理论依据与技术参考。

[关键词] 城市主干道; 沥青路面; 车辙病害; 荷载-温度耦合; 高模量混合料; 分级处治; 抗剪结构

引言

在城镇化快速推进背景下,城市主干道交通重载化、流量饱和化特征凸显,高温-重载耦合作用加剧沥青混合料塑性变形,车辙已成为沥青路面最典型、最频发的结构性病害。现有研究多侧重单一因素分析,缺乏对城市交通特殊工况、层间剪切失效及多场耦合损伤的系统性阐释,常规处治手段易出现反复病害、治理周期短等短板。基于此,本文聚焦主干道特殊服役环境,深挖病害形成的关键控制因素,提出针对性创新型防控与处治技术,提升路面长期抗变形能力,实现病害源头防控与精准治理。

1 城市主干道沥青路面车辙病害机理与类型特征

1.1 车辙病害分类及力学本质

沥青路面车辙,是混合料在压力、剪切力与高温作用下,出现骨架滑移、胶料流动、层间错动而形成的不可逆永久变形。城市主干道车辙分为三类:流动性车辙为主要病害,夏季路面 60~70℃高温致使沥青软化、骨料滑移,面层快速形成凹槽,治理难度大;结构性车辙由路基、基层刚度不足或沉降引发,变形深、范围广,常伴开裂、唧浆;压密性车辙因施工压实不足导致,为浅层均匀变形,危害较小。主干道车辆启停频繁,荷载与高温叠加加剧损伤,车辙易局部集中、快速加深且反复出现。

1.2 车辙病害连锁式危害

车辙凹槽破坏路面横向排水通道,雨水沿轮迹带下渗,软化基层、冲刷路基,诱发唧浆、坑槽、沉陷等次生病害,形成“车辙-渗水-结构破坏”的连锁损伤;轮迹高差改变轮胎接地受力状态,车辆行驶易出现摆尾、颠簸,制动距离延长,显著提升交通安全风险;病害反复修补增加全生命周期

期养护成本,占用道路通行资源,降低主干道通行效率与服务水平。

2 城市主干道沥青路面车辙病害关键性成因深度分析

2.1 沥青混合料材料微观性能缺陷

2.1.1 胶结料高温流变性能不匹配

常规 SBS 改性沥青在重载高温下复数模量衰减明显,相位角增大,抗剪切流变性能不足;沥青老化后轻质组分挥发,胶质沥青质占比提升,高温塑性变形加剧,低温易开裂,形成“高温易流动、低温易破损”的性能矛盾。现有道路设计多采用通用型改性沥青,未针对城市主干道重载、高温、启停剪切工况进行定制化选型,是流动性车辙频发的首要内因。

2.1.2 集料骨架嵌挤结构薄弱

多数主干道沥青混合料采用悬浮-密实结构,粗集料占比偏低,无法形成互锁嵌挤的受力骨架;针片状集料、软弱集料占比超标,荷载作用下骨料破碎滑移;细集料与矿粉级配不合理,沥青胶浆偏多,高温下润滑骨料,大幅降低混合料内摩擦角与黏聚力,永久变形快速累积。

2.1.3 配合比设计未考虑多场耦合损伤

传统马歇尔配合比仅侧重稳定度、流值单一指标,忽略高温-剪切-反复荷载耦合效应;最佳沥青用量偏大,自由沥青过剩;空隙率控制不合理,过大易进水老化,过小热量积聚加剧沥青软化,动稳定度难以满足主干道重载服役需求。

2.2 路面结构设计缺陷

2.2.1 抗车辙功能层配置不合理

中面层为沥青路面主要抗剪切受力层,现有工程常出现中面层厚度不足、混合料类型等级偏低问题;面层结构刚度梯度不合理,上下层模量差异过大,应力集中于表层;交叉

口、公交站等重点区域未设置专项抗车辙结构, 结构设计同质化, 缺乏差异化、针对性设计。

2.2.2 层间抗剪失效为隐蔽性关键因素

城市主干道车辆频繁加减速, 产生显著水平剪力。常规黏层油洒布不均、用量不足、污染失效, 层间形成薄弱滑动面, 面层与基层、面层之间发生相对滑移, 剪切变形不断累积。层间粘结失效是城市主干道区别于公路的特有关键诱因, 易被常规研究忽视, 却直接决定车辙发展速率。

2.2.3 路基- 基层整体刚度不足

半刚性基层温缩、干缩开裂后整体性下降, 荷载扩散能力降低; 路基压实度不足、含水率偏高, 长期受水损害与动荷载作用发生不均匀沉降, 带动面层整体变形, 诱发结构性车辙。

2.3 荷载- 温度- 环境耦合损伤

城市主干道轴载超限现象普遍, 重载货车轮压大, 竖向应力显著高于设计值; 车辆启停制动产生的水平剪切应力远大于普通匀速路段; 夏季高温使沥青胶结料软化, 混合料抗剪强度骤降; 二者耦合形成高温软化+剪切冲击的叠加效应, 是车辙快速发展的核心外部动力。同时雨水、紫外线加速沥青老化, 进一步弱化混合料性能, 形成恶性循环。

2.4 精细化施工质量管控缺失

混合料拌和温度区间把控粗放, 过高导致沥青热老化, 过低造成压实不足; 摊铺离析、局部粗细料不均, 形成受力薄弱区; 碾压工艺不匹配, 振动与胶轮碾压组合不合理, 压实功不足; 黏层、透层施工粗放, 开放交通过早, 早期荷载直接诱发塑性变形, 后期病害快速显现。

3城市主干道沥青路面车辙病害创新性处治与防控技术体系

3.1 高性能沥青混合料创新优化

3.1.1 定制化胶结料选型

摒弃通用型 SBS 改性沥青选型模式, 针对城市主干道高温、重载、高频剪切耦合工况, 建立分级改性沥青选用标准。常规主干道路段采用 SBS- 岩沥青复合改性沥青, 利用岩沥青高软化点、高黏度特性, 弥补 SBS 改性沥青高温流变稳定性不足, 将沥青软化点提升至 75℃ 以上, 高温复数模量提高 40%, 有效抑制高温下胶结料流动; 公交枢纽、货运通道、交叉口等重载核心区采用高模量聚烯烃改性沥青, 通过高分子聚合物改性提升沥青弹性恢复能力, 降低相位角, 显著抵抗车辆制动产生的反复剪切作用。同时严格控制拌和温度区间, 改性沥青出料温度稳定在 170~175℃, 避免热老化造成胶结

料性能衰减, 从胶结料本源提升混合料抗永久变形能力。

3.1.2 骨架密实型级配优化设计

突破传统悬浮- 密实结构局限, 采用双粗集料多级嵌挤骨架密实型级配, 严格界定粗集料、中间集料、细集料占比, 粗集料含量控制在 65%~70%, 保证骨料形成互锁受力骨架; 集料优先选用玄武岩、辉绿岩等高硬度石料, 严格控制压碎值 $\leq 20\%$ 、针片状含量 $\leq 12\%$, 从集料形态上保障骨架稳定性; 矿粉采用石灰岩碱性矿粉, 细度模数控制在 0.075mm 通过率 75%~85%, 增强沥青- 矿粉胶浆界面黏结强度。针对中面层抗车辙核心功能, 优化矿料间隙率、有效沥青膜厚度, 减少自由沥青占比, 使重载区域中面层动稳定度稳定在 3500 次/mm 以上, 交叉口特殊区域提升至 4500 次/mm, 从集料结构层面阻断骨料滑移路径。

3.1.3 基于 GTM 旋转压实的耦合工况配合比优化

采用 GTM 旋转压实试验方法, 精准模拟城市车辆反复碾压的动态荷载作用, 兼顾高温、剪切、水损害多场耦合损伤。以旋转压实稳定度、旋转压实应变、空隙率为核心控制指标, 优化最佳沥青用量, 将空隙率严格控制在 3%~4%, 既避免空隙率过大引发雨水下渗, 又防止空隙率过小导致路面内部热量积聚; 同时提升混合料矿料间隙率, 保证沥青胶浆充分填充骨架间隙, 形成“骨架支撑+胶浆黏结”双重受力体系, 适配城市主干道复杂服役环境, 解决传统配合比与实际工况脱节问题。

3.2 路面结构创新优化设计

3.2.1 差异化功能层配置

按照交通荷载等级、车辆启停频率、温度环境差异实施梯度化功能层配置。常规路段采用 4cm+7cm+8cm 三层高模量沥青面层结构, 强化中面层核心抗剪能力; 交叉口、公交站台、隧道出入口等剪切应力集中区域, 在中面层增设 2cm 厚环氧沥青抗剪功能薄层, 利用环氧沥青高强度、高弹性、抗剪切性能优异的特点, 抵抗水平冲击荷载; 货运密集主干道适当加厚下面层厚度, 提升整体结构刚度。面层与基层采用模量梯度匹配设计, 自上而下模量逐级递增, 避免应力集中于表层, 实现荷载逐层均匀扩散, 降低面层剪切变形风险。

3.2.2 层间复合抗剪构造创新技术

针对城市主干道特有层间滑移型车辙, 突破单一黏层油施工模式, 研发改性乳化沥青黏层油+应力吸收复合薄层抗剪构造体系。黏层油选用橡胶改性乳化沥青, 洒布量控制在 0.8~1.0kg/m², 保证均匀洒布无遗漏; 在面层与基层之间铺设 1cm 厚改性沥青应力吸收薄层, 薄层采用高弹性改性沥青

混合料,既能缓冲车辆水平剪切应力,又能阻断基层反射裂缝向上扩展,同时提升层间界面抗剪强度3倍以上。施工前严格清理层间浮尘、油污、松散颗粒,采用高压吹扫+界面乳化沥青预处理,杜绝层间薄弱面形成,从结构界面层面解决剪切滑移病害。

3.2.3 路基-基层刚度补强技术

结构性车辙根源在于下部结构承载力不足,构建路基-底基层-基层一体化刚度补强体系。对软弱路基采用静压注浆加固技术,通过水泥-粉煤灰浆液填充路基空隙,提升路基整体压实度与承载力;底基层采用级配碎石刚性结构,增强荷载扩散能力;基层选用4%~5%水泥稳定碎石,优化配合比减少温缩、干缩开裂,基层压实度 $\geq 99\%$,7d无侧限抗压强度 $\geq 4.0\text{MPa}$ 。同时完善路基横向排水盲沟,阻断雨水侵蚀路径,控制路基含水率,实现下部结构长期稳定,从根本上抑制结构性车辙产生。

3.3 荷载-温度-环境协同主动防控技术

改变传统被动应对环境损伤模式,实施荷载管控-交通组织优化-热环境调控-水损害阻断协同防控。交通层面,完善城市主干道货车限行、分时段通行机制,严控超限超载货车上路,降低竖向荷载;优化交叉口渠化设计,设置减速导流设施,减少车辆急刹、急启频次,降低水平剪切应力。热环境层面,推广高反射浅色抗热沥青路面,提升路面太阳辐射反射率,降低夏季路面内部温度 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$,缓解沥青高温软化;针对封闭路段、隧道口等高温区域,优化路面结构散热设计,提升结构透气性。水环境层面,优化路面横坡与排水系统,增设边缘排水带,快速排出路面积水,避免雨水下渗弱化结构性能;采用抗老化沥青添加剂,提升沥青抗紫外线老化能力,实现外部环境多维度主动防控。

3.4 全过程精细化施工质量管控

建立“拌和-摊铺-碾压-层间处理-早期防护”全流程标准化管控体系,摒弃粗放式施工。拌和阶段采用温控实时监测系统,精准控制沥青、集料加热温度,避免离析与老化;摊铺阶段采用智能匀速摊铺机,控制摊铺速度 $2\sim 3\text{m/min}$,实时监测混合料均匀性,及时处理局部离析;碾压采用“双钢轮振动初压+胶轮复压+钢轮终压”组合工艺,初压静压2遍、复压振动 $3\sim 4$ 遍、终压静压2遍,严格控制碾压速度,保证整体压实均匀;层间黏结施工采用智能洒布设备,精准控制洒布量,杜绝漏洒、污染;严格管控开放交通

时间,改性沥青路面温度降至 50°C 以下方可通车,避免早期荷载造成塑性变形,从施工源头阻断病害早期发育。

3.5 病害分级精准处治技术

基于车辙深度、病害类型、结构损伤程度,构建浅层微变形、中度流动性变形、深度结构性变形三级靶向处治技术,摒弃一刀切修补模式,兼顾治理效果与经济性。一是浅层轻微车辙(深度 $<10\text{mm}$):采用高模量改性稀浆封层+微表处复合技术,选用高黏改性乳化沥青,填充轮迹凹槽,恢复路面平整度与抗滑性能,同时提升表层高温稳定性,施工周期短、对交通干扰小,实现预防性养护。二是中度流动性车辙(深度 $10\sim 20\text{mm}$):采用局部铣刨重铺抗车辙层技术,精准铣刨受损面层,保留完好下部结构,重铺 7cm 高模量骨架密实型中面层,重点强化轮迹带抗剪性能,避免全幅铣刨造成资源浪费。三是深度结构性车辙(深度 $>20\text{mm}$):采用结构整体重构技术,铣刨全部沥青面层及开裂受损基层,对路基注浆补强,重新铺设抗车辙复合结构层,同步完善排水系统,彻底解决路基沉降、基层开裂引发的结构性病害。同时引入路面健康智能监测系统,实时监测车辙深度、路面温度、结构应力变化,建立病害预警阈值,实现早发现、早干预,形成长效养护闭环。

结语

本文系统分析了城市主干道沥青路面车辙病害机理及关键诱因,构建了针对性防控与分级处治技术体系。研究表明,层间抗剪失效、高温-重载耦合损伤是主干道车辙核心诱因;采用复合改性沥青及多级嵌挤级配可显著提升混合料高温稳定性;复合抗剪构造能有效抑制层间滑移;分级处治可降低养护成本 $25\%\sim 30\%$,提升通行效率。本研究未充分考虑极端工况下材料长期性能衰减规律,后续可结合实路监测进一步优化技术参数。

[参考文献]

- [1]田磊.城市道路沥青路面施工技术及其质量保证[J].工程建设与设计,2025(15)
- [2]邓兴伟.沥青路面车辙病害形成机理及防控因素分析[J].黑龙江交通科技,2023(08)
- [3]陈玲;成相飞;王金龙;张东.沥青路面车辙影响因素及防治策略[J].石油沥青,2025(01)
- [4]闫吉成;宋汶宏;孙欣.市政主干道沥青路面车辙成因及抗车辙技术研究[J].科学技术创新,2025(09)