

公路平交口和弯坡叠加工况下的沥青路面抗车辙设计研究

崔 伟

安徽省交设建设工程有限公司 安徽 合肥 230088

【摘 要】：山区及城郊干线公路平交口常伴随弯道与纵坡组合工况，复杂受力环境叠加高温重载交通作用，路面极易产生永久性车辙病害，相较于常规平直路段病害发展速度更快、处置难度更高。为解决该类特殊路段车辙频发问题，本文以安徽某国道干线公路改扩建工程为研究载体，分析平交口弯坡叠加工况下车辙病害形成机理及核心影响因素，从路面结构组合、沥青原材料选型、混合料级配优化三个维度开展专项抗车辙设计，同时制定针对性的路段差异化设计方案。经室内性能试验与工程力学验算验证，优化后的路面结构及混合料方案可显著提升面层高温稳定性与抗剪切变形能力，有效适配复杂工况受力需求，可为同类公路特殊路段路面设计提供参考。

【关键词】：公路工程；平交口；弯坡叠加；沥青路面；抗车辙设计

DOI:10.12417/2811-0528.26.18.036

1 引言

车辙是车辆在路面上行驶后留下的车轮的压痕。过去，人类广泛应用马车，在泥土路上走，由于土路较软，车过后路面就有压痕，雨后，路面有泥水压痕更深。古人云：“前面有车，后面有辙。”车走多了，路上留下两条平行的很深的车辙。现代路面车辙是路面周期性评价及路面养护中的一个重要指标。路面车辙深度直接反映了车辆行驶的舒适度及路面的安全性和使用期限。路面车辙深度的检测能为决策者提供重要的信息，使决策者能为路面的维修、养护及翻修等作出优化决策。目前国内有关研究大多只对单一平交口或者单纯弯坡路段进行研究，对于两种工况叠加的专项抗车辙设计研究很少，现有的设计规范也没有针对复合工况出台差异化的设计标准。因此本文以实体工程为依托，针对复合工况受力特点，对路面全部设计参数进行优化，丰富特殊路段抗车辙设计体系。

2 工程概况

本文的研究对象是安徽某国道干线公路改扩建工程，该公路为双向两车道二级公路，设计速度 60km/h，现改造为双向四车道一级公路，设计速度 80km/h。主线全部采用沥青混凝土路面结构。项目位于亚热带季风气候区，夏季高温持续时间长，路面最高温度可达 65℃，全年重载货车通行占到 28%左右，交通荷载压力大。本次试验段选择在项目 K12+360-K12+520 段，即十字型平交口处，和两条乡村集散道交汇处。路段平曲线半径为 180m，属于小半径弯道，纵向坡度为 2.7%，横向超高坡度为 3.0%，属于典型的平交口弯坡叠加工况。根据项目前期勘察结果可知，本路段旧路面服役 3 年就出现了深度 15-35mm 的结构性车辙，远远超过规范允许的限值，必须依靠优化设计方案来解决病害问题。

3 复合工况车辙病害机理及影响因素分析

3.1 病害形成机理

沥青路面车辙根据形成原因可以分为压密型、流动型和结构型三类。常规平直路段以压密型车辙为主，病害只出现在路面表层。平交口弯坡叠加试验段内，车辆启停制动产生水平推力，弯道行驶产生离心力，坡道行驶产生纵向附加力，多重外力耦合作用下，沥青混合料内部骨料嵌挤结构容易出现错位破坏。高温环境下沥青胶结料粘性变小，抗变形能力下降，混合料受到反复荷载作用会发生塑性流动，从而引起结构车辙，病害一直持续到整个沥青面层，修补非常困难。

3.2 核心影响因素

(1) 外部荷载因素：平交口内车辆经常需要减速刹车，轮胎和路面之间水平剪切力比正常行驶路段高 2 到 3 倍。弯坡路段车辆重心偏移，单侧轮压增大，荷载分布不均。重载货车长时间低速滞留、反复碾压同一行车路线，使沥青混合料塑性累积变形加重，是车辙快速发展的直接原因。

(2) 环境温度因素：高温属于引发流动型车辙的重要环境因素。项目区域夏季连续三个月路面温度大于 55℃，沥青胶结料软化，混合料整体模量下降，骨料间粘结强度降低，不能抵抗复合外力带来的剪切变形。高温时段的复合工况路段车辙增长速率比低温季节高 4 倍以上。

(3) 路面设计因素：原设计方案直接使用主线平直路段通用结构，没有考虑到复合工况特殊受力要求。面层沥青材料标号不匹配，混合料级配太细，粗骨料比例小，不能形成稳定的骨架嵌挤结构。同时沥青面层单层厚度过大，结构整体抗剪切能力差，多种设计缺陷叠加在一起，造成病害频发。

4 抗车辙专项优化设计

根据试验段工况特点及病害成因,本次设计以结构分层强化、材料适配升级、级配骨架优化为原则,摒弃常规的通用化设计模式,从结构组合、原材料选择、混合料配比三个方面入手进行全方位优化,弱化施工工艺相关部分,突出设计参数优化。

4.1 路面结构组合设计优化

原设计路面沥青面层为统一三层式结构,上面层、中面层、下面层厚度分别为4cm、6cm、8cm。根据复合工况的受力特点,本次差异化调整面层结构,采用分层功能化的设计思想,上面层主要考虑耐磨和抗表层剪切,中面层是核心承载层,重点提高高温抗车辙能力,下面层改善应力传递性能。同时对比常规路段和优化后的复合工况路段结构方案,结构组合及参数见表1。

表1 结构组合及参数

结构层位置	常规平直路段设计方案	复合工况优化设计方案	设计功能调整说明
上面层	4cm 细粒式 SBS 改性沥青混凝土	3.5cm 骨架密实型 SMA-13 沥青混合料	提升表层嵌挤能力, 抵御水平剪切力
中面层	6cm 中粒式 普通改性沥青混凝土	7cm 抗车辙改性 AC-20 沥青混合料	加厚核心承载层, 强化高温抗变形性能
下面层	8cm 粗粒式 沥青混凝土	7cm 粗粒式 AC-25 沥青混凝土	微调厚度, 平衡整体结构应力分布
基层	36cm 水泥稳定碎石	36cm 水泥稳定碎石	保持不变, 依托刚性基层分散荷载
底基层	20cm 级配碎石	20cm 级配碎石	保持不变, 提升结构排水缓冲性能

结构优化的核心思想就是减小上面层的多余厚度,增大中面层的承载厚度,使整个沥青面层总厚度从原来的18cm调整为现在的17.5cm,既控制了建设成本,又集中加强了核心受力层的抗车辙能力,适应弯坡平交口多向受力的特点。

4.2 原材料选型设计

(1) 沥青胶结料: 根据高温气候和复合荷载的双重影响,上面层和中面层均采用高粘高弹 SBS 改性沥青,下面层采用普通 SBS 改性沥青。高粘改性沥青具有较高的软化点和粘度,在高温下弹性恢复性能好,能较好地抑制混合料的塑性流动。

经检测,所选改性沥青软化点不低于85℃,针入度为45-60(0.1mm),弹性恢复率为90%以上,各项指标均比普通改性沥青好,符合复合工况高温抗变形的要求。(2) 集料与矿粉: 粗集料为玄武岩碎石,硬度大、耐磨性好,集料压碎值不大于22%,针片状颗粒含量不大于12%,能形成高强度嵌挤骨架。细集料为洁净石灰岩机制砂,不得使用风化集料,保证集料界面粘结强度。矿粉选用干燥无结块的石灰岩矿粉,亲水系数控制在0.8以内,提高沥青和集料的粘附性,减小高温下沥青剥落造成的局部车辙病害。(3) 抗车辙添加剂: 为了提高中面层高温稳定性,在中面层 AC-20 混合料中掺入了专用的 HD-III 型抗车辙剂。根据相关的试验数据和工程经验来确定最佳掺加比例为沥青混合料总质量的0.6%。该添加剂可以形成三维网状结构在混合料中约束骨料的位移,提高混合料动稳定度,并不会对路面低温抗裂性能产生不良影响。

4.3 沥青混合料级配优化设计

为了克服复合工况下骨料滑移、塑性流动的现象,本次优化不再使用悬浮密实型级配,全部采用骨架密实型级配结构,增大粗骨料比例,优化空隙率和沥青用量,各层级混合料设计参数如下。

(1) 上面层 SMA-13 混合料: 上层 SMA-13 混合料以粗骨料嵌挤为主,粗集料占到75%到80%,细集料填充骨架空隙。按照马歇尔配合比设计,得到最佳沥青用量为6.2%,空隙率为4.0%到5.0%。该级配结构抗剪切性能好,可以抵抗车辆制动、转向产生的水平外力,避免表层推移型车辙。(2) 中面层 AC-20 抗车辙混合料: 中面层是抗车辙的核心层,加入0.6%抗车辙剂后进行配合比的调整。优化后的粗集料占68%,最佳沥青用量为5.4%,设计空隙率为3.5%~4.5%。骨架密实结构配合抗车辙添加剂,双重保证混合料高温稳定性,从根本上杜绝结构性车辙的出现。(3) 下面层 AC-25 混合料: 下面层主要起到应力传递和结构稳定的作用,采用改良型 AC-25 级配,粗集料占65%,最佳沥青用量为4.8%,空隙率为4.0%~5.5%,兼顾结构强度和排水性能,用于上层结构的竖向荷载分散。

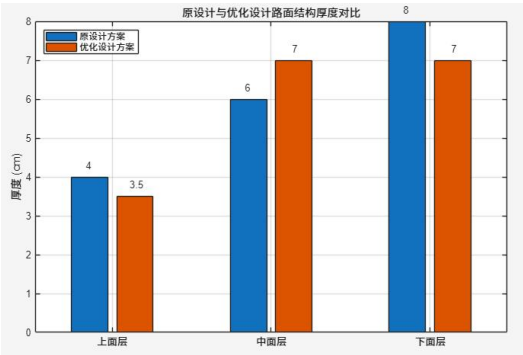


图1 结构厚度对比

5 性能试验与方案验算

5.1 室内高温车辙试验

为了检验优化方案的抗车辙性能,按照公路工程沥青混合料试验规程,对原设计混合料和优化后的混合料进行 60℃ 高温车辙试验,以动稳定度作为主要评价指标,动稳定度数值越大,表示混合料高温抗车辙性能越好,试验结果见下表。

表 2 试验结果

混合料类型	试验组别	动稳定度 (次/mm)	规范阈值 (次/mm)	性能提升幅度
上面层混合料	原设计细粒式改性沥青	1860	≥ 1600	—
上面层混合料	优化后 SMA-13	3520	≥ 1600	89.2%
中面层混合料	原设计普通 AC-20	2150	≥ 2000	—
中面层混合料	优化后抗车辙 AC-20	4890	≥ 2000	127.4%

从试验数据可知,优化后上下面层混合料动稳定度均远超规范标准和原设计,其中中面层抗车辙性能提高最明显,完全可以满足复合工况高温重载、多向受力的要求。

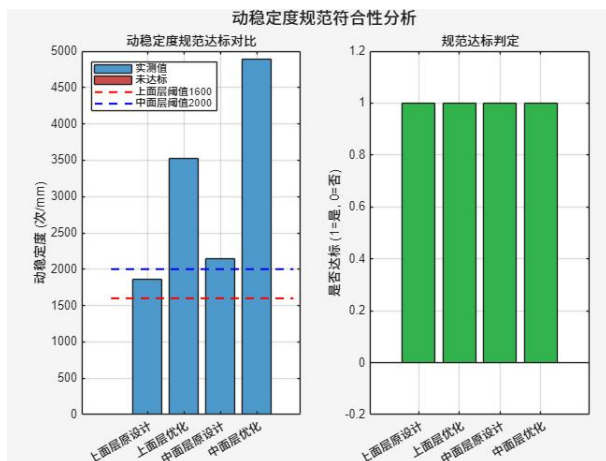


图 2 动稳定度符合性分析

5.2 路面力学验算

利用路面结构力学计算软件模拟夏季高温极限工况,对优化前后的试验段路面面层最大剪切应力、竖向压应力进行验算。荷载为标准轴载 BZZ-100,附加弯坡离心力和制动水平力,模拟平交口车辆制动转向状态。验算结果表明,原设计方案面层最大剪切应力为 0.42MPa,超出了混合料抗剪强度限值;优化后的方案面层最大剪切应力为 0.28MPa,竖向压应力为 1.15MPa,均小于对应层级的混合料强度限值,结构受力状态

安全可控。

6 差异化配套设计建议

6.1 风险分级依据与判定标准

平交口弯坡叠加工况下,路面剪切应力和车辆离心力、坡道阻力呈正相关关系,平曲线半径越小、纵坡坡度越大,路面综合受力条件越恶劣,车辙及衍生病害发育速度越快。根据干线公路设计规范和同类项目病害调查数据,剔除施工层面的干扰因素,只从线形设计、交通设计两个方面来确定分级阈值,将研究范围内的路段划分为低风险、中风险、高风险三个等级,分级判定标准如下表所示。

表 3 分级判定标准

风险等级	平曲线半径 R/m	纵向坡度 i/%	路段受力特征	病害预判等级
低风险	$R > 250$	$i < 2.0$	离心力与坡道阻力小,受力近似常规平直路段	轻微
中风险	$150 \leq R \leq 250$	$2.0 \leq i \leq 3.5$	复合外力明显,制动剪切力增大,易产生表层车辙	中度
高风险	$R < 150$	$i > 3.5$	多向外力耦合作用显著,易发育结构性深层车辙	重度

6.2 各等级路段专项抗车辙设计

(1) 低风险路段设计:该类路段线形条件好,弯坡组合引起的附加荷载影响小,车辆制动、转向造成的剪切应力在正常范围内,路面病害发育的概率低。设计上不需要对结构组合进行大的改动,以控制造价、简化设计为原则,基本采用主线标准路面结构,基层和底基层参数不变。

面层只做针对性的材料优化,将原主线中面层普通改性 AC-20 混合料更换为基础型抗车辙改性混合料,不加抗车辙添加剂,只优化级配提高粗骨料占比,提高核心承载层基础抗剪切能力。上面层和下面层混合料类型、结构厚度均与主线平直路段一致,可以满足长期通行的需求。

(2) 中风险路段设计:中风险路段是城郊二级公路平交口最常见的工况类型,小半径弯道和中等纵坡叠加,叠加平交口车辆启停制动的影响,表层剪切变形和中层塑性流动为主要病害类型,本文试验段就属于该风险等级。

路面结构采用功能化分层优化方案,重新分配各个沥青层厚度,减小上面层冗余厚度,加厚中面层承载结构。上层全部使用 SMA-13 骨架密实型混合料来抵抗表层水平剪切力,中面层加入 0.6%HD-III型抗车辙剂的改性 AC-20 混合料,从材料上提高高温稳定性,下面层微调厚度,改善整体应力传递效果。基层和底基层不作任何改动,依靠刚性基层分散竖向荷载,既保证了抗病害性能又保证了工程经济性。

(3) 高风险路段设计:高风险路段线形条件差,陡坡和小半径弯道双重限制,再加上平交口低速重载交通,三向受力特点明显,是车辙、拥包、路面滑移等病害高发区,常规优化方案不能满足使用要求。在中风险路段结构方案的基础上做双重升级,结构层不变各面层优化厚度,材料层再提升。上层使用高粘高弹专用改性沥青,提高沥青胶结料的弹性恢复能力,减弱高温软化造成的不良影响;中面层保持 0.6%抗车辙剂掺

量,改善级配空隙率,减少 0.5%最佳沥青用量;下面层用干燥级配混合料,削减沥青富集引发的层间滑移问题。除此之外,在沥青层之间增设高粘防水粘结层,提高层间整体性,防止分层错位造成的结构病害。

7 结语

公路平交口弯坡叠加工况下沥青路面车辙病害,是由外界复合荷载、高温环境、路面设计缺陷三者相互影响造成的,路面结构层次搭配不合理、混合料抗剪切性能差是造成病害高发的主要原因。本文以二级公路实体试验段为依托,从结构分层优化、高粘改性材料选择、骨架密实级配设计和抗车辙添加剂匹配四个方面入手,形成一套完整的复合工况抗车辙设计方案。室内试验和力学验算的结果表明,优化后的方案可以大大提高沥青面层的高温稳定性以及抗剪切能力,很好地解决了特殊路段结构车辙的问题。

参考文献:

- [1] 付可.城市道路沥青路面车辙病害成因及防治对策研究[J].城市建设,2026,(2):69-71.
- [2] 孙倩倩.沥青路面车辙成因剖析与抗车辙处理技术优化[J].科技创新与应用,2025,15(34):161-164.
- [3] 郭一凡.高速公路抗车辙沥青路面施工技术探讨[J].中国房地产业,2025,(32):190-193.
- [4] 夏梦华.沥青路面抗车辙性能评价与结构优化[J].交通世界,2025,(27):94-96.
- [5] 王世彬.基于抗车辙性能的沥青路面混合料优化设计[J].四川水泥,2025,(4):249-251.