

沥青路面结构组合设计优化与寿命分析

乔 彪

天津城建设计院有限公司 天津 300122

【摘 要】：沥青路面凭借行车舒适性佳、降噪性能好、养护便捷等优势，成为我国市政道路的主要路面形式。为提升沥青路面耐久性与服役年限，本文结合路面结构受力机理与长期性能演化规律，分析不同结构组合形式的优劣，梳理荷载、材料、结构厚度、环境等核心因素对路面寿命的影响机制。依托实际市政道路工程案例，通过多组结构方案对比优化，确定适配中重载交通、温变频繁区域的最优结构组合形式，结合力学计算与寿命预测模型验证优化效果。结果表明，优化后的复合结构能够有效均衡各结构层受力，降低疲劳损伤与永久变形累积速率，显著延长路面服役寿命，同时减少全生命周期养护成本，可为同类市政道路路面设计与改造提供技术参考。

【关键词】：沥青路面；结构组合；设计优化；力学特性；寿命分析

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.045

引言

伴随着我国市政道路交通路网的不断完善，道路交通流量和重载车辆所占比例越来越高，既有沥青路面长时间受到高负荷、反复性的车辆荷载作用以及温度、降水、冻融等自然环境的侵蚀，很容易产生车辙、裂缝、沉陷、水损害等各种病害。大多数传统的半刚性基层沥青路面服役期只有 8-10 年左右，达不到 15 年的设计寿命，不但会造成大量的路面病害，而且使道路的养护资金投入增加很多，市政道路通行效率也大大降低。按照长寿命路面的设计理念，改善沥青路面结构组合方式，探究各种结构寿命演变的规律，对提高市政道路工程建设质量，实现道路长期服役，节约工程全生命周期成本有着十分重要的工程意义和现实意义。

1 沥青路面常规结构组合及性能缺陷

1.1 半刚性基层沥青路面结构

该结构在国内应用最广，典型的组合是沥青面层加水泥稳定碎石、石灰粉煤灰稳定碎石等半刚性基层和底基层。半刚性基层具有强度高、刚度大、整体性好、造价低的优点，可以有效地分散车辆荷载，减小路基顶面的压应力，适合于中等交通荷载市政道路。但长期的工程实践表明，该结构存在着明显的性能缺陷。半刚性基层材料温缩、干缩性大，在温度变化和水分蒸发的作用下容易产生横向收缩裂缝，裂缝会向上反射到沥青面层，形成路面反射裂缝。

1.2 柔性基层复合沥青路面结构

柔性基层结构大多使用级配碎石、大粒径沥青碎石作为基层材料，配合改性沥青面层，整体柔韧性强、变形适应性好、抗疲劳性能好，可以很好地避免反射裂缝病害。该结构层间排水性能好，能迅速排出路面渗水，减少水损害问题，在重载、大温差地区适应性更好。柔性基层结构的最主要缺点就是整体刚度低，荷载扩散能力差，长期受重载影响容易出现较大的永久变形，路面车辙病害较明显，初期建设造价比半刚性基层高，

对它的大面积应用存在一定的制约。

2 沥青路面寿命核心影响因素

2.1 交通荷载因素

荷载过大、作用频繁或者频率过高都会促使路面结构损伤发生，荷载大小、作用次数以及荷载频率都会影响到路面疲劳损伤产生的快慢。标准轴载反复碾压会使沥青面层产生周期性拉压应变，长时间的作用下，混合料内部会产生微裂缝，并慢慢扩展贯通，形成疲劳开裂。重载、超载车辆会对结构层产生很大的应力应变，超过材料的承载能力，导致车辙、沉陷等永久性变形病害的发生，属于路面提前损坏的最主要的人为因素。同时交通量增长速率越快，路面累积损伤速度就越快，有效服役寿命就越短。

2.2 环境气候因素

温度、水分属于影响路面长期性能的两个主要环境因素。高温下沥青混合料软化、模量降低，抗剪切变形能力变差，容易产生高温车辙病害。低温环境下，沥青材料脆性增大，温缩应力增大，容易产生低温开裂，昼夜温差大的地区，温度反复交变会加剧面层的疲劳损伤。降水和冻融作用主要引起水损害病害，雨水渗透到路面结构内部，削弱沥青和集料的粘结性，冲刷基层结合料，冻融循环造成结构层体积胀缩、内部松散，使路面整体强度和稳定性不断下降。

2.3 结构组合与厚度配比

结构层次搭配、各个层次的厚度比，会直接影响到路面应力传递的规律以及变形协调的能力。面层厚度不够会造成表层拉应变过大，很快就会出现疲劳开裂，厚度过大则会加大路面自重，提高基层荷载压力。基层刚度与面层模量不匹配，容易造成层间应力集中，引起层间脱空、滑移。合理的结构组合要遵照逐层过渡的刚度准则，由面层向路基刚度逐渐增大，从而达到应力均衡扩散的目的，削减局部应力集中，改善结构整体耐久性。

3 路面结构组合优化方案设计

3.1 工程案例背景

根据某城市主干道市政道路改扩建工程实际情况可知,该路段为双向四车道城市主干道,位于温带季风气候区,全年温差大,冬夏温差明显,雨季降雨集中,短时强降雨多发。道路交通特性是城市里重载货运车辆、大型渣土运输车辆和高峰期密集车流,车辆启停、缓行多,荷载反复作用明显。原路面为传统的半刚性基层结构,9年过去了,大部分反射裂缝、深度车辙、路面不均匀沉陷、网裂等市政道路常见的病害已经普遍存在,部分路段还存在积水引起的面层剥落、松散等问题,通行安全性及舒适性大幅下降,道路整体服役性能严重衰减。

3.2 三组备选结构方案

方案一为传统的半刚性基层结构,符合老旧市政道路的常规设计形式,上面层4厘米 SMA-13 改性沥青混合料,中面层6厘米 AC-20 改性沥青混合料,下面层8厘米 AC-25 沥青混合料,基层20厘米水泥稳定碎石,底基层20厘米低剂量水泥稳定碎石。

方案二为柔性基层复合结构,主要提高路面的抗疲劳、抗开裂性能,上面层为4厘米 SMA-13 改性沥青混合料,中面层为8厘米 AC-20 高模量沥青混合料,基层为18厘米大粒径沥青碎石柔性基层,底基层为18厘米级配碎石。

方案三刚柔复合优化结构,结合市政道路重载、易积水、温差大的核心痛点进行优化设计,上面层为4厘米 SMA-13 改性沥青混合料,中面层为7厘米 AC-20 改性沥青混合料,下面层为10厘米高模量 AC-25 沥青混合料,上基层为18厘米大粒径沥青碎石,下基层为18厘米水泥稳定碎石,底基层为15厘米级配碎石。

3.3 方案力学性能对比

使用路面结构力学计算软件,模拟市政道路标准轴载、车辆反复启停碾压工况,对三种方案的面层底最大拉应变、基层底最大拉应力、路面顶面最大沉降量三项核心力学指标进行数值模拟分析,直观反映不同结构的受力合理性及抗变形能力,具体结果见表1。

表1 方案力学性能对比

结构方案	面层底最大拉应变 ($\mu\epsilon$)	基层底最大拉应力 (MPa)	路面顶面最大沉降量 (mm)
方案一	82.6	0.38	0.92
方案二	65.3	0.22	1.25
方案三	68.9	0.26	1.01

从表中的力学数据可知,方案一整体结构刚度较大,半刚性基层刚性集中、变形适应性差,基层拉应力、面层拉应变均

较高,在城市重载车辆反复碾压、昼夜温差交替作用下,结构疲劳损伤风险非常高,极易产生反射裂缝、疲劳开裂,与本项目现状病害成因高度契合。方案二整体柔性程度最高,面层与基层应力应变水平最低,抗疲劳开裂性能最好,但是结构整体刚度低,路面顶面沉降量大,在市政道路长期重载、慢速碾压工况下,永久变形风险大,容易产生持续性车辙病害,影响道路平整度和通行体验。方案三采用刚柔复合结构,结合半刚性结构高刚度、抗变形和柔性结构高韧性、抗疲劳的特点,应力应变水平远低于传统的市政路面结构,沉降变形控制效果比纯柔性结构好得多,整体受力均匀、变形协调,完全适应城市主干道复杂的受力和环境工况,结构最合理。

4 各方案路面寿命分析与对比

4.1 寿命预测方法

根据市政沥青路面疲劳寿命预测公式、城市道路永久变形控制规范标准,以本项目城市主干道交通增长率、重载车辆占比、区域温变规律、雨季降水特征、市政排水运行条件为依据,准确计算出三种结构方案的疲劳寿命和有效服役年限。以路面结构层疲劳损伤累积阈值、市政道路车辙深度控制限值为关键寿命判定指标,路面疲劳损伤累积达到临界值或者车辙深度超标、影响市政道路正常通行功能时,判定路面达到设计使用寿命。

4.2 寿命计算结果对比

根据项目城市交通参数、区域气候条件和市政道路运营特性,对三种结构方案进行全生命周期性能计算,并与各个方案的初期建设造价、年均养护维修成本进行比较,从服役性能、经济性、适用性等各方面综合评价,具体结果见表2。

表2 寿命计算结果对比

结构方案	疲劳寿命 (万次)	实际预估服役年限 (年)	初期造价 (元/ m^2)	年均养护成本 (元/ m^2)
方案一	1860	9.5	328	28.6
方案二	3520	16.2	456	12.3
方案三	3180	14.8	392	15.2

4.3 结果分析

传统半刚性结构方案的疲劳寿命最短,实际预估服役年限为9.5年,与本项目现状9年出现大面积病害的实际工况非常吻合。该方案初期建设造价最低,但是由于结构应力集中、基层温缩干缩裂缝多发,在城市温差大、降雨集中的环境下,病害扩散速度快,年均养护维修成本偏高,频繁的路面修补、返工严重影响城市道路交通通行,全生命周期综合效益极差。纯柔性基层方案二疲劳寿命最长、耐久性能最好、长期养护成本最低,但是初期造价较高,结构抗永久变形能力不足,在城市

重载车流长期作用下车辙累积变形风险大,后期容易出现路面平整度超标问题,适应性存在明显短板。

刚柔复合优化方案三的各项性能和经济指标都达到了最优,有效地克服了传统半刚性结构裂缝多发、纯柔性结构变形大的缺点。它的预估服役年限达到14.8年,远远大于传统的结构,比原来路面的使用寿命提高55%以上,完全符合市政主干道长寿命的设计要求。与单纯的柔性结构相比,早期建设造价大幅度降低,年均养护成本只多不少,性价比高。刚柔复合结构在城市重载、大温差、多雨积水等复杂工况下受力变形匹配,抗开裂、抗车辙、抗水损性能良好,耐久性、经济性、工程适用性均好,是本次市政道路改扩建工程的最佳结构方案。

5 工程应用优化技术措施

5.1 原材料性能优化管控

根据市政道路刚柔复合路面结构受力特点、城市环境工况和耐久性要求,有针对性地对各结构层的原材料选择和性能指标进行控制,从源头上防止路面早期病害的发生,保证结构长期稳定服役。面层全部使用高品质改性沥青混合料,大幅度提高路面高低温稳定性、抗滑耐磨性和抗水损能力,很好地适应了大温差气候、短时强降雨环境和城市车辆频繁启停的受力特点,抑制面层开裂、剥落、松散病害。下面层用高模量AC-25沥青混合料,提高路面整体结构刚度和抗永久变形能力,有效抵抗重载车辆反复碾压造成的残余变形累积,控制车辙病害的发展。

5.2 精细化施工工艺优化

路面结构层施工质量直接影响到层间协同受力性能和整体服役寿命,根据优化后的刚柔复合市政路面结构特点,重点对层间粘结处理、市政排水管网适配施工、分层压实工艺进行

精细化优化。层间施工严格按照标准化粘结处置工艺执行,均匀定量洒布粘层油,杜绝漏洒、堆积、粘结不均的问题,保证沥青面层与柔性基层、柔性基层与半刚性基层的整体性,防止城市道路高频荷载作用下层间脱空、滑移、错台病害的发生。

5.3 全周期预防性养护策略

为了充分发挥刚柔复合优化路面的长寿命优势,适应城市市政道路常态化通行保障的要求,抛弃传统的破损之后才进行维修的被动养护模式,创建起全生命周期常态化预防性养护体系。日常开展路面动态巡查工作,重点针对市政道路中普遍存在的裂缝、表层松散、少量渗水、轻微车辙等早期损坏现象加以观察,并针对小范围裂缝立刻实施灌缝、封缝措施,从而阻止这些病害继续扩大与蔓延,避免小病变成大病。对路段重载车流集中、病害多发的重点地段,加大结构性能检测的频率,定时开展路面结构整体强度、层间粘结完整程度、结构层完好状况等方面的检测工作,准确把握路面性能衰减的规律。

6 结论

本文通过对不同沥青路面结构组合性能缺陷及寿命影响机制的分析,结合实际工程多方案对比优化,对路面结构力学性能和全生命周期寿命进行分析。传统的半刚性基层沥青路面刚度较大、变形协调性差,反射裂缝和水损害病害较多,实际服役寿命比设计值低很多,不能适应中重载、大温差地区的长期服役要求。纯柔性基层路面抗疲劳性能好,无反射裂缝隐患,但是抗永久变形能力差,初期造价高。本次研究优化的刚柔复合路面结构适应中重载、温变频繁的区域市政道路工程,可以给同类路面设计、改扩建工程提供一定的借鉴。根据多年的路况监测数据,可以对结构厚度的配置以及材料参数做出相应的调整,进而提升长寿命沥青路面的设计水平。

参考文献:

- [1] 祝莉.提高市政道路沥青路面平整度的施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2026,(18):133-135.
- [2] 陈黎明.市政道路沥青路面高温稳定性控制方法研究[J].全面腐蚀控制,2026,40(6):133-135.
- [3] 肖鹏,徐发明,汤日旭.城市道路与交通工程中的道路沥青路面施工技术[J].城市建设理论研究(电子版),2026,(16):133-135.