

重载交通条件下普通公路路面结构优化与长寿命技术研究

马定文

云南省红河哈尼族彝族自治州弥勒市综合交通建设中心 云南弥勒 652399

摘要: 随着我国经济社会的持续发展,物流运输需求激增,重载交通现象日益普遍且呈现出常态化、普遍化的趋势。大量普通国省干线公路乃至重要县乡道,因其网络覆盖广、通行免费等特点,承担了远超原设计标准重载交通负荷,导致路面过早出现车辙、裂缝、疲劳破坏等严重病害,使用寿命大幅缩短,养护维修成本高昂。本文旨在系统分析重载交通对普通公路路面的破坏机理,深入探讨面向重载交通的路面结构组合优化设计方法,并系统研究从材料、设计、施工到养护的全寿命周期长寿命技术体系,以期提升普通公路在重载条件下的服役性能、延长其使用寿命、降低全生命周期成本提供理论依据和技术路径。

关键词: 重载交通;普通公路;路面结构优化;长寿命路面;全寿命周期

一、引言

随着交通量尤其是重载交通量的明显增加,与之相关的公路路面破坏形式得到广泛关注。公路路面破坏形式具体包括车辙、坑槽、裂缝等,对路面使用性能和安全造成显著影响。普通国省干线公路及重要县乡道,作为交通网络的基础组成部分,因其广泛的覆盖范围和通行免费的特点,需要承担远超其原设计标准重载交通负荷。这一现状导致路面过早出现车辙、裂缝、疲劳破坏等严重病害,不仅大幅缩短了路面使用寿命,还显著增加了养护维修成本,对公路交通的顺畅与安全构成了严峻挑战。面对重载交通带来的种种问题,传统路面结构设计理念与材料应用已难以满足当前及未来的交通需求。因此,系统分析重载交通对普通公路路面的破坏机理,深入探讨面向重载交通的路面结构组合优化设计方法,以及研究全寿命周期内的长寿命技术体系,成为提升普通公路服役性能、延长使用寿命、降低全生命周期成本的关键。本文旨在通过理论与实践相结合的方式,为普通公路在重载条件下的可持续发展提供科学依据和技术支持。

二、重载交通对普通公路路面的破坏机理与挑战

重载交通对路面的破坏主要体现在以下几个方面:

1. 高应力水平导致的疲劳损伤加剧:重载车辆在路面上产生更大的弯拉应力和剪应力。对于半刚性基层路面,过大的荷载会在基层底部产生超过其疲劳极限的弯拉应力,导致基层底部微裂缝的萌生和扩展,最终形成反射裂缝贯穿至面层。对于路基,过大的垂直应力会导致路基土累积塑性变

形,引发整体沉降。

2. 高剪应力引发的永久性变形(车辙):车辙是重载交通条件下最典型的病害之一。在车辆启动、制动和高温季节,路面结构层特别是沥青面层和中面层,会承受巨大的水平剪应力。当材料抗剪强度不足时,就会产生流动型车辙。此外,基层和路基的压密变形也会贡献一部分车辙。

3. 冲击与振动荷载的累积损伤:重载车辆在路面不平整处(如接缝、裂缝、坑槽)会产生巨大的动态冲击荷载,其峰值远大于静载。这种反复的冲击作用会加速路面材料的松散、剥落和裂缝的发展,是导致路面服务性能急剧下降的重要因素。

4. 对现有设计标准的挑战:我国现行的《公路沥青路面设计规范》(JTG D50)虽然引入了重载交通等级,但其设计指标、材料参数和结构组合更多是基于高速公路的实践经验。对于路况复杂、交通组成多变、养护资金受限的普通公路而言,直接套用往往导致“要么过度设计,要么不足设计”的两难局面。

三、面向重载交通的普通公路路面结构优化设计

结构优化是应对重载交通的核心。优化的目标是在全寿命经济性最优的前提下,寻求一种能够均衡分布荷载应力、抵抗疲劳和变形的稳健结构。

(一)设计理念的转变:从“强基薄面”到“应力吸收与扩散”并重

传统设计过于依赖半刚性基层的承载能力,但易导致

反射裂缝。针对重载交通,应转向“强化面层与基层、减缓反射裂缝、稳固路基”的综合设计理念。这一理念强调通过优化面层与基层的材料选择和结构设计,增强其抗裂性和稳定性,同时采取有效措施稳固路基,构建出更加耐久、可靠的路面结构体系。

1. 增强面层结构与功能:

增厚与优化沥青层:适当增加沥青面层总厚度(如从15cm增至18-22cm),特别是加强中面层的厚度和模量,因为中面层是承受最大剪应力的关键层位。增厚面层能更好地分散车辆荷载,降低各结构层应力水平,减少疲劳损伤。尤其加强中面层厚度和模量十分关键,作为承受最大剪应力的关键层位,中面层性能提升可有效抵抗水平剪应力,防止车辙等病害产生,增强路面整体抗变形能力,从而延长路面使用寿命,降低全生命周期养护成本。

功能化层位设计:上面层采用抗滑、耐磨、抗车辙的高性能沥青混合料(如SMA、高模量沥青混凝土),这类材料能够显著提升路面抗滑性能,保障行车安全,同时材料的耐磨特性能够减少轮胎摩擦造成的损害,抗车辙性能则可以抵御重载车辆反复作用引发的塑性变形,维持路面平整度;中面层采用高模量、抗疲劳的沥青混合料,高模量能够增强结构强度,更好地分散荷载应力,而抗疲劳性能则可以承受重载交通长期作用下的反复应力循环,缓解裂缝的产生,提高路面耐久性;下面层可采用兼顾抗裂和密水的密集配沥青混合料,抗裂性能可防止基层裂缝反射至面层,密水特性则能阻止水分下渗,保护基层和路基不受水损害。

2. 优化基层与材料选择:

柔性基层与组合式基层的应用:积极推广柔性基层(如级配碎石基层、沥青稳定碎石基层)。柔性基层能有效吸收和消减应力,从根本上避免反射裂缝。可采用“半刚性基层+厚沥青稳定碎石基层”的组合式基层,既保证整体刚度,又设置应力消减层。

刚性基层的适用性探讨:在石料丰富、重载极端严重的路段,可考虑采用贫混凝土(LCC)或碾压混凝土(RCC)刚性基层。其极高的模量能大幅降低路基顶面压应变,抗疲劳性能优异,但需处理好接缝和与沥青层的粘结。

3. 设置有效的功能层:

应力吸收层(SAMI):在半刚性基层与沥青下面层之间设置橡胶沥青应力吸收层、玻纤格栅等,能有效抑制反射

裂缝的向上扩展。

抗疲劳层:在基层底部或路基顶部设置一层高弹性、抗疲劳的特殊材料层(如沥青处治基层),可以显著提升结构的抗疲劳寿命。

强化垫层与路基:提高路基压实标准,必要时采用低剂量水泥/石灰稳定土等处理上路床,形成一个稳固的“平台”,防止因路基变形导致的结构性破坏,延长公路试验寿命,降低后期维护成本。

(二) 基于力学-经验法的精细化设计

摒弃单一的弯沉指标,转向以控制关键力学响应量为核心的力学-经验法(M-E PD)。设计时,应通过力学计算软件,模拟重载荷载作用,重点关注并控制以下指标:

沥青层底部的拉应变(ϵ_t):控制沥青层的自下而上的疲劳开裂。

路基顶面的垂直压应变(ϵ_z):控制路基永久变形和路面整体车辙。

面层内部的剪应力(τ):控制面层的流动型车辙。

通过反复调整各结构层厚度和材料参数,使这些关键响应量低于其材料的疲劳或变形破坏阈值,从而实现结构设计的精准化和科学化。

四、重载交通普通公路长寿命技术体系构建

长寿命路面并非指永不损坏,而是指主要结构层在设计使用期内(如30年以上)不发生严重的结构性破坏,仅需对表面功能层进行定期的预防性养护或铣刨重铺,从而实现全生命周期内成本最低。

(一) 高性能材料的研发与应用

1. 高模量沥青混凝土(EME):通过采用硬质沥青、低沥青用量和优化级配,获得高动态模量,能有效分散荷载,减少层底拉应变,是抗车辙和抗疲劳的理想材料,尤其适用于中下面层。

2. 抗车辙剂与高粘改性沥青:在表面层和中面层掺入高分子聚合物类、天然沥青类抗车辙剂,或使用高粘度改性沥青,可大幅提升混合料的高温稳定性和抗剪切变形能力。

3. 橡胶沥青技术:将废旧轮胎胶粉应用于沥青改性,制成的橡胶沥青混合料具有优异的抗反射裂缝、抗疲劳和降噪性能,非常适用于旧路加铺层和应力吸收层。

4. 纤维增强沥青混凝土:掺加聚酯纤维、木质素纤维等,可以改善沥青胶浆的性能,增加混合料的韧性和抗裂性能。

(二) 精细化与智能化的施工质量控制

1. 均匀性控制: 重载路面最忌讳结构层强度不均。必须严格控制混合料生产、运输、摊铺和碾压各个环节的均匀性, 避免产生薄弱点。

2. 压实度与层间粘结: 采用智能压实技术, 确保各结构层达到规定的压实度。同时, 高度重视层间粘结, 采用高性能粘层油, 确保荷载的有效传递, 防止层间滑移。

3. 全过程温度控制: 对沥青混合料从出料、运输到碾压实施全过程温度监控, 确保在合适的温度下完成压实, 形成高质量的路面实体。通过全过程温度监控, 可保证混合料在最佳温度区间完成压实, 形成密实、均匀且高质量的路面实体, 有效提升路面的耐久性和使用性能。

(三) 科学精准的预防性养护与修复技术

1. 建立基于路况性能预测的养护决策系统: 利用大数据和人工智能技术, 对路面使用性能(如车辙深度、国际平整度指数、裂缝率)进行长期监测和衰变预测, 科学制定养护规划。

2. 早期预防性养护技术: 在路面出现结构性损坏前, 及时采取微表处、超薄罩面、雾封层、裂缝密封等技术, 延缓路面性能衰变, 以较小的成本换取服务寿命的显著延长。

3. 高效修复技术: 当出现局部结构性损坏时, 采用冷/热再生、注浆加固、地聚合物灌浆等快速修复技术, 快速恢复路面性能, 避免病害扩大, 这些技术也符合绿色发展的要求。

(四) 长寿命路面结构体系的构建

综合以上技术, 可以构建几种典型的长寿命路面结构体系供普通公路选择:

1. 全厚式沥青路面(FFAP): 全部采用沥青材料, 通过增厚沥青层(总厚>28cm)并将受力控制点置于路基顶面, 实现长寿命。适用于路基条件好、石料匮乏的地区。

2. 厚沥青层组合式基层路面: “高性能沥青面层(18-22cm)+ 沥青稳定碎石基层(15-20cm)+ 半刚性底基层”。该结构兼具刚度和柔性, 抗疲劳和抗车辙性能俱佳, 是目前最有前景的长寿命结构之一。

3. 倒装结构路面: “沥青面层+ 级配碎石基层+ 沥青稳定碎石层+ 半刚性底基层”。其优点是将高模量层置于

下部承重, 柔性层在上部分散应力, 能有效防治反射裂缝和水损害。

五、结束语

随着重载交通压力的愈发严峻, 公路建设和养护需要实现从被动应对到主动设计的转变, 从短期修补向长寿命周期管理的发展。本文通过系统分析重载交通对普通公路路面的破坏机理, 提出了面向重载交通的路面结构优化设计策略, 包括设计理念的转变、结构层与材料的选择、功能层的设置以及基于力学-经验法的精细化设计等, 为构建稳定路面体系提供理论依据。同时, 重点强调材料创新在长寿命路面建设中的关键作用, 大力研发和推广高模量、高抗车辙、高抗疲劳的新型沥青混合料, 为路面结构的耐久性提供了物质保障。除此之外, 全寿命周期管理理念的引入, 要求在设计、施工、养护等各个环节中追求精益求精, 特别是树立“预防性养护”的理念, 通过早期、低成本的科学干预, 实现路面性能的显著提升和使用寿命的延长。未来发展阶段, 随着技术的进步和政策的支持, 普通公路在重载交通条件下的长寿命化目标更加可期, 需要持续完善相关技术标准, 为结构优化与长寿命技术的推广应用提供制度支持。

参考文献

- [1] JTG D50-2017, 公路沥青路面设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [2] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [3] 王宏畅, 黄晓明. 长寿命沥青路面研究现状与进展[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(1): 1-12.
- [4] Nunn, M. E. Long-life flexible roads. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport, 1998, 129(1): 4-11.
- [5] 冯德成, 易军艳. 重载交通条件下沥青路面结构力学响应分析及设计对策[J]. 中国公路学报, 2019, 32(10): 1-11.
- [6] 刘黎萍, 孙立军. 基于力学-经验法的沥青路面设计体系研究综述[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 485-492.

作者简介: 马定文(1976—), 男, 汉族, 云南弥勒人, 本科, 高级工程师(副高), 研究方向: 公路工程管理。