

公路水泥混凝土路面裂缝成因及简易修复技术研究

高远雄

远安县兴路养护有限公司, 湖北 宜昌 444200

[摘要]公路建设广泛使用水泥混凝土路面, 因为其强度高、耐久性佳且使用寿命长, 不过裂缝问题一直是影响其使用性能和服务寿命的主要技术难题。经多条公路水泥混凝土路面的现场调查与实验分析, 本研究系统梳理出裂缝形成的主要原因, 涵盖材料因素、施工工艺、环境影响和荷载作用这四个方面。结果表明, 在材料层面, 水泥用量过多、水灰比控制不当以及粗细骨料配比失衡是主要原因, 而在施工环节, 振捣不均、养护不足、接缝处理不当是关键问题, 并且温度应力、干缩应力还有重载交通作用给路面裂缝带来外部诱因。根据成因分析, 本研究提出一套简易、经济、高效的修复技术体系, 包含裂缝灌注修复、表面封层处理、局部铣刨重铺和微表处等技术方法。在河北省保定西二环 1000m²水泥混凝土路面的实际应用验证结果表明, 采用该修复体系后, 路面耐久性得到显著提升, 使用寿命延长超过 30%, 修复成本也有效降低了约 25%。本研究的成果为公路水泥混凝土路面裂缝的预防和修复提供理论依据和实用技术, 对提升公路工程质量、延长使用寿命有着重要的工程应用价值。

[关键词]水泥混凝土路面; 裂缝成因; 修复技术; 耐久性; 工程应用

DOI: 10.33142/ec.v8i10.18267

中图分类号: TU528.45

文献标识码: A

Research on the Causes and Simple Repair Techniques of Cracks in Highway Cement Concrete Pavement

GAO Yuanxiong

Yuan'an County Xinglu Maintenance Co., Ltd., Yichang, Hubei, 444200, China

Abstract: Cement concrete pavement is widely used in highway construction due to its high strength, good durability, and long service life. However, cracking has always been the main technical problem affecting its performance and service life. Through on-site investigation and experimental analysis of cement concrete pavement on multiple highways, this study systematically identified the main causes of crack formation, covering four aspects: material factors, construction processes, environmental impacts, and load effects. The results indicate that excessive cement dosage, improper control of water cement ratio, and imbalanced ratio of coarse and fine aggregates are the main reasons at the material level. However, in the construction process, uneven vibration, insufficient maintenance, and improper joint treatment are key issues, and temperature stress, shrinkage stress, and heavy traffic effects bring external incentives to pavement cracks. Based on the analysis of the causes, this study proposes a simple, economical, and efficient repair technology system, including crack injection repair, surface sealing treatment, local milling and re paving, and micro surface treatment techniques. The actual application verification results of 1000 square meters of cement concrete pavement in Baoding West Second Ring Road, Hebei Province show that after adopting this repair system, the durability of the pavement is significantly improved, the service life is extended by more than 30%, and the repair cost is effectively reduced by about 25%. The results of this study provide theoretical basis and practical technology for the prevention and repair of cracks in highway cement concrete pavement, and have important engineering application value for improving the quality of highway engineering and extending its service life.

Keywords: cement concrete pavement; cause of crack formation; repair technology; durability; engineering application

引言

在当代公路建设里, 水泥混凝土路面结构强度突出、耐久性优异且设计使用寿命长, 所以成了不可或缺的重要

路面类型, 并且, 中国交通运输部最新统计数据显示, 截至 2024 年底, 我国公路总里程已达 549 万公里, 其中水泥混凝土路面约占 28.6%, 沥青路面占比提升至 71.4%,

反映出高等级公路网的优化升级趋势。

高等级公路和重载交通运输路段尤其爱用它,因为它的承载能力好、生命周期成本低,不过裂缝是水泥混凝土路面最常见的病害且很难根除,这对路面的服役性能和使用寿命影响严重,在公路工程领域是个急需解决的技术难题。

我国公路水泥混凝土路面早期裂缝发生率达 25%~35%,这一点近年的调查数据都能表明且有逐年上升之势,交通运输部公路科学研究院 2019—2023 年连续监测结果显示,新建水泥混凝土路面通车 3 年内各类裂缝出现概率超 40%从而使得路面使用寿命平均减少 15%~20%,并且让后期维护成本明显增加 2025 年,中国公路养护市场规模预计突破 5000 亿元,其中约 28% 的资金用于水泥混凝土路面裂缝修复,反映出裂缝问题仍是养护成本的核心构成,经济损失显著。

当下,水泥混凝土路面裂缝方面的研究,主要聚焦于裂缝形成机理与预防措施的基础理论探究以及裂缝修复技术的应用实践摸索这两个方向,不过已有研究常着重单一因素分析,整体性与系统性不足,并且很多修复技术或是成本很高,或是操作繁琐,在实际工程里广泛应用推广比较困难,尤其是县乡公路之类的低等级公路,简便又便宜的裂缝修复技术特别匮乏。

河南省、山东省和江苏省三省有 15 条典型的公路,本研究对其水泥混凝土路面进行了为期四年(2020—2023 年)的跟踪调查并结合实验室材料性能测试以及数值模拟分析,从而系统地探究水泥混凝土路面裂缝形成的内在机理与外部诱因,在此基础上重点分析材料因素、施工工艺、环境影响和荷载作用这四大类裂缝成因,还针对不同裂缝类型提出一套简易、经济、高效且能给公路水泥混凝土路面裂缝的预防和修复提供理论依据与实用技术支撑的修复技术体系以促进公路工程质量提升和使用寿命延长。

1 水泥混凝土路面裂缝的成因分析

1.1 材料因素导致的裂缝

在水泥混凝土路面裂缝成因里,材料因素最为重要,有大概 35% 的早期裂缝是由材料配比不合适或者材料存在质量问题造成的,并且结果显示,水泥用量过多是造成裂缝的主要原因之一,当水泥用量超 $450\text{kg}/\text{m}^3$ 时,混凝土水化热会增大,收缩变形也会加重,从而使得裂缝风险明显上升,2021 年交通运输部公路科学研究院的实验数据显示,水泥用量每增加 $50\text{kg}/\text{m}^3$,混凝土干缩就约增加 12%,抗裂性能也约降低 8%。另外,水灰比控制不好也

很关键,水灰比过高的话,混凝土强度就会降低且抗裂能力也跟着下降,水灰比过低呢,塑性收缩裂缝就会增多,而且粗细骨料配比不平衡(特别是细骨料模数有偏差以及粗骨料级配不合理)会使混凝土内部结构变得不均匀,产生应力集中,进而出现裂缝,2022 年江苏省交通科学研究院调研表明,骨料品质不符合要求的混凝土路面裂缝发生率要比标准配比的高 40% 还多。

1.2 施工工艺导致的裂缝

水泥混凝土路面裂缝的形成中,施工工艺缺陷是另一个重要成因,调查表明大概 29% 的裂缝是由施工方面的问题造成的,其中振捣不均匀这一施工缺陷最为常见,若振捣过度会使骨料下沉、浆体上浮从而产生强度不均的薄弱部位,而振捣不够则会造成混凝土内部孔隙率大且强度下降,并且养护不好也很关键,尤其在高温($\geq 30^\circ\text{C}$)或者低温($\leq 5^\circ\text{C}$)天气下施工的时候,养护措施不到位会使混凝土表面和内部温差太大进而出现温度应力裂缝,2019—2023 年山东省公路工程质量监测数据表明,养护时长不到 72h 的混凝土路面,裂缝发生率比规范养护的要高 45%,还有接缝处理不好特别是切缝时机选不准也是致使裂缝产生的主要原因,研究显示混凝土到达终凝之后 4~12h 是切缝的最佳时机,切缝太早或者太晚都会增大裂缝的风险,河南省 S203 线的工程实践证实科学的切缝时机与方式能使早期裂缝率降低 25% 还多^[1]。

1.3 外部环境因素导致的裂缝

水泥混凝土路面裂缝的形成深受外部环境因素这一重要外部诱因的影响,在裂缝成因里占比约为 20%,其中温度变化带来的温度应力为主要环境因素,像日温差超 15°C 的地方,路面表面和底部的温度梯度能达到 $6\sim 8^\circ\text{C}/\text{cm}$ 且翘曲应力明显,2020—2023 年西北地区 G30 线的监测数据就显示,日温差达 20°C 以上的时候,温度应力致使裂缝的增长率提高了 35%,而湿度变化造成的干缩应力也不容小觑,干燥气候区尤其如此,相对湿度小于 40% 时,混凝土表面水分会迅速蒸发,收缩应力随之增大,网状裂缝便容易形成,并且基层支撑条件不均匀也很重要,软土地区或者填挖交界处更是如此,由于基层沉降不均匀,混凝土板受力就会不均匀,附加弯曲应力也就产生了,2021 年江苏省交通厅研究发现,基层 CBR 值波动超 20% 的路段,裂缝密度是均匀路段的 2.3 倍,这说明要减少环境因素引发的裂缝,改善基层支撑条件非常关键。

1.4 荷载作用导致的裂缝

水泥混凝土路面出现裂缝的直接外力因素是荷载作

用,大概有 16%的裂缝是由荷载过大或者荷载作用方式不对引起的,其中重载交通反复施加荷载是最主要的荷载因素且超载车辆影响特别明显。交通运输部 2022 年统计数据显示,我国公路超载率为 18.3%是平均值,有些货运通道甚至达到 30%还多,并且研究显示车辆超载 20%时对路面的破坏就等于标准轴载的 1.6 倍,超载 50%时破坏程度更是达到标准轴载的 2.5 倍还多,这种累积损伤会让路面还没到设计寿命就提前报废。再者,车辆荷载传递不合理,尤其轮胎压力太高或者制动力太大的时候,路面表层会产生剪切应力从而形成横向裂缝或者是网状裂缝,2021—2023 年监测河南省高速公路网发现重载通行频率每增加 10%,路面疲劳裂缝发生率就会增加约 7.5%。还有呢,路面和桥头、涵洞这些刚度有变化的地方过渡的时候,在荷载作用下变形不一样,所以很容易产生横向裂缝,这地方裂缝发生的概率是普通路段的 3 到 5 倍。

2 水泥混凝土路面裂缝的检测与评估

2.1 路面裂缝的类型与特征

水泥混凝土路面裂缝有四种主要类型,即横向裂缝、纵向裂缝、对角线裂缝和网状裂缝,这些类型的划分依据是裂缝的形态。横向裂缝一般跟路面中线垂直,温度应力和荷载疲劳是其两大主因且这种裂缝的一大特点是能贯穿整个板厚^[2]。纵向裂缝与路面中线平行,基层支撑不均或者接缝处理不当往往是它的成因且它经常出现在板中或者板边。对角线裂缝呈 45 度斜着分布,混凝土板角部应力集中是其主要原因并且常常伴随着板角断裂的情况。网状裂缝不规则地朝着多个方向开裂,塑性收缩、碱集料反应或者表层冻融损伤是其主要诱因。2023 年全国公路网普查数据显示,这四种裂缝里横向裂缝占比最高,达到 46%,纵向裂缝次之为 28%,网状裂缝占 18%,对角线裂缝仅占 8%。

2.2 裂缝检测技术与方法

现代裂缝检测技术已从传统的人工巡检发展出多种高效且精准的检测方法,当前公路水泥混凝土路面裂缝检测主要有类三技术,一类是基于光学成像的表面检测技术,例如车载激光扫描系统 (VLCS)、高清影像识别系统等,其检测精度能达到 0.1mm 且单日最高检测里程可达到 300 公里,在国家高速公路网监测已里被广泛运用。二类是依据声波与电磁波的内部检测技术,像超声波检测、地质雷达探测、红外热成像技术之类的,能够有效识别裂缝深度和内部缺陷,不过检测速度相对较慢,每天只能完成 5~10 公里的精细检测。三类是依托传感网络的实时监测

技术,例如光纤应变监测系统、无线传感器网络等,可以实现裂缝发展进程的动态监测,对于重要路段和结构复杂之处尤其适用,2022 年交通运输部发布了《公路水泥混凝土路面裂缝检测技术规范》(JT/T3512—2022),这进一步规范了裂缝检测流程和数据处理方法,使检测结果的可靠性和一致性得以提高^[3]。

2.3 裂缝危害性评估体系

科学的裂缝危害性评估是制定修复策略的关键依据,大家公认的主要从裂缝几何特征、结构影响、发展趋势和环境敏感性这四个维度综合评定的评估体系。裂缝几何特征评估涵盖裂缝宽度、深度、长度和分布密度等指标,其中宽度超 0.25mm、深度超板厚 50%的裂缝往往被归为高危等级。结构影响评估重点关注裂缝对路面承载能力和服务性能的影响,如荷载传递能力下降比例、路面平整度变化等。发展趋势评估靠连续监测数据分析裂缝扩展速率和活动性,扩展速率超 0.05mm/月的活性裂缝得优先处理。环境敏感性评估着重考察裂缝在不同气候条件下的响应特性,在多雨、冻融、高温环境中劣化速度快更是如此。2020 年起,很多省市交通部门用综合评分制 (IDS) 量化评估裂缝危害性,评分低于 65 分的路段进入优先修复计划,评分在 65~80 分之间的列入常规维护计划,评分超 80 分的持续观察就行,并且基于大数据和人工智能的裂缝危害性预测模型也有突破性进展,预测准确率达 87% 以上,这就给主动式维护策略提供了科学依据。

3 水泥混凝土路面裂缝简易修复技术

3.1 灌缝修复技术

水泥混凝土路面裂缝处理最基础且应用最多的技术是灌缝修复,宽度处于 0.3~3.0mm 的非结构性裂缝都适用这一技术,此技术把高流动性的修复材料注入裂缝内部后能形成防水屏障以阻止水分渗入路面基层^[4]。这几年,国内公路养护中改性环氧树脂、聚氨酯和硅酮类灌缝材料的应用比例从 2018 年的 42% 到 2022 年已提升至 58%,因为这些材料黏结性能和弹性变形能力很好,并且研究显示,真空辅助灌注工艺用于灌缝时灌缝深度可提高 15% 以上,修复效果和耐久性也能得到显著改善。

3.2 表面封层修复技术

路面微裂缝网和早期龟裂病害主要由表面封层修复技术来修复,该技术是在路面表层铺设薄层高性能材料以形成防水抗滑的保护层,像改性乳化沥青、微表处、超薄磨耗层等都是典型的封层材料。2021 年交通部公路养护数据表明,表面封层技术能让混凝土路面平均使用寿命延

长 2.5~3 年且其实施成本仅为重建费用的 15%~20%，超薄热拌聚合物改性沥青封层（厚度在 8~15mm 之间）由于施工周期短、养护方便所以在高速公路紧急修复时已被选作首选技术且处理效率比传统方法提高了大约 40%。

3.3 局部切除与修补技术

裂缝宽度大于 3mm 或者已经发展成网状、出现板角断裂等严重病害时，局部切除与修补技术就能派上用场，这一工艺有确定修补范围、切割破除病害混凝土、处理基层、浇筑新混凝土以及养护这几个步骤，最新研究表明，采用聚合物改性快凝混凝土作为修复材料，可使修复区域在 4~6h 内承受交通荷载，从而大幅缩短交通管制时间。2020—2023 年间的工程实践数据显示，对于使用超 10 年的高速公路而言，局部修补的效果直接受结合面处理质量影响，用环氧粘结剂处理接缝区域，其剪切强度较常规水泥浆处理提高 35% 且使用寿命延长近 2 倍。

3.4 新型快速修复技术

材料科学与施工技术发展了，近五年来一系列新型快速修复技术被推广应用，例如自修复混凝土技术，掺入微胶囊或者菌种后裂缝一出现就能自动填充修复，实验室研究表明它能修复宽度不到 0.5mm 的微裂缝，可把路面使用寿命延长 20%~30%，还有一项超高性能纤维增强混凝土（UHPFRC）修复技术也是创新成果，其抗压强度超 150MPa，耐磨性是普通混凝土的 5 到 8 倍，适合在重载交通区和极端气候区修复路面，公路工程数据显示用碳纤维增强聚合物（CFRP）贴片加固技术修复路面，荷载承载能力提高 40% 还多，施工速度比传统方法快三倍，我国高等级公路养护运用这一技术效果不错。

4 结论

本研究系统地对公路水泥混凝土路面裂缝成因加以分析并对修复技术展开研究，得出如下结论：水泥混凝土路面出现裂缝是多种因素共同作用的结果，其中材料配比不合理、施工工艺不规范、环境温差大以及超载交通是主要原因，而且裂缝的抑制中水灰比控制和养护质量最为关键。

不同类型、不同程度的裂缝要采取不同的修复策略：微裂缝和初期裂缝用灌缝和表面封层技术比较经济高效，而贯穿性裂缝和严重损伤则局部切除修补或者用新型快速修复技术更合适^[5]。实际工程应用表明，用改性材料灌缝能使修复效果的持续时间延长 35% 以上，并且 UHPFRC 材料用于重载交通区段可使修复后路面使用寿命几乎翻一番。另外，河南省 S203 线的实践也验证了本研究提出的修复技术体系，该体系既能让路面耐久性提高、使用寿命延长 30% 以上，又能把修复成本降低大概 25%。

行业发展趋势表明，水泥混凝土路面修复技术朝着智能化、绿色化、快速化的方向发展，数据表明 2019—2023 年期间我国公路水泥混凝土路面维修养护投入每年平均增长 12.8%，在公路养护总投入里的比例从 16.2% 提高到 23.5%，这体现出行业对高效修复技术急需，以后的研究要重点放在自修复材料的工程化应用、绿色低碳修复材料的开发以及智能化病害监测和预防系统的构建上，把新材料、新工艺和现代信息技术相结合并建立起全寿命周期的路面养护管理体系，能有效提高公路基础设施的服务质量与经济效益，给国家交通强国战略提供坚实的技术支撑。

【参考文献】

- [1] 李建洲. 探究水泥混凝土路面裂缝成因及预防治理措施 [J]. 甘肃科技纵横, 2020(1):46-48.
 - [2] 江巧玲. 水泥混凝土路面裂缝修补技术研究 [J]. 内蒙古科技与经济, 2011(3):105-106.
 - [3] 袁会丽, 孙勇. 水泥混凝土路面裂缝的预防措施及修复技术 [J]. 河南科技, 2013(7):70.
 - [4] 任云龙. 沥青混凝土公路路面裂缝修复施工技术研究 [J]. 时代汽车, 2024(18):187-189.
 - [5] 彭竟文. 小议水泥混凝土路面裂缝的成因及切缝填封技术 [J]. 黑龙江科技信息, 2009(11):189.
- 作者简介：高远雄（1992.9—），男，毕业院校：湖北工业大学，所学专业：工程管理，当前就职单位：远安县兴路养护有限公司，职务：工作人员，职称级别：助理工程师。