

水泥混凝土路面接缝失效机理与快速修复技术研究

王延超 郭利杰

郑州市路通公路建设有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 本文系统分析了水泥混凝土路面接缝的类型及其功能,深入探讨了接缝失效的主要形式(包括接缝传荷能力下降、填缝料失效、板边角破损、唧泥与错台等)及其内在机理,重点从材料性能退化、荷载反复作用、水损害及温度应力等方面揭示了失效过程的演化路径。在此基础上,全面梳理并评述了当前主流的快速修复技术,包括高性能聚合物改性水泥基材料、快硬硫铝酸盐水泥基材料、环氧树脂类材料以及预制装配式修复技术等,对比分析了各类技术的适用条件、施工工艺、性能优势与局限性。最后,提出了基于全生命周期理念的接缝预防性养护策略与智能化修复发展方向,旨在为提升水泥混凝土路面服役性能、延长使用寿命提供理论支撑与技术参考。

关键词: 水泥混凝土路面; 接缝失效; 快速修复; 聚合物改性; 预制装配

引言

水泥混凝土路面(CCP)作为刚性路面代表,因承载强、稳定性高、寿命长、养护费低等优势,在我国高速公路、国省干线及机场跑道建设中地位重要。但受混凝土脆性和热胀冷缩特性限制,需设接缝释放应力、适应变形、控制裂缝,这些接缝是人为设置的“薄弱带”。长期服役中,接缝区域力学环境复杂,车辆荷载产生巨大应力,侵蚀性介质易渗入引发病害,加上填缝材料老化等因素,接缝易成病害源头。接缝失效会降低路面平整度,引发跳车等问题,降低行车舒适性与安全性,还会加速相邻面板损坏,缩短路面寿命。传统修复方法周期长、干扰交通。所以,深入研究接缝失效机理,发展高效修复技术,对保障路网畅通、提升基础设施韧性意义重大、需求迫切。

1 水泥混凝土路面接缝类型与功能

1.1 接缝类型

水泥混凝土路面接缝根据功能和设置目的,主要分为三类:(1)横向缩缝:最常见、数量最多。目的是在混凝土硬化收缩应力超抗拉强度前,人为引导开裂,将裂缝控制在预定位置,避免面板出现不规则裂缝。通常采用假缝形式,在面板上部1/4至1/3厚度处切缝,下部靠混凝土咬合作用传荷,常设传力杆增强传荷能力。(2)胀缝:设于桥梁、涵洞等附近及长路段按一定间距(通常100~200米)处。功能是为面板高温膨胀提供伸长空间,防止面板拱起、碎裂。是真缝,贯穿面板,缝宽2~3厘米,内设滑动传力杆和填缝板。(3)纵向施工缝:一次摊铺宽度小于车道宽度时,两次摊铺间形成的接缝。通常设拉杆,防止板块横向分离,维持纵缝紧密性。

1.2 接缝核心功能

尽管类型不同,但所有接缝都承担着两个核心功能:一是应力释放:允许面板在温度变化和湿度变化下自由伸缩,避免产生过大的内应力。二是荷载传递:确保车辆荷载能够有效地从一块面板传递到相邻面板,减小接缝处的弯沉差,从而保护板边角免受过大的应力集中。传荷能力(LTE)是衡量接缝性能的关键指标。

2 接缝失效的主要形式与机理

2.1 接缝传荷能力下降

传荷能力下降是接缝失效最核心的问题。其机理主要包括:(1)传力杆失效:传力杆可能发生偏斜、松动、锈蚀甚至断裂。锈蚀会削弱其有效截面积并破坏与混凝土的粘结;偏斜则会使其无法有效传递剪力^[1]。(2)集料嵌锁作用丧失:对于未设传力杆的假缝,面板间的荷载传递主要依赖于断裂面粗糙骨料的相互嵌锁。在反复荷载作用下,骨料可能被压碎、磨平,导致嵌锁作用减弱。(3)板底脱空:由于唧泥或基层材料流失,接缝下方的支撑变得不均匀,即使传力杆完好,荷载也无法有效传递。

2.2 填缝料失效

填缝料是防止水和杂物侵入的第一道防线。其失效形式主要有:(1)老化与脆化:长期暴露在紫外线、氧气、臭氧及高低温循环下,有机类填缝料(如聚氨酯、硅酮)会发生分子链断裂,失去弹性,变硬变脆。(2)粘结失效:填缝料与混凝土缝壁之间的粘结力因界面污染、施工不当或材料本身粘结性差而丧失,形成渗水通道。(3)挤出与流失:在高温下,部分填缝料会软化并被车轮挤出缝外;在低温下,则可能因收缩而与缝壁脱开。砂石等杂物也可能嵌入缝中,阻碍填缝料正常伸缩。

2.3 板边角破损

这是最直观的接缝病害。当传荷能力不足时,车轮

荷载作用在接缝一侧的板角处会产生巨大的弯拉应力。混凝土作为一种抗拉强度远低于抗压强度的脆性材料,在反复应力作用下,板角极易发生开裂、剥落甚至碎裂。

2.4 唧泥与错台

这是由水损害引发的连锁反应。失效的填缝料使雨水得以渗入面板下方。在车辆荷载的泵吸作用下,面板产生微小的上下振动,将面板下的细颗粒土(尤其是粉土、粘土)与水混合成泥浆,从接缝或裂缝处挤出,此即“唧泥”现象。唧泥导致面板下基层材料不断流失,形成脱空。脱空区域的面板在荷载下产生更大的挠曲变形,进而加剧唧泥,最终导致两块相邻面板在接缝处出现高程差,即“错台”。错台反过来又会加剧车辆冲击荷载,形成恶性循环。

2.5 失效机理的综合演化

上述各种失效形式并非孤立存在,而是相互促进、共同演化的。一个典型的失效链条如下:填缝料老化失效→雨水侵入→唧泥→基层材料流失/软化→板底脱空→传荷能力下降→板边角应力集中→板角破损→错台加剧→行车舒适性恶化→路面结构加速破坏。理解这一完整的失效链条,是制定有效修复与预防策略的基础。

3 水泥混凝土路面接缝快速修复技术

3.1 高性能聚合物改性水泥基材料

高性能聚合物改性水泥基材料(PMCM)是通过在普通水泥砂浆或混凝土中掺入聚合物乳液(如丁苯胶乳、丙烯酸酯乳液)或可再分散乳胶粉而制得的一类复合材料。聚合物在水泥水化过程中形成连续的三维网络结构,填充于水泥水化产物之间,显著改善了材料的微观结构与宏观性能。这类材料不仅大幅提高了早期和后期强度,还显著增强了韧性与抗冲击能力,使其在承受交通荷载时不易开裂^[2]。更重要的是,聚合物的引入极大地提升了新旧混凝土之间的粘结强度,有效防止修复层与原结构界面剥离。同时,其致密的微观结构显著降低了渗透性,提高了抗冻融循环和耐化学腐蚀的能力。因此,PMCM广泛应用于接缝区域的局部修补、板角修复以及作为高性能填缝料的基体。尽管其成本高于普通水泥基材料,且部分有机聚合物在极端气候条件下可能存在长期老化风险,但其综合性能优势使其成为当前工程实践中应用最广泛的快速修复方案之一。

3.2 快硬硫铝酸盐水泥基材料

快硬硫铝酸盐水泥(R-SAC)是一种以无水硫铝酸钙和硅酸二钙为主要矿物成分的特种水泥,其水化产物以钙矾石为主,能够在数小时内迅速获得高强度。该材料的最大优势在于其超早强特性——通常在2至4小时内抗

压强度即可达到20MPa以上,满足快速开放交通的需求。此外,R-SAC在水化过程中表现出微膨胀性,能够有效补偿材料自身的收缩,提高修复体的密实度和与旧混凝土的界面结合质量。其优异的抗渗性和抗冻性也使其在寒冷潮湿地区具有良好的适用性,且对钢筋无锈蚀作用。正因如此,R-SAC特别适用于对交通中断时间要求极为苛刻的紧急抢修工程,如机场跑道、高速公路收费站或城市主干道夜间维修。然而,该材料也存在一定局限性,例如后期强度增长缓慢甚至可能出现轻微倒缩,且其碱度较低,与普通硅酸盐水泥混凝土在长期相容性方面需谨慎评估,施工时对外加剂的选择也较为敏感。

3.3 环氧树脂类材料

环氧树脂类材料以其卓越的力学性能和粘结性能在结构性修复领域占据重要地位。双组分环氧树脂在室温下混合后迅速固化,形成高强度、高模量的刚性体,其与混凝土的粘结强度往往超过混凝土自身的抗拉强度。这种材料的固化速度快,可在30分钟至数小时内达到使用强度,且固化过程中体积收缩率极低,确保修复部位尺寸稳定。此外,环氧树脂具有优异的耐化学腐蚀性和耐水性,适用于恶劣环境下的修复作业。在接缝修复中,环氧树脂主要用于锚固松动或偏斜的传力杆、灌注深层裂缝、粘贴碳纤维布加固板角等关键部位,也可作为高性能填缝料使用^[3]。然而,其高昂的成本、相对较差的韧性(易脆裂)、对施工温湿度的敏感性以及与潮湿基面粘结性能不佳等问题,限制了其在大面积修复中的应用。同时,其颜色与原混凝土差异较大,也影响了修复后的外观协调性。

3.4 预制装配式修复技术

预制装配式修复技术代表了一种颠覆性的修复思路,即将在工厂标准化预制的高强混凝土或纤维增强复合材料(FRP)构件,运至现场后快速安装,替换已损坏的接缝区域。该技术的核心优势在于修复速度极快,理论上可实现“即装即走”,对交通流的干扰降至最低;同时,工厂化生产确保了构件的高质量与一致性,避免了现场浇筑受环境因素影响带来的质量波动。此外,模块化设计便于库存管理和快速响应,适用于突发性病害的应急处置。目前,该技术尚处于研究探索和小范围试点阶段,主要挑战在于如何实现新旧结构之间的可靠连接与防水密封。现场需要高精度的切割设备和安装工艺,以确保预制件与既有面板的几何匹配;而连接节点的设计则需兼顾力学传递、变形协调与长期耐久性。尽管初期投资成本较高,但从全寿命周期角度看,其在减少交通延误、提升修复质量方面的潜力巨大,被视为未来快速修复技

术的重要发展方向。

3.5 技术选型与综合评价

表1: 综合评价对比

修复技术	开放交通时间	核心优势	主要局限	适用场景
PMCM	4-24小时	综合性能好, 粘结强, 耐久性优	成本较高	常规接缝修复、板角修补
R-SAC	2-6小时	超早强, 微膨胀	后期强度、相容性	紧急抢修、机场跑道
环氧树脂	0.5-4小时	粘结力极强, 固化快	成本高, 脆性大	结构性加固、传力杆锚固
预制装配	< 1小时	速度最快, 质量稳定	成本高, 技术复杂	特殊路段、未来发展方向

在实际工程中, 往往需要根据病害的具体情况、交通管制要求、预算限制等因素, 选择单一技术或多种技术组合应用。例如, 先用环氧树脂锚固传力杆, 再用PMCM进行整体浇筑修复。

4 预防性养护与未来展望

4.1 基于全寿命周期的预防性养护

“治未病”优于“治已病”。对接缝实施基于全寿命周期理念的预防性养护, 是从源头上延缓失效、降低全寿命成本的有效途径。具体措施包括: 建立常态化的接缝巡检机制, 及时清除缝内砂石、泥土等杂物, 保持接缝的自由伸缩功能; 在填缝料完全失效前(通常每3至5年), 进行预防性更换, 这是最具成本效益的养护手段之一; 同时, 可采用性能更优的新型填缝材料(如自流平硅酮、聚脲等), 提升接缝的防水密封能力和耐久性^[4]。通过将养护关口前移, 不仅能有效阻断“填缝失效—水侵入—唧泥—脱空—传荷下降”的病害链, 还能大幅减少后期结构性修复的频率与成本, 实现经济效益与社会效益的双赢。

4.2 智能化与新材料发展方向

一方面, 智能材料的研发为接缝健康监测提供了新可能。例如, 在修复材料中嵌入光纤光栅传感器或压电元件, 可实时感知接缝区域的应力、应变、温度及损伤状态, 实现病害的早期预警与精准诊断。另一方面, 自修复材料的概念正在从实验室走向工程应用, 通过微胶囊包裹修复剂或利用微生物诱导碳酸钙沉淀等机制, 使接缝微裂缝具备自主愈合能力, 从而延长结构寿命。此

外, 纳米改性技术(如掺入纳米SiO₂、纳米TiO₂)可进一步提升修复材料的力学性能、抗渗性及功能性(如光催化降解污染物)。在“双碳”目标背景下, 开发以粉煤灰、矿渣等工业固废为主要原料的低碳快硬胶凝材料, 也成为重要研究方向, 旨在降低修复过程的碳足迹, 推动交通基础设施的绿色可持续发展。

5 结语

水泥混凝土路面接缝失效是材料老化、荷载反复、水损害及温度应力等多因素耦合所致, 核心是传荷能力丧失, 引发填缝料失效等连锁病害。快速修复技术, 如高性能聚合物改性水泥基材料等, 在工程中效果良好, 能缩短交通中断时间、恢复路面功能。但修复是被动应对, 根本策略是树立全寿命周期管理理念, 通过科学设计、严格施工控制和常态化预防养护, 延缓接缝失效。展望未来, 智能感知、自修复等前沿技术融合, 将使水泥混凝土路面接缝实现长效、智能、绿色维护, 为现代化交通基础设施体系提供坚实支撑。

参考文献

- [1]周玉翠.公路水泥混凝土路面接缝施工技术要点[J].青海交通科技,2024,36(04):123-127.
- [2]项万霞.公路水泥混凝土路面接缝破坏的原因与防治[J].居业,2021,(01):106-107.
- [3]周正峰,罗君豪,康玉峰.水泥路面接缝传力杆周围混凝土损伤塑性分析[J].交通运输工程学报,2022,22(04):117-127.
- [4]吕昊文.水泥混凝土路面横向接缝处基层冲刷特性研究[D].重庆交通大学,2020.