

道路桥梁裂缝成因分析与维修加固技术研究

陈君海

广州市花都区道路养护中心 广东 广州 510000

摘要:道路桥梁裂缝是影响结构安全与服役寿命的核心病害,为精准处置桥梁裂缝病害,本文系统划分桥梁裂缝的形态、深度及部位类型,剖析结构性与非结构性裂缝的发育特征及危害。从荷载作用、环境侵蚀、施工材料缺陷、运维管理缺失四大维度,全面拆解裂缝滋生及扩展的核心成因。针对性梳理表面封闭、注浆修补等常规维修技术,以及碳纤维粘贴、增大截面等加固工艺,结合实际工程验证组合加固技术的应用效果,可为道路桥梁病害处置、养护提质提供参考。

关键词:道路桥梁;裂缝成因;维修加固技术

引言:道路桥梁是交通路网的核心基础设施,长期服役中受荷载、环境、施工养护等多重因素影响,极易出现各类裂缝病害。裂缝不仅破坏桥梁结构完整性,诱发钢筋锈蚀、混凝土剥落等次生病害,还会降低结构承载力,影响行车通行安全,缩短桥梁服役年限。当前桥梁裂缝病害频发、处置不规范问题突出,为提升桥梁运维质量,本文深入探究裂缝病害成因,梳理适配不同工况的维修加固技术,助力提升桥梁结构稳定性与耐久性。

1 道路桥梁裂缝类型及危害分析

1.1 道路桥梁裂缝常见分类

(1)按裂缝形态分类:主要包括横向裂缝、纵向裂缝、网状裂缝、斜向裂缝及不规则裂缝等。横向裂缝多垂直于道路中线,纵向裂缝则与道路走向平行,网状裂缝呈现龟裂状,斜向裂缝与道路中线呈一定夹角,不规则裂缝则分布零散无特定规律。不同形态裂缝的分布位置与发育特征存在明显差异,是判断裂缝成因的重要依据。(2)按裂缝深度分类:分为表面裂缝、浅层裂缝、深层裂缝与贯穿裂缝。表面裂缝仅存在于结构表层,浅层裂缝延伸至保护层范围,深层裂缝已深入结构内部,贯穿裂缝则完全穿透构件截面。裂缝深度直接决定桥梁结构的受损程度及修复难度,深度越大,对结构耐久性和安全性的威胁越严重^[1]。(3)按病害部位分类:涵盖桥面铺装裂缝、主梁裂缝、墩台裂缝、支座周边裂缝等桥梁核心部位裂缝病害。不同部位裂缝对桥梁结构的影响各异,其中主梁与墩台裂缝对结构安全威胁最为直接,需重点关注。

1.2 不同类型裂缝的发育特征

(1)结构性裂缝特征:由桥梁结构受力失衡引发,

通常表现为荷载裂缝与变形裂缝。此类裂缝发展速度快、延伸范围广,具有持续性扩张特点,往往沿主筋方向或应力集中区域延伸,直接破坏结构承载力,是桥梁安全评估的关键指标。(2)非结构性裂缝特征:多由温度变化、材料收缩、不均匀沉降、施工工艺不当等外部因素导致。裂缝形态零散、发展缓慢,初期对结构承载力影响较小,主要表现为影响结构耐久性和外观质量。但长期放任会加剧水分渗入和有害物质侵蚀,诱发钢筋锈蚀、混凝土碳化等次生病害,最终转化为结构性损伤。

1.3 裂缝病害对道路桥梁的危害

(1)破坏结构完整性:裂缝会破坏桥梁混凝土、铺装层的整体结构,降低结构密实度与整体性。裂缝通道为水分子和氯离子等侵蚀介质提供侵入路径,引发渗水、剥落、钢筋锈蚀等次生病害,形成“裂缝—渗水—锈蚀—加剧开裂”的恶性循环,加速结构劣化进程^[2]。(2)降低桥梁承载能力:结构性裂缝会改变桥梁受力体系,导致局部应力集中,使设计荷载传递路径受阻。随着裂缝持续扩展,构件有效截面面积不断减小,大幅降低桥梁荷载承受能力,缩短桥梁服役年限,严重时需进行限载或封闭处理。(3)影响交通通行安全:裂缝会造成桥面平整度下降,引发车辆颠簸、跳车等问题,降低行车舒适性。同时,裂缝引发的桥面铺装层破碎、松散等病害,在雨雪天气下易造成车辆打滑失控。严重时还会诱发桥梁坍塌事故,威胁通行安全,造成重大人员伤亡和财产损失。

2 道路桥梁裂缝主要成因分析

2.1 荷载作用成因

(1) 恒载作用: 桥梁自身结构自重、桥面铺装及附属设施自重、预应力施加等长期恒定荷载, 会使结构产生持续累积的压应力、拉应力或弯曲应力。当设计阶段对恒载估算不足, 或施工阶段实际恒载超出设计预期时, 结构内部累积应力将逐步超出混凝土抗拉强度耐受范围, 从而在应力集中区域引发裂缝。此外, 混凝土徐变与收缩效应在恒载长期作用下亦会加剧裂缝发育进程。(2) 活载作用: 车辆超载、重载车辆反复碾压、车辆制动与启动产生的冲击荷载、风荷载及地震荷载等动态可变荷载, 是诱发桥面铺装层及主梁结构性裂缝的核心诱因。超限车辆通行会产生远超设计荷载等级的瞬时峰值应力, 反复作用下导致结构疲劳损伤累积, 最终形成疲劳裂缝。尤其是重载交通密集路段, 车辆冲击荷载对桥面与主梁连接部位的破坏效应尤为显著。

2.2 环境因素成因

(1) 温湿度变化: 昼夜温差、四季温差引发的混凝土热胀冷缩效应, 以及空气相对湿度交替变化导致的干湿胀缩变形, 会使桥梁结构内部产生显著的温差应力与收缩应力。当温度梯度产生的拉应力超过混凝土极限抗拉强度时, 即形成温度裂缝。此类裂缝在桥面铺装层和主梁外侧腹板位置尤为常见, 且随着季节更替呈现周期性张合特征。(2) 自然侵蚀: 雨水渗透、紫外线老化、酸碱介质腐蚀、冻融循环等自然环境因素的长期作用, 会持续破坏混凝土表面保护层和内部微观结构。冻融循环过程中孔隙水反复冻胀产生的内应力, 以及酸性介质对水泥水化产物的溶蚀分解, 会显著降低混凝土的力学性能和耐久性, 加速既有裂缝的进一步扩展, 并在薄弱部位萌生新的微裂缝^[3]。

2.3 施工与材料成因

(1) 施工工艺缺陷: 混凝土浇筑过程中振捣不密实导致蜂窝麻面、养护不到位造成早期失水干缩开裂、施工缝与冷缝处理不当形成界面弱面、钢筋保护层厚度不足或布设位置偏差导致受力不均、模板拆除过早引发结构扰动等施工环节中的质量问题, 均会在结构内部遗留初始缺陷。这些隐性缺陷在运营荷载与环境因素耦合作用下, 极易发展为可见裂缝。(2) 材料性能不足: 混凝土配合比设计不合理(如灰水比过大)、水泥标号选用不当、骨料含泥量超标或级配不良、外加剂与水泥适应性差等原材料问题, 会直接导致混凝土实体强度、抗渗性及抗裂性能低于设计要求。同时, 预应力筋或普通钢筋锈蚀、加固用碳纤维布或粘钢胶老化失效等材料退化现象, 亦会削弱结构受力性能, 使其在正常荷载下即产生裂缝。

2.4 运维管理成因

(1) 日常监测不到位: 缺乏常态化、系统化的裂缝监测与巡查机制, 未能对桥面、主梁、墩台等关键部位实施周期性检查, 导致微小裂缝、隐蔽裂缝无法被及时发现和记录。加之检测手段落后、数据管理混乱, 许多本可在初期通过简易修补控制的裂缝被长期忽视, 最终在荷载与环境协同作用下逐步扩展为严重结构性病害。(2) 运维养护不规范: 预防性养护意识薄弱, 养护周期安排不合理, 裂缝修补材料选用不当或修补工艺操作不规范, 导致修补效果不佳、反复开裂。病害处置不及时、维修加固方案缺乏针对性等问题, 使已出现的裂缝得不到有效控制, 持续扩展加剧结构损伤, 形成“重建设、轻养护”的恶性循环, 大幅缩短桥梁安全使用寿命。

3 道路桥梁裂缝维修加固技术及应用

3.1 桥梁裂缝常规维修技术

(1) 表面封闭法: 适用于宽度小于 0.15mm 的表面浅层细微裂缝及非受力龟裂, 通过涂刷环氧胶泥、聚氨酯防水涂料、水泥基渗透结晶型防水材料等高性能封闭材料, 在裂缝表面形成连续致密、粘结牢固的防护涂膜, 有效封堵裂缝通道, 阻止大气降水、氯离子及腐蚀性介质侵入结构内部, 从根本上规避钢筋锈蚀、混凝土中性化等次生病害。该法施工快捷、成本可控, 但仅适用于裂缝宽度微小、深度较浅的工况, 对受力裂缝无效。(2) 注浆修补法: 针对宽度 0.15mm 以上、深度较大的深层裂缝及贯穿裂缝, 采用低压或高压注浆工艺, 沿裂缝走向合理布设注浆嘴, 将环氧树脂注浆液、水泥基超细注浆料或化学浆液在设定压力条件下注入裂缝空隙, 浆液固化后与原结构紧密结合, 有效填充空隙、恢复结构断面整体性。施工中需严格控制注浆压力、浆液黏度与固化时间, 注浆后须进行取芯检测以验证注浆饱满度, 确保修补质量可靠^[4]。(3) 嵌缝修补法: 对宽度大于 3mm 的稳定型较宽裂缝, 采用切割开槽工艺沿裂缝方向形成规则 V 形或矩形槽体, 利用高压空气或清水冲洗彻底清除槽内碎屑、粉尘及松散附着物, 充分干燥后填充聚硫密封胶、硅酮密封胶或改性沥青基密封材料, 依靠密封材料的高弹性、低模量及优异耐老化性能适应温度胀缩变形, 实现裂缝柔性修复, 主要适用于桥面铺装层及浅层结构裂缝处理。

3.2 桥梁结构加固核心技术

(1) 粘贴碳纤维布加固技术: 利用碳纤维布抗拉强度高、弹性模量优良、耐腐蚀、轻质高强且施工适应性强等技术优势, 采用配套环氧树脂浸渍胶将其紧密粘

贴于桥梁构件受拉区或抗剪薄弱部位表面,使碳纤维布与原结构协同受力、变形协调,显著提升结构抗弯、抗剪及抗疲劳性能,有效抑制裂缝持续扩展,主要适用于主梁底面、腹板及预制梁板等构件加固。施工中必须确保基面平整坚实、浸渍胶滚压密实无气泡。(2)外包钢板加固技术:通过在桥梁构件受拉区或受压区外侧粘贴、锚固一定厚度钢板,采用环氧结构胶粘接配合膨胀螺栓、化学锚栓或后置埋件机械锚固,使钢板与原构件形成叠合截面协同受力,有效增强结构承载力与抗弯刚度,抑制裂缝扩张与变形发展,适配承载力不足的老旧桥梁主梁、墩柱及节点区域的补强加固^[5]。(3)增大截面加固技术:通过凿毛处理原构件表面、植筋连接、绑扎新增钢筋网后浇筑高性能补偿收缩混凝土,有效增大构件截面尺寸、降低截面应力水平、提升结构整体强度与稳定性,显著改善结构受力性能。该方法施工工艺成熟、加固效果可靠、耐久性好,适用于墩台、主梁等核心承重构件严重裂缝病害及承载力大幅退化工况,但需严格把控新旧混凝土界面结合质量。

3.3 不同病害工况下技术方案优选

(1)细微浅层裂缝:优先选用表面封闭法,该方案兼具经济性与实用性,可快速完成病害表层封闭处置,有效防止水分渗入引发冻融剥落和钢筋锈蚀等次生劣化,适用于宽度小于 0.15mm 的非受力龟裂和表面收缩裂缝。(2)深层及贯穿结构性裂缝:采用注浆修补法恢复截面整体性后,再结合粘贴碳纤维布加固工艺补强受拉区承载能力,两种技术优势互补、形成组合加固体系,实现裂缝修复与结构性能强化双重目标,适用于主梁腹板斜裂缝、底板横向贯穿裂缝等典型结构性裂缝病害。(3)严重破损、承载力不足裂缝病害:选用增大截面加固或外包钢板加固技术,此类方法可从结构层面根本性地提升桥梁承载力与整体刚度,适用于墩台大面积碎裂、主梁严重下挠且裂缝密集分布等危及结构整体安全的严重病害工况,实施前须经专项结构计算与精细化设计。

3.4 工程应用效果验证

(1)工程概况:选取某服役 12 年的预应力混凝土连续箱梁桥作为验证对象,桥梁全长 360m,跨径组合为 (45+60+45)m。检测发现主梁底板存在多条横向贯穿

裂缝,最大缝宽 0.48mm,腹板斜裂缝延伸长度达 1.5m,实测结构承载力较设计值下降约 16%,评定为 D 级桥梁,桥面平整度标准差达 4.2mm,严重影响行车安全,亟需实施加固处治。(2)方案实施:针对底板横向贯穿裂缝,采用低压注浆法灌注环氧树脂浆液填充密实;注浆完成后,沿底板受拉区通长粘贴两层碳纤维布(宽度 300mm、间距 400mm),腹板斜裂缝区域外包 4mm 厚 Q345 钢板并辅以化学锚栓锚固,锚栓纵横向间距均按 250mm 布置,同时修复桥面铺装层以恢复平整度,全流程实施工序质量检验与隐蔽工程验收。(3)效果检测:加固后经静动载试验验证,跨中最大挠度较加固前降低约 24%,裂缝监测期内(6 个月)无新增或扩展迹象,结构承载力恢复至设计值的 97% 以上,桥面平整度标准差降至 2.1mm。各项指标均满足规范要求,有效验证了裂缝注浆+碳纤维布粘贴+外包钢板组合加固技术在实际工程中的可行性与良好应用效果。

结束语

本文系统分析了道路桥梁各类裂缝的特征、危害与形成机理,明确了不同成因对桥梁结构的影响差异,梳理了适配各类病害的维修及加固技术。结合工程实例验证,证实差异化技术组合可有效修复裂缝、恢复桥梁承载性能。研究表明,桥梁裂缝治理需秉持“预防为主、精准施策”原则,结合病害工况优选技术方案,同时强化日常监测与规范化养护,从源头控制裂缝病害,保障桥梁长期安全稳定运行。

参考文献

- [1] 朱浩然,魏国访,樊继文.基于离散元的沥青路面反射裂缝发展规律研究[J].中国公路学报,2025,38(06):183-195.
- [2] 王蔚丞,黄香健,黎娅.大跨连续刚构桥梁腹板施工裂缝成因分析研究[J].混凝土,2024,22(03):188-192.
- [3] 张军,刘扬.服役公路桥梁混凝土裂缝演化机理与加固效果研究[J].中外公路,2023,43(04):165-170.
- [4] 李智,陈立万.温度应力作用下道路桥梁裂缝病害机理及防治技术[J].铁道建筑,2022,62(08):56-60.
- [5] 李政霖.市政道路桥梁病害成因分析及高效维修加固技术探讨[J].交通科技与管理,2025,6(19):108-110.