

市政道路桥梁结构病害与加固施工分析

刘少波¹, 王 颖¹, 王玉醒², 何宝凯³

(1. 河北钧达建设工程有限公司, 河北 保定 073100;

2. 河北吉兵建筑工程有限公司, 河北 石家庄 050035;

3. 中元恒泰建设发展有限公司建筑设计分公司, 河北 石家庄 050031)

摘 要 市政道路桥梁作为交通系统的关键基础设施, 其结构安全与运行稳定性日益受到人们的重视。桥梁在长期服役中受交通荷载、环境侵蚀及设计施工等因素影响, 会逐渐暴露出疲劳裂缝、钢筋锈蚀、混凝土碳化等多类结构病害, 严重威胁交通安全与使用寿命。为提升桥梁耐久性 & 运营可靠性, 亟需开展病害识别与系统加固研究。本文针对桥梁常见病害类型, 分析其诱发机制并提出针对性加固技术措施, 以期为市政桥梁养护提供技术参考。

关键词 市政桥梁; 结构病害; 病害识别; 加固施工

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.013

0 引言

在现代城市交通体系中, 桥梁不仅承担着连接道路、跨越障碍的功能, 更直接影响着交通运输的效率与社会运行的稳定性。随着交通流量激增和环境条件复杂化, 桥梁结构面临的服役压力不断加剧, 频发的病害现象已成为当前市政管理中的重点难题。为应对这一挑战, 交通运输部于 2024 年发布了《公路路政管理技术标准》(JTG 4110—2024), 自 2024 年 11 月 1 日起施行, 旨在规范公路工程的管理与维护, 提升桥梁结构的安全性与耐久性。该标准的实施标志着我国在桥梁养护和加固方面迈出了重要一步, 为城市桥梁基础设施的运行质量提供了有力保障。

1 市政道路桥梁结构养护应遵循的基本原则

市政道路桥梁结构养护与加固应以结构体系的整体安全性和耐久性提升为核心目标, 在遵循既有设计荷载标准与《公路桥涵养护规范》(JTG 5120—2021) 等行业规范基础上, 合理运用基于性能的结构加固理论, 实现从被动修复向主动预防的技术转型^[1]。加固方案应综合考虑桥梁结构刚度、延性、整体协同受力性能, 确保应力重分布过程中不引发局部应力集中或疲劳累积问题, 尤其在连续梁桥、悬臂结构等复杂体系中, 应对构造节点连接区实施有限元精细化建模与残余寿命评估^[2]。加固材料需优选模量匹配性高、粘结性能优良、耐久性强的复合材料体系, 如碳纤维布、聚合物砂浆、预应力碳板等, 以提升加固界面的有效性与协同工作性能。施工过程中应通过 BIM 技术集成施工流程、结构监测与运维数据, 实现全过程数字化

管控, 减少交通干扰并提高加固精度^[3]。养护体系建设应强化结构健康监测 (SHM) 与疲劳损伤识别算法的融合应用, 通过多源信息集成与实时数据反馈机制, 建立闭环式管控路径, 提升市政桥梁结构加固工作的科学性、系统性与可持续性。

2 桥梁结构病害产生的原因分析

2.1 交通荷载不断增长导致结构疲劳积累

随着城市交通需求激增和重型车辆频繁通行, 桥梁结构承受的实际荷载远超原设计标准, 尤其在主梁、桥面铺装与支座区域形成持续高频应力循环, 导致钢筋与混凝土疲劳损伤不断积累。在反复荷载作用下, 结构材料内部微裂纹萌生扩展, 最终演变为贯通裂缝, 严重削弱截面承载能力并造成构件刚度退化。同时, 频繁制动带来的冲击载荷对桥头跳车段、伸缩缝和剪力连接构件产生动态扰动, 易引发连接松动与节点开裂, 破坏结构整体受力路径。部分老旧桥梁因设计荷载等级较低, 其安全储备已无法适应当前复杂交通环境, 持续疲劳作用下构造细部出现裂纹扩展、混凝土保护层剥落、锚固区局部压碎等问题, 逐步演化为制约桥梁服役寿命的核心病害形式^[4]。

2.2 环境腐蚀条件恶化引起材料性能衰退

在开放环境长期服役过程中, 桥梁结构构件频繁受到多种腐蚀介质的耦合作用, 包括氯盐侵蚀、碳化作用、硫酸盐反应与冻融循环等, 严重削弱钢筋与混凝土的物理与化学性能。氯离子通过混凝土毛细孔道渗入内部, 引发钢筋点蚀与横截面积减小, 进而引起混凝土开裂与剥落, 破坏原有粘结力及协同受力机制。

碳化反应降低混凝土碱性环境,使钢筋失去保护膜加速锈蚀,结构承载力逐步降低。冻融破坏导致毛细孔压力骤增,引起混凝土碎裂与表层剥蚀。环境温湿度变化进一步加剧构件热胀冷缩不均,诱发变形集中与结构开裂。长期腐蚀不仅降低材料强度与刚度,而且破坏结构整体性,形成不可逆性能衰退过程^[5]。

2.3 设计参数偏差过大引起结构早期损伤

部分桥梁设计建造年代久远,所依据的荷载等级、交通工况与材料标准已与当前实际运行条件严重脱节,造成设计冗余不足与抗力储备匮乏。设计时对恒载与活载组合效应估算偏差,未能充分考虑多工况耦合下的受力极限,致使结构局部过应力运行,产生塑性变形甚至早期裂缝。结构构造细节设计不合理,如翼缘板开口位置设置不当、腹板厚度分布不均、纵横向联系构件刚度匹配失衡等问题,均易导致应力集中与应变不协调^[6]。部分简支梁桥未预留足够温度伸缩缝,热胀冷缩过程诱发接头部位开裂及支座位移异常。受力路径不连续与冗余度不足导致结构缺乏损伤后适应性,局部损坏易转化为系统性安全隐患,加速结构性能劣化进程^[7]。

2.4 施工工艺质量控制不到位诱发隐性缺陷

桥梁结构施工阶段的质量控制薄弱常埋下服役期结构病害的隐患,其中混凝土施工质量与钢筋施工工艺对结构安全性与耐久性影响尤为显著。混凝土浇筑时若振捣不密实,易形成蜂窝麻面、孔洞空腔,削弱构件抗剪与抗压能力,并为腐蚀介质提供侵入通道;养护期间若未控制温湿度条件,水化反应不足会导致早期强度不足与后期干缩开裂。钢筋布设未按图纸执行或保护层厚度偏差,会导致锈蚀发展加剧与粘结失效,进而诱发裂缝扩展与构件失稳。桥面铺装与防水层施工不到位易引发渗水及构造层间脱粘,削弱桥面结构整体性。施工中质量检测频次不足、数据反馈不及时,使缺陷未能在初期得到修复,逐步演变为深层次病害,影响结构长期服役性能与安全储备^[8]。

3 桥梁结构病害加固施工的分类对症处理策略

3.1 交通荷载频繁施压,应力重构缓解疲劳

桥梁在长期超限交通荷载及重复荷载作用下,关键构件的应力状态持续恶化,易发生疲劳裂缝与性能退化。为减轻疲劳累积效应、延缓损伤扩展进程,应通过结构应力重分布技术优化桥梁受力体系,使关键部位的应力集中区域实现卸载。外部预应力加固是应用最广泛的方式,通过设置外部钢绞线或碳纤维预应力板,在构件表面施加附加应力场,形成逆向应力抵

消原有拉应力峰值,显著降低疲劳裂纹扩展速率,并提高构件极限承载能力^[9]。

钢板粘贴加固通过环氧树脂将钢板与结构表面形成有效复合体,提高受拉区抗拉刚度,有效延缓疲劳开裂。碳纤维布(CFRP)包覆技术利用高强度、高延性的复合材料,增强构件表面抗拉能力和变形协调能力,同时改善裂缝控制能力与整体抗疲劳性能。上述加固方法应结合结构健康监测系统,进行应力响应实时监测,并采用应变计、振动传感器等设备评估重分布效果,确保结构整体性能优化。此外,重分布加固应考虑受力路径连续性与构造细部约束,避免局部刚度突变引起新的应力集中区域^[10]。在加固设计中引入疲劳寿命评估模型与非线性有限元分析方法,可实现精细化模拟与优化,从而制定出符合结构使用现状与服役需求的加固策略,实现结构延寿目标。

3.2 腐蚀介质持续侵蚀,封闭体系阻断路径

桥梁结构暴露在自然环境中,长期受到氯盐、湿热、酸性气体等腐蚀介质侵袭,导致钢筋锈蚀、混凝土碳化及截面退化。为有效阻断腐蚀因子渗透路径并提升材料防护性能,需采用防护材料综合封闭工艺对桥梁结构表层和潜在腐蚀区域进行系统加固与处理。防腐涂层技术通过在混凝土表面施加环氧涂料、聚氨酯涂膜或有机硅类憎水剂,形成致密保护膜,显著降低水分与氯离子的渗透速率^[11]。

阴极保护系统可通过外加电流方式或牺牲阳极设置,实现钢筋电位的负移位,抑制阳极反应,从而有效延缓腐蚀过程,尤其适用于湿度大、氯盐浓度高的滨海与盐冻地区。电化学脱盐与再碱化技术利用外部电场驱动腐蚀介质迁移,从混凝土中导出氯离子并恢复其碱性保护环境,适用于轻中度锈蚀状态的混凝土构件。在材料回补环节,应选用抗渗性优良、抗硫酸盐侵蚀能力强的高性能混凝土或聚合物水泥砂浆,配合钢筋除锈剂与防腐涂层,增强修补部位的耐久性与力学协同性能。结构表层修复完成后应配置复合防水层与排水引流系统,以降低表面滞水时间与孔隙水压,形成多层次、多手段联动的防护屏障体系。该类工艺技术具有广泛适应性和可操作性,能实现结构表观与功能的双重恢复,有效延缓桥梁因环境腐蚀导致的耐久性退化。

3.3 设计标准滞后落后,构造增强功能升级

由于部分桥梁设计阶段未能充分预判当前及未来交通发展态势或设计方法过于简化,导致桥梁构造受力体系存在先天性薄弱环节。在面临荷载升级与运行环境复杂化背景下,亟需通过构造补强与功能升级方式提升结构适应性与服役性能。构造补强手段包括增

设临时或永久性支撑系统,以改善主梁受力分布、增强抗弯刚度及剪切性能^[12]。

例如:增设纵向托架、横向支撑梁或施加钢拱支架,可实现受力路径重构,减小主构件应变水平。针对结构连接区域,如铰接段、支座区和节点区,应通过钢构件加焊、螺栓连接加固或构造焊接板优化连接性能,提高节点的强度储备与传力连续性。在桥面系统方面,可通过拓宽桥面、增设边缘梁或更换轻质高强桥面铺装材料,以实现桥梁横断面功能升级与流量承载能力提升。在几何形态调整方面,针对竖向净空不足或边跨偏短的桥型结构,可局部改造构造轮廓线或优化线形,降低不均匀沉降与受力突变风险。在设计功能升级的过程中,必须充分考虑并结合现有的结构承载力评估结果,以及详尽的交通流量预测数据。为了确保升级方案的科学性和全面性,应引入先进的多目标优化方法,系统地统筹和平衡结构性能的提升、交通功能的优化以及经济上的可行性。通过这种综合性的分析和优化,制定出最为合理和高效的加固改造路径。这样不仅能有效恢复结构的安全性,还能实现功能适应性的显著提升,从而确保整个升级项目在满足当前需求的同时,具备长远的可持续发展潜力。

3.4 施工质量控制薄弱,局部拆除恢复性能

施工缺陷在桥梁服役早期往往表现为隐性损伤,随着使用年限延长,这类缺陷逐步发展为构件开裂、连接松动、保护层脱落等显性病害。为彻底消除施工过程中遗留的结构弱点并恢复桥梁的原有性能,应采用局部拆除与重构结合的修复策略,以结构完整性与力学连续性为核心,通过工程化措施精准恢复损伤部位的受力与功能特性。

对存在蜂窝麻面、空鼓剥落或截面收缩的混凝土构件,应采用机械切割方式将损伤区域清除至健康界面,随后采用超高性能混凝土(UHPC)或聚合物修复砂浆进行填补与成型,确保修复区域具备高粘结强度与界面过渡性。对于钢筋锈蚀严重部位,需通过机械除锈、电化学脱锈或喷砂法去除锈蚀产物,裸露钢筋需涂刷环氧树脂或配套防腐底漆,再通过植筋、加焊等工艺恢复其受力能力。存在施工偏差的连接节点应通过螺栓重设、钢板加固、焊接补强等手段重新建立受力传递路径。裂缝治理过程中采用低黏度环氧树脂注浆法封闭微裂纹,并辅以外部碳纤维布约束,控制裂缝继续扩展。局部重构方案应以施工图复核与非破损检测结果为依据,利用结构重构仿真分析工具模拟重建后受力状态,确保恢复效果与原结构受力协调。该策略不仅能够有效消除潜在的安全隐患,确保桥梁

结构的长久稳定,同时还能在严格保障安全性的前提下,最大限度地减少对桥梁原有结构的干扰以及对交通运营的影响。通过科学合理的策略实施,不仅能够显著提升桥梁的整体使用寿命,延长其服务周期,还能进一步增强桥梁的安全冗余度,确保在各种复杂情况下仍能保持较高的安全性能,从而为桥梁的长期稳定运行提供坚实的保障。

4 结束语

市政道路桥梁作为城市交通系统的关键基础设施,其稳定性与持久性直接关系到城市运行的安全性和市民出行的便捷性。桥梁结构病害的成因复杂多样,涉及荷载环境、设计建造等多个环节,因此,在实施加固施工时必须做到系统化、科学化、差异化处理。当前加固技术日益成熟,材料选择与施工工艺不断优化,为高效修复各类病害提供了坚实的技术支撑。然而,在加固工作之外,更应注重预防性养护管理体系的建设,通过监测预警、定期巡检、信息化平台等手段,构建桥梁结构全生命周期健康管理体系,推进城市基础设施从“修复式管理”向“预测性维护”转型,为未来交通安全保驾护航。

参考文献:

- [1] 陈海宁.浅谈道路桥梁结构病害及其加固技术[J].建设监理,2024(S01):109-111.
- [2] 陈志良.道路桥梁常见结构病害及加固技术研究[C]//第三届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集,2024.
- [3] 周政杰.道路桥梁结构病害与加固施工分析[J].四川水泥,2023(07):274-276.
- [4] 张海波.道路桥梁结构病害与加固施工分析[J].电脑校园,2020(11):985-986.
- [5] 李健民.浅谈道路桥梁结构病害及加固技术[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2023(04):49-51.
- [6] 薛森,宋光强.道路桥梁工程施工中的常见病害与处理技术分析[J].智能建筑与工程机械,2023,05(05):28-30.
- [7] 钟省平.道路桥梁结构病害及加固措施研究[J].百科论坛电子杂志,2023(22):97-99.
- [8] 曾建.道路桥梁的常见结构病害及加固技术研究[J].运输经理世界,2023(04):128-130.
- [9] 万迎庆.对道路桥梁施工中结构病害问题的分析[J].城镇建设,2023(15):118-120.
- [10] 沈剑文.公路桥梁结构病害检测及加固措施[J].你好成都(中英文),2023(34):40-42.
- [11] 胡克林.公路桥梁养护与维修加固施工技术探讨[J].科技与创新,2024(15):138-140.
- [12] 孙启亮.高速公路桥梁养护与维修加固施工技术研究[J].运输经理世界,2023(31):128-130.