

分析地铁桥梁结构常见病害及加固方法

郑德聪 赵欣惠

中国水利水电第七工程局有限公司 四川 成都 610000

摘要: 地铁桥梁结构常见病害包括混凝土裂缝、碳化锈蚀、支座脱空变形、附属设施松动及特殊环境影响。病害成因涵盖设计缺陷、施工误差、材料老化及环境侵蚀。加固方法包括: 环氧胶封闭/压力灌浆修复裂缝, 粘贴钢板/碳纤维布增强抗弯, 体外预应力抵消跨中下挠, 液压顶升更换支座, 智能监测实时预警病害, 结合数值模拟评估结构安全性, 实现针对性维修与长期稳定性提升。

关键词: 地铁桥梁; 结构常见病害; 加固方法

引言: 地铁桥梁作为城市轨道交通的“生命线”, 长期面临列车动载、环境侵蚀及周边施工扰动等多重挑战, 导致混凝土开裂、支座老化、排水系统堵塞等病害频发, 严重影响结构安全与运营稳定性。传统检测与加固方法存在效率低、盲区大等问题, 难以满足全生命周期管理需求。本文聚焦地铁桥梁典型病害的成因机理, 结合智能监测、数值模拟等新技术, 提出针对性加固策略, 为提升桥梁耐久性与安全性提供科学参考。

1 地铁桥梁结构常见病害分类及成因分析

1.1 混凝土结构病害

(1) 裂缝: 跨中竖向裂缝多因结构抗弯能力不足, 在荷载长期作用下, 跨中受拉区超出混凝土抗拉强度引发; 板底纵向裂缝常源于配筋间距不均、数量不足等配筋缺陷, 或施工时模板安装偏差、浇筑顺序不当等施工误差; 腹板斜裂缝主要是结构抗剪承载力不足, 在剪力与弯矩共同作用下, 腹板出现斜向剪切破坏。(2) 碳化与锈蚀: 混凝土碳化使碱性降低, 保护膜失效, 当保护层因老化、磨损剥落, 钢筋暴露于空气和水分中易发生锈蚀; 沿海地区空气中氯离子浓度高, 会加速渗透至混凝土内部, 加剧钢筋锈蚀速率。(3) 剥落与蜂窝: 施工时振捣机械功率不足、振捣时间过短, 导致混凝土密实度不够; 或混凝土搅拌不均、运输过程中骨料与砂浆分离, 浇筑后表层出现剥落、蜂窝缺陷。

1.2 支座系统病害

(1) 支座脱空: 施工过程中墩台顶面标高控制误差过大, 或支座安装位置偏移, 导致支座与梁底、墩台顶面接触不充分; 后期运营中, 墩台基础不均匀沉降会进一步加剧支座脱空现象, 使支座受力集中, 降低其承载能力与减震效果。(2) 剪切变形: 地铁线路重载交通频繁, 列车通过时产生的横向荷载与振动, 使橡胶支座长期处于反复剪切状态, 当荷载超出支座设计剪切强度

时, 会出现过度剪切变形, 表现为支座倾斜、开裂, 严重时丧失承载功能。(3) 老化失效: 支座所用高分子材料在长期使用中, 受温度变化、紫外线照射、化学介质侵蚀等因素影响, 发生老化、硬化、龟裂等现象, 导致材料力学性能下降, 支座弹性恢复能力减弱, 进而引发承载力不足、变形超标等问题^[1]。

1.3 附属设施病害

(1) 隔音屏松动: 地铁列车运行产生的高频振动持续传递至隔音屏连接件, 长期疲劳作用导致螺栓、铆钉等连接件松动、脱落, 同时安装时固定点间距过大或连接件选型不当, 会加剧松动现象, 严重时引发隔音屏移位、坠落风险。(2) 排水系统堵塞: 桥梁排水管道长期受雨水冲刷, 水中钙化物、泥沙等杂质沉积, 逐渐形成淤积堵塞; 落叶、垃圾等异物侵入也会阻碍排水, 导致桥面雨水无法及时排出, 渗入桥面铺装层或结构缝隙, 诱发混凝土冻融破坏、钢筋锈蚀等次生病害^[2]。(3) 防护结构失稳: 围墙、防护网等防护结构基础埋深不足, 受周边施工扰动、地下水影响易发生沉降; 同时, 人为破坏、车辆撞击等外部因素会导致防护网破损、围墙倾斜, 若未及时修复, 可能引发结构限界超限, 影响地铁列车通行安全。

1.4 特殊环境病害

(1) 地铁隧道环境影响: 地铁隧道与桥梁结构近距离交叉或共线时, 地下水渗流会导致隧道结构渗漏, 渗漏水体长期浸泡桥梁基础, 降低地基承载力, 引发基础不均匀沉降; 同时, 隧道开挖与运营产生的扰动, 会影响桥梁基础稳定性, 诱发结构开裂、位移等病害。(2) 振动疲劳: 列车运行产生的动态荷载具有周期性、重复性特点, 长期作用于桥梁结构, 会引发结构构件的振动疲劳, 使微小裂纹不断萌生、扩展; 尤其是在结构应力集中部位, 如梁端、支座附近, 微裂纹易快速发展为宏

观裂缝,降低结构承载能力与使用寿命。

2 地铁桥梁结构常见病害诊断与评估方法

2.1 传统检测技术

(1) 外观检查:检测人员通过肉眼观察结合专业工具开展,使用裂缝宽度仪精准测量裂缝宽度,记录不同位置裂缝的长度、走向及分布密度;对钢筋锈蚀区域用标记笔明确圈定,标注锈蚀范围与程度,同时检查混凝土剥落、蜂窝等表层缺陷,形成直观的外观病害台账,为后续检测提供基础依据。(2) 无损检测:采用超声波探伤技术,向混凝土内部发射超声波,根据声波传播速度、衰减情况判断内部是否存在空洞、裂缝等缺陷;利用雷达扫描设备,通过电磁波探测结构内部钢筋分布、保护层厚度及隐蔽病害,无需破坏结构即可获取内部质量信息,减少对桥梁正常运营的影响。(3) 荷载试验:分为静载试验和动载试验,静载试验通过在桥梁关键部位施加分级静力荷载,监测结构应变、位移变化,评估结构在静载下的承载能力;动载试验则模拟列车行驶产生的动态荷载,测试结构振动频率、振幅等参数,分析结构动力响应特性,判断其在动载作用下的稳定性。

2.2 智能监测技术应用

(1) 传感器网络:在桥梁主梁、支座、墩台等关键部位布设应变计、加速度计等传感器,实时采集结构应变、振动、位移等数据,数据通过无线传输至监测平台,工作人员可远程实时掌握结构受力状态与响应变化,及时发现异常情况。(2) 无人机巡检:利用搭载高清相机和三维激光扫描仪的无人机,对桥梁外立面、顶部等人工难以到达的区域进行巡检,三维激光扫描可快速获取桥梁整体三维点云数据,构建病害数字孪生模型,直观呈现病害位置、形态及发展趋势。(3) AI图像识别:通过摄像头采集桥梁表面图像,将图像输入基于深度学习的AI识别系统,系统可自动识别裂缝、剥落等病害,同时根据病害尺寸、形态等特征,对病害严重程度进行分级评估,大幅提高病害检测效率与准确性。

2.3 安全性评估体系

(1) 依据《城市轨道交通结构安全保护技术规范》,结合地铁桥梁使用年限、运营荷载、环境条件等因素,建立“轻微-中等-严重-危急”四级安全性分级评估标准,明确不同级别病害对应的判定指标与处置要求,为病害评估提供统一依据。(2) 运用有限元分析软件,构建桥梁结构数值模型,将检测获取的病害参数(如裂缝深度、钢筋锈蚀率)代入模型,模拟病害发展对结构应力分布、承载力及稳定性的影响,预测结构剩余使用寿命,为制定针对性维修加固方案提供技术支撑。

3 地铁桥梁结构常见病害加固方法与技术看新

3.1 混凝土结构加固

(1) 裂缝修复:需根据裂缝宽度分级处理,当缝宽 $< 0.15\text{mm}$ 时,采用环氧胶封闭技术,先将裂缝表面清理干净,去除浮尘、油污及松动混凝土,再用低压注射器将低粘度环氧胶均匀注入裂缝表层,胶液固化后形成密封层,阻断水分与空气侵入,防止裂缝进一步扩展;当缝宽 $> 0.15\text{mm}$ 时,采用压力灌浆法,先在裂缝两侧按一定间距钻孔埋设灌浆嘴,用高压注浆泵将改性环氧砂浆或水泥浆压入裂缝内部,压力控制在 $0.2\text{--}0.5\text{MPa}$,确保浆液充分填充裂缝空隙,待浆液凝固后拆除灌浆嘴,对表面进行打磨平整,恢复混凝土结构整体性。(2) 增大截面法:针对混凝土构件抗弯刚度不足的问题,可在板底粘贴钢板或碳纤维布。粘贴钢板时,先对板底混凝土表面进行打磨、凿毛处理,清除表层浮浆,涂刷界面剂增强粘结力,再将裁剪好的钢板用环氧树脂胶粘剂粘贴于板底受拉区,钢板两端采用膨胀螺栓固定,胶粘剂固化后与混凝土形成整体受力体系,提升构件抗弯能力;碳纤维布加固则具有轻质、高强、耐腐蚀的优势,施工时先对混凝土表面进行找平处理,涂刷底胶后铺设碳纤维布,用滚筒压实排除气泡,再涂刷面胶保护,适用于对结构自重敏感的加固场景^[1]。(3) 体外预应力加固:对于跨中下挠严重的桥梁,采用折线形布束张拉技术。先在桥梁主梁两侧或底部布设体外预应力束(常用钢绞线),束体呈折线形跨越支座区域,通过锚具将预应力束固定在梁体两端的锚固块上,利用张拉设备对预应力束施加预定拉力,使梁体产生反向弯矩,抵消部分荷载产生的正弯矩,从而消除跨中下挠,同时提升梁体整体承载能力。施工过程中需实时监测梁体应变与位移,确保张拉应力符合设计要求,避免过度张拉导致结构损伤。

3.2 支座系统修复

(1) 支座更换:当支座出现脱空、老化失效等严重病害时,采用液压同步顶升技术更换支座。先对桥梁主梁进行临时支撑加固,在梁体下方布设多个液压千斤顶,通过同步控制系统实现千斤顶同步顶升,顶升高度控制在 $5\text{--}10\text{mm}$,确保梁体均匀受力,避免产生附加内力;待梁体顶起后,拆除旧支座,清理支座垫石表面,检查垫石平整度,若存在不平整情况,采用高强水泥砂浆找平;随后安装新支座(根据受力需求选择橡胶支座、钢支座等类型),调整支座位置与标高,确保支座与梁体、垫石紧密接触,最后缓慢卸载千斤顶,使梁体重量平稳传递至新支座。(2) 限位装置强化:为防止支座在水平荷载作用下发生横向滑移,增设抗剪键强化限

位功能。抗剪键通常采用钢筋混凝土或钢材制作，设置在支座两侧的梁体与墩台之间，与梁体、墩台通过预埋件连接固定。对于橡胶支座，可在支座上下钢板边缘焊接钢制抗剪挡板，挡板与梁体、墩台侧面预留1-2mm间隙，既能限制支座横向位移，又能避免温度变形产生的附加应力；对于钢支座，可在支座底座设置限位凹槽，与墩台顶部的凸台配合，形成机械限位结构，提升支座抗滑移能力。

3.3 附属设施优化

(1) 隔音屏改造：针对传统隔音屏抗冲击性差、易损坏的问题，采用高强度双层夹胶钢化玻璃进行改造。双层玻璃之间夹设PVB（聚乙烯醇缩丁醛）胶片，玻璃厚度选用8-12mm，胶片厚度为0.76-1.52mm，通过高温高压工艺复合成型，形成具有抗冲击、隔音、防爆性能的复合玻璃构件。安装时采用铝合金框架固定，框架与桥梁主体结构通过弹性连接件连接，减少振动传递导致的玻璃破损；同时在玻璃表面涂刷憎水涂层，防止雨水附着影响透光性，提升隔音屏的耐用性与功能性。(2) 排水系统升级：为解决排水系统堵塞问题，从防护与清淤两方面进行升级。首先在排水沟、排水管内壁涂刷疏水型涂料（如聚四氟乙烯涂层），该涂层具有极低的表面张力，能有效减少杂质、钙化物在管壁的附着；其次建立定期高压水射流清淤机制，采用压力为10-20MPa的高压水枪，通过柔性喷头深入管道内部，冲刷管壁附着的淤积物，清淤周期根据运营环境设定为3-6个月；此外在排水口增设滤网装置，过滤雨水携带的大颗粒杂质，从源头减少淤积，确保排水系统畅通，避免渗漏水对桥梁结构的侵蚀^[4]。

3.4 特殊环境适应性加固

(1) 隧道反渗处理：针对隧道地下水渗流影响桥梁基础稳定性的问题，采用深层注浆加固与止水帷幕结合的技术方案。深层注浆加固时，在桥梁基础周边按梅花形布置注浆孔，孔深穿越不稳定土层至稳定岩层，采用高压旋喷注浆工艺，将水泥-水玻璃双液浆注入土层，浆液在压力作用下扩散、凝固，形成直径1-2m的桩体，提

升地基承载力；同时在隧道与桥梁基础之间设置止水帷幕，采用连续墙或高压喷射注浆形成封闭的防渗墙体，墙体深度穿透透水层至隔水层，阻断地下水向隧道与桥梁基础的渗流路径，有效控制地下水位，保护基础稳定性。(2) 减振降噪设计：为缓解列车振动疲劳对桥梁结构的影响，采用粘滞阻尼器与弹性支座组合的减振体系。粘滞阻尼器安装在桥梁主梁与墩台之间，通过活塞在阻尼液中的运动产生阻尼力，消耗振动能量，降低结构振动幅度，阻尼器的阻尼系数根据桥梁振动特性精准匹配；弹性支座选用高弹性模量的橡胶材料或钢弹簧支座，替代传统刚性支座，减少振动在支座处的传递，同时弹性支座具有一定的变形能力，可适应梁体的温度变形与收缩变形。两者组合使用，能有效衰减列车行驶产生的竖向与水平振动，延长桥梁结构使用寿命，同时降低周边环境的噪音污染。

结束语

地铁桥梁结构的安全运营直接关系到城市轨道交通系统的稳定性。本文通过系统梳理混凝土劣化、支座失效、附属设施损伤及特殊环境病害的成因与特征，结合智能监测、数值模拟等技术创新，提出了裂缝压力灌浆、体外预应力加固、减振降噪设计等针对性解决方案。未来需进一步强化全生命周期健康管理，推动病害预警与快速响应机制建设，同时探索新材料、新工艺的应用，为保障地铁桥梁结构安全、延长使用寿命提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]张琳.浅谈地铁桥梁结构常见病害及加固方法[J].四川建筑,2021,39(01):137-138.
- [2]许术.浅谈地铁桥梁结构常见病害及加固方法[J].四川建材,2021,45(08):180-181.
- [3]李阳.地铁桥梁结构常见病害及加固方法的应用研究[J].黑龙江交通科技,2020,42(09):104-105.
- [4]叶胜波.地铁桥梁结构常见病害及加固方法[J].科技创新与应用,2022,33(06):121-122.