

# 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<sup>[1]</sup>。

### 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<sup>[2]</sup>。(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创新

### 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<sup>[3]</sup>。(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<sup>[4]</sup>。

### 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.