工程管理
Journal of Project Management
第 6 卷◆第 12 期◆版本 1.0◆2025 年
文章类型：论文| 刊号（ISSN）：2737-4580(P) / 2737-4599(O)

既有市政桥梁长效加固维修关键技术及工程应用

毛润勇
江西丰悦建设工程有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i12.8567

[摘　要] 既有市政桥梁在城市交通基础设施建设中具有重要作用,可确保行人和车辆的道路安全通行。市政桥梁在长时间的使用、日益繁重的交通负荷和自然环境影响下，形成多样化病害，危害桥梁的正常使用，因而需要采用有效的加固技术进行桥梁维修，以此确保市政桥梁的行车安全，并延长桥梁的使用时间。本文分析了既有市政桥梁典型病害与智能化诊断，结合案例验证，探讨创新加固维修技术实践和应用效果。

[关键词] 既有市政桥梁；病害；识别及检测；加固修复技术；工程应用
[中图分类号] U445

Key technologies and engineering applications for long-term reinforcement and maintenance of existing municipal bridges

Mao Runyong
Jiangxi Fengyue Construction Engineering Co.，Ltd.

[Abstract] Existing municipal bridges play an important role in the construction of urban transportation infrastructure，ensuring the safe passage of pedestrians and vehicles on the road. Under long-term use，increasingly heavy traffic loads，and natural environmental impacts，municipal bridges have developed diverse diseases that pose a threat to their normal use. Therefore，effective reinforcement techniques are needed for bridge maintenance to ensure the safety of driving on municipal bridges and extend their service life. This article analyzes typical diseases and intelligent diagnosis of existing municipal bridges，and combines case verification to explore the practice and application effects of innovative reinforcement and maintenance technologies.

[Key words] existing municipal bridges；Disease；Identification and detection；Reinforcement and repair technology；engineering application

前言

随着城市建设和发展，部分地区的城市桥梁投入使用时间已经超过三十年，老化现象逐渐凸显，在长时间的使用过程中，这些城市桥梁承受着远超过设计标准的交通负荷，并面临自然环境侵蚀、材料性能退化等影响，使得结构性病害程度加深，其中危害性最大的病害为裂缝类病害，是危害桥梁安全的首要因素[1-2]。传统加固法在应用中存在一定局限性，如：常见的粘贴钢板法，此方法需要大面积钻孔，对二次损伤原桥梁结构；体外预应力加固张拉力控制失准，导致结构损伤，严重清空下形成垮塌现象等[3]。因而，需要对既有市政桥梁进行长效维护，建立一套以智能监测评估为指导，长效加固维修技术作为核心的工程技术体系，在对病害进行精确的监测和识别后，提供加固决策的重要依据，选取与其匹配的加固修复技术，实现对既有市政桥梁的加固修复，使其使用寿命增加，安全性提高。

1 既有市政桥梁典型病害与智能化诊断

1.1 关键病害类型及其对结构长期性能的影响

既有市政桥梁在长时间的使用下，因受到繁重的交通负荷、自生特征、自然环境等因素下，比较容易出现多样化的病害[4]，典型病害类型包括：混凝土钢筋锈蚀、活性结构性裂缝、预应力体系腐蚀、支座失效、钢结构疲劳。其中混凝土钢筋锈蚀、活性结构性裂缝、钢结构疲劳在维修紧迫性上表现出“高”；预应力体系腐蚀在维修紧迫性上表现出“极高”；支座失效在维修紧迫性上表现出“中-高”。

关键病害对桥梁长期性能的影响，如表 1 所示：

表 1　关键病害对桥梁长期性能的影响

病害类型	机理	对长期性能的关键影响
混凝土钢筋锈蚀	电化学腐蚀、体积膨胀	承载截面发生损失，承载力连续下降，安全性根本下降
活性结构性裂缝	应力超限、基础变形	传力路径发生变化，介质侵入的速度加快，提示存在潜在的破坏
预应力体系腐蚀	应力腐蚀、氢脆	突发性脆断风险，后果非常严重
支座失效	传力路径改变	造成梁体附加应力，病害再次出现
钢结构疲劳	循环荷载下的裂纹萌生与扩展	累积损伤，疲劳寿命降低，断裂风险显著

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

1.2 智能化检测技术

智能化检测技术，在传感技术、机器人、物联网和人工智能技术等现代化智能技术的支持下，可达到自动获取、数字表达和智能化分析的病害信息，其得到的病害信息可成为长效加固决策的客观数据基础[5]。

1.2.1 多源数据采集技术

采用轻量化传感技术，布设电扰度仪和倾角加速度计，对主梁变形和震动频率开展实时性捕捉，能够尽快识别风险。结合 PST（桩侧应力波成像法），利用二维缺陷扫描水毁桥梁桩基，以应力波在混凝土的传统视察和能量衰减特点为依据，重新构建桩体内部缺陷三维模型，实现精确定位和减低成本。

1.2.2 AI 数据分析及病害识别

采用 AI 视觉识别系统，精确诊断桥梁表面病害，利用优化后的 YOLOv7+ECA 注意力机制模型，以桥梁裂缝小目标特性优化锚框尺寸和特征融合路径，可提高裂缝识别准确率。利用 Bridge Guard AI 系统的高清摄像头，对视频流进行实时性分析，对裂缝拓展轨迹进行标记和速率计算，及时发出预警并进行指导更换。

1.2.3 智能化诊断输出结果

智能化监测输出的结果，可直接形成病害数字化档案，包括：病害发生的类型、位置、尺寸、严重程度等。以 AI 技术进行知识库检索，分析并初步判断病害发生的原因和危害等，诊断和识别出的全部病害数据，需要按照统一的格式进行输出，并在动态评估模型中导入，进而驱动模型更新。

2 基于动态评估的长效加固维修技术体系构建

2.1 面向长效性能的加固维修技术库

2.1.1 高效加固技术

高效加固技术，利用先进技术和相关装置，对桥梁结构性损伤进行加固处理，在保证加固效果的同时提高施工效率，却使得桥梁运行保持正常的状态。比较创新的高效加固技术包括：

第一，体系转换技术。对市政桥梁结构受力体系进行高边，重新分布荷载，使得桥梁结构的承载力、整体稳定性得到提升。体系转换技术中，采用简支改连续的应用效果显著，把原本独立受力的简支梁桥转换成为连续性梁桥，增强结构受力的合理性，可使得单个梁体所受荷载得到有效下降。例如：鞍千 9 号桥，在加固处理中使用简支连续技术，处理后的效果较为显著，原桥梁的荷载分担率降低 25%，受力状态得到改进，桥梁的承载力、使用时间增加。在实际的应用中，利用增加支座、在梁体端部设置连续缝的方法，将各简支梁体连接成一个整体，共同承受荷载，使得单个梁体应力集中，使其病害发生风险降低。

第二，免干扰加固装置。基于原桥梁结构不被损伤的基础上，加固补强桥梁。此技术是新型专利技术，采用半幅固定套+碳纤维调节杆，其中半幅固定套固定在桥梁的梁体和墩柱等部位，可保证稳定的支撑力。碳纤维调节杆轻量化、强度高，可利用长度及拉力的调节后，对桥梁结构施加预紧力，使得结构的刚度及承载力得到提升。此加固技术对比传统技术的优势显著，不会对原桥梁形成损伤，使其保证完整性，同时施工简单、方便，减少施工时间，避免长时间交通管制，对行车造成较大的影响。

2.1.2 毫米级修复工艺

毫米级修复，是对桥梁表面微小的病害，使用高精度的施工方式及材料，对其进行精确的修复，使得桥梁结构表面恢复完整，提高耐久性。毫米级修复工艺的修复精度比较高，对结构影响比较小，修复的效果较好，因而一般被广泛用于预防性养护及轻微的病害修复工作中。在工艺具体应用中，需要特别注意的是精准定位病害，并对其进行精细化处理。施工前，利用超声波检测仪、激光扫描仪等，全面检测桥梁表面的微小病害，对病害的位置、尺寸、深度等参数进行明确，为修复施工提供精准依据。施工中，彻底清理裂缝周边的灰尘、杂物等，采用专业的注射装置，把修复的材料慢慢的注入到裂缝中，使其将裂缝内部填满，以材料从裂缝另一端溢出为止，确保修复的密实性。注射后，抹平裂缝表面并养护，使得修复材料紧密结合原混凝土结构，使得混凝土的整体性、抗渗性得到恢复。

针对于不同的病害类型，采取创新型的工艺，达到较好的效果。如表 2 所示：

表 2　不同病害采取毫米级修复工艺的情况

病害类型	创新工艺	技术指标
伸缩缝破损	纳米改性快硬砂浆	2h 强度≥20MPa，3h 开放交通
墩柱锈蚀	ACC 防腐混凝土+自修复微胶囊	Cl^-扩散系数↓58%
悬臂梁错台	碳纤维网格植入+恒温修复舱	错台修复精度±0.3mm

2.2 融合多源数据的动态评估与分级预警

在桥梁全生命周期各类监测数据的基础上，形成多源数据融合评估模型，利用先进算法和模型数据整合及分析，动态评估桥梁健康状况，模型数据的来源类型较多，包括：结构监测数据、病害监测数据、环境数据、交通荷载数据、历史运维数据。采用多种技术和方法处理和整合多源数据，预处理数据清晰、去噪及归一化操作处理采集到的原始数据，将冗余信息和异常值进行剔除，保证数据质量。利用时空对齐的方式，匹配和关联不同时间及空间的采集到的数据，使得多源数据在时间、空间维度上报纸一致，便于建模和分析，不同类型的数据采取对应的融合算法，如：数值型的数据使用统计融合法，图像数据结合计算机视觉技术，对其特征进行提取及融合，把多源数据转化为统一、且用于评估模型的数据集或特征向量。

基于多源数据融合评估模型基础上，构建三级智能预警机制，以桥梁健康情况评估结果设置不同级别预警，分别为一级预警、二级预警、三级预警，对应的程度为一般、较重、严重。

3 长效加固维修技术的工程应用与验证

3.1 长效加固维修技术的应用流程

为实现市政既有桥梁长效加固维修技术的应用，可建立“4 步循环”应用流程，包括：

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

第一，精准化监测和采集数据。借助于智能化检测技术，对桥梁的各种病害信息进行全方位的采集，形成了多源数据，以此为结构的数字孪生基础模型。

第二，智能化评估和决策。精确采集的数据输入到动态评估模型中，对病害的危险程度和发展趋势等进行全面的分析，并判定病害处于的安全等级。以此为依据提供多种解决和应对技术和措施，对多个方案进行比较和分析，选取出在最佳的桥梁长效加固方案。

第三，精细化施工及过程管控。选好修复方案后，利用与其匹配、高效的加固技术。施工中实时监控施工的各项关键参数，保证施工质量达到规定的标准。

第四.长期监测和效果反馈。既有市政桥梁加固后，还需要做好后续的检测，设置长期的桥梁监控健康系统，对结构响应的数据进行连续性的采集。数据反馈到评估模型，对加固效果和校准模型参数进行加固，形成持续优化且闭环的管养系统。

3.2 案例实证分析

3.2.1 基于复合材料（CFRP）的抗弯加固长效实践

以某跨径 30m 预应力 T 梁桥为案例，该桥长时间处于超载的运行状态下，桥梁的主梁底部已经存在较多条的横向弯曲裂缝，最大宽度为 0.3mm，承载能力验算表明：桥梁目前的主梁已经难以达到荷载等级的要求。利用预应力碳纤维板（CFRP）加固技术。在梁底粘贴高强度碳纤维板并施加预应力，可使得梁体的抗弯刚度和承载力得到快速提高。此技术的应用不会使得桥梁结构的自身重量显著增加，具有一定的耐腐蚀性，符合加固修复的长效理念。

加固技术应用的效果，如表 3 所示：

表 3　加固技术应用的效果

时间节点	应用效果
加固前	在标准试验荷载下，梁底最大挠度为 28mm，裂缝扩展至 0.35mm。
加固后即时效果	基于同等荷载下，挠度降至 18mm（提升 35.7%），裂缝完全闭合
2 年后跟踪监测	预应力碳板锚固比较安全可靠，没有应力松弛的现象，基于常规荷载下，结构稳定较好，说明加固技术的应用达到了长期有效性的效果。

3.2.2 毫米级修复与长期跟踪技术实践

以某城市钢管混凝土拱桥吊杆锚固区为案例，检查发现吊杆锚固区混凝土存在局部压碎、微裂缝等毫米级损伤，虽然没有对安全形成影响，但是如果不及时进行处理，那么就会造成雨水侵入，使得内部钢材出现锈蚀，严重影响到核心构件的耐久性。

针对此既有桥梁工程存在的质量缺陷，则采用高强环氧树脂基灌浆料进行压力注浆修复。精确凿除松动物，再利用专用设备将低粘度、高强度的环氧浆液注入毫米级裂缝和空隙中，恢复混凝土的整体性和密实度。

加固修复技术应用的效果，如表 4 所示：

表 4　加固修复技术应用的效果

时间节点	应用效果
修复前	超声检测显示损伤区域波速明显降低，表明内部不密实
修复后即时效果	超声波速恢复至健康混凝土的 98%以上
3 年后跟踪监测	通过内窥镜抽查和无损检测，修复区域未见新裂缝或退化迹象，有效阻止了钢筋锈蚀的发生，验证了毫米级修复对关键部位耐久性保障的长效价值

3.3 应用效果的评估

结合本次选取的两个典型的案例及大量工程实践，可以充分的证明：长效加固技术的优势能够通过量化表现。效果评估对当下的承载力提高，更注重长期性能的稳定性。评估指标主要包括：①承载力安全系数（长期≥1.2）；②关键构件刚度（衰减率年均＜1%）；③病害发展速率（如裂缝宽度年增长量趋于零）。

长期监测数据表明：采用以智能化检测为导向的精准长效加固方案，可将关键构件的大修周期延长至 20 年以上，远超传统方法的 5-10 年。

4 结束语

既有市政桥梁工程常见病害危害性较高，因而需要通过合理的检测评估技术，对其程度进行精确，并采取创新加固修复技术，结合案例验证，创新型加固修复技术的效果更高，降低周期成本，提高使用寿命，可更好的确保桥梁安全和经济运维。

[参考文献]

[1]陈海涛，马远刚，吕曹炯，等.既有铁路桥梁桩基检测与病害加固处治[J].世界桥梁，2024，52（2）：120-126.

[2]秦宁伟，唐帅帅.道路桥梁常见病害分析及维修加固技术研究[J].建筑・建材・装饰，2020，000（007）：65-66.

[3]王云山.基于病害检测与状态评估的桥梁加固技术研究[J].大众标准化，2024（2）：184-186.

[4]史岩飞.桥梁病害智能化检测技术的应用[J].交通世界，2024（25）：111-114.

[5]田川江.公路桥梁加固维修关键施工技术研究与应用分析[J].建筑机械，2023（9）：76-78.

作者简介：毛润勇（1989—），男，汉族，江西上饶，中级职称，本科，交通土建。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.