

既有混凝土桥梁典型病害成因分析及加固修复技术应用研究

赖 可

保利长大工程有限公司 广东 广州 510000

摘 要:既有混凝土桥梁在环境侵蚀、荷载反复及材料老化作用下,普遍出现裂缝、钢筋锈蚀、混凝土劣化等典型病害,危及结构安全。本文系统梳理病害类型,从力学作用、环境因素、材料特性及施工质量四维度剖析成因机理,综述增大截面法、粘贴加固法、体外预应力加固法等技术的适用条件,提出病害诊断—方案比选—施工控制—效果检验的系统化流程。研究表明,病害成因具有多因素耦合特征,加固方案须具备针对性,组合技术应用优于单一路径。研究可为桥梁检测评估与加固改造提供参考。

关键词:既有混凝土桥梁;典型病害;成因分析;加固修复技术

引言:既有混凝土桥梁是我国交通基础设施的关键组成部分,全国公路桥梁总数已超百万座,服役超过三十年的桥梁占比持续上升。运营年限增长与交通荷载加重导致大量桥梁出现不同程度病害,部分承载能力已不满足现行规范,加固改造需求迫切。病害成因的科学认知是合理制定加固方案的基础,加固技术的正确选用直接影响修复效果。但工程实践中仍存在病害诊断不全面、技术选用失当等问题。本文系统归类典型病害并分析成因,比较各类加固技术特点,以期养护决策提供支撑。

1 混凝土桥梁典型病害类型与表征

1.1 裂缝类病害

裂缝是混凝土桥梁最常见、分布最广的病害形式。按其形态和成因可划分为受力裂缝与非受力裂缝两大类。受力裂缝主要包括弯曲裂缝、剪切裂缝和扭转裂缝,通常出现在弯矩最大区段或剪力较大部位,裂缝走向与主拉应力方向垂直或近似垂直,宽度和长度随荷载变化呈现张开与闭合的特征。非受力裂缝则包括温度裂缝、收缩裂缝和沉降裂缝等,其分布较为分散,走向无明显规律,往往在结构未承受显著荷载时即已出现。裂缝的存在不仅削弱了混凝土的有效截面面积,还为腐蚀性介质的侵入提供了通道,是引发其他类型病害的重要诱因。

1.2 钢筋锈蚀类病害

钢筋锈蚀是导致混凝土桥梁承载能力衰减的主要因素之一。在混凝土碳化或氯离子侵蚀作用下,钢筋表面的钝化膜遭到破坏,在水和氧气共同参与的条件下发生电化学腐蚀反应。锈蚀产物(铁锈)的体积较钢筋原材

料膨胀2至6倍,产生的膨胀应力足以使周围混凝土产生顺筋裂缝甚至保护层剥落。钢筋有效截面积的减小直接降低了构件的抗拉承载能力,而钢筋与混凝土之间黏结性能的退化则进一步削弱了二者的协同工作性能。锈蚀严重时,甚至可能出现钢筋断裂的极端情况^[1]。

1.3 混凝土劣化类病害

混凝土劣化表现为强度下降、表层剥落、骨料裸露等形态。混凝土碳化是中性化过程的典型表现,二氧化碳渗透至混凝土内部与氢氧化钙反应,使孔隙液的pH值降低,从而削弱对钢筋的化学保护作用。在寒冷地区,冻融循环导致的冻胀破坏也较为常见,混凝土孔隙内的水分在低温下结冰膨胀,反复作用后引起表层剥落和内部微裂缝扩展。此外,化学侵蚀性介质(如硫酸盐、酸雨等)对混凝土的腐蚀同样不可忽视,其作用机制涉及离子交换、膨胀性产物生成等复杂物理化学反应。

1.4 支座与伸缩缝装置病害

支座和伸缩缝虽是附属构件,但其病害直接影响桥梁的整体受力状态和使用功能。橡胶支座的开裂、老化、过度变形和脱空现象会改变预期约束条件,导致上部结构内力重分布。伸缩缝装置的堵塞、破损或锚固松动则可能引起桥面跳车,增大车辆冲击系数,加剧梁体端部的局部损伤。

2 典型病害的成因分析

2.1 力学作用引发的病害成因

车辆荷载是桥梁运营阶段最主要的外部作用,超载车辆的比例增大使桥梁实际承受的荷载效应远超设计取值,关键截面弯矩和剪力显著增大,导致裂缝过早出现

或在正常使用阶段持续扩展。车辆荷载的疲劳效应同样不容忽视,反复作用的应力循环促使微裂缝不断延伸和贯通,最终形成宏观裂缝。温度荷载引发的伸缩变形在结构体系受到约束时会产生相当大的温度应力,当该应力超过混凝土抗拉强度时即产生温度裂缝。对于连续梁桥和刚构桥,温度梯度引起的弯曲应力同样是不可忽略的因素。

2.2 环境侵蚀与耐久性退化

环境因素对混凝土桥梁的劣化作用贯穿其全生命周期,大气中的二氧化碳通过混凝土孔隙向内部渗透,碳化深度随时间呈抛物线增长,碳化前锋抵达钢筋表面时即激活锈蚀反应。氯离子侵蚀在除冰盐使用频繁的北方地区和海洋环境下的桥梁中尤为突出,氯离子具有极强的去钝化能力,可在较低浓度下诱发局部点蚀。对于采用后张法施工的预应力混凝土桥梁,管道压浆不密实留下的空隙为水分和空气的积聚提供了空间,导致预应力筋遭受腐蚀的风险显著增加^[2]。

2.3 材料特性与施工质量缺陷

材料层面的成因涉及混凝土配合比设计、原材料品质及施工控制等多个环节。混凝土水灰比过大直接导致孔隙率偏高,渗透性增大,抗碳化和抗冻融能力同步下降。骨料中若含有碱活性成分,在潮湿条件下可能发生碱—骨料反应,产生膨胀性凝胶,引起混凝土内部开裂。施工过程中存在的振捣不密实、养护不到位、保护层厚度不足等问题,从源头上降低了混凝土的致密性,缩短了耐久性寿命。预应力孔道定位偏差、张拉控制应力不准确等施工偏差则直接影响了构件的初始应力状态。

2.4 多因素耦合的协同劣化效应

工程实践表明,混凝土桥梁的典型病害很少由单一因素独立引发,更多地表现为多种因素相互叠加、交互促进的协同劣化过程。结构裂缝为腐蚀介质提供了快速通道,加速了钢筋锈蚀的进程;锈蚀膨胀引起的混凝土开裂进一步劣化了结构截面,降低了承载能力,而承载能力的下降又使结构在同等荷载下产生更宽的裂缝——如此形成恶性循环。这种多因素耦合效应意味着病害成因分析必须建立系统观,将结构分析、材料检测和环境评估三者结合起来综合判断,才能准确把握病害的本质与发展的阶段。

3 常用加固修复技术及其适用条件

3.1 增大截面加固法

增大截面加固法通过在原有构件表面增设一定厚度的钢筋混凝土层,增加构件有效截面高度和配筋量,从

而整体提高构件的抗弯、抗剪刚度与承载能力。该技术原理明确、传力直接,对梁式桥和拱桥的加固均有较好的适用性。其主要优点在于能够同时提高刚度和承载力,且新增混凝土与原结构之间界面处理良好时可形成整体协同受力。但也存在自重增加明显、施工期需要支撑卸载、截面尺寸增大可能影响桥下净空等局限性。该法适用于原结构配筋不足或截面尺寸偏小且对自重增加不敏感的情况。

3.2 粘贴加固法

粘贴加固法主要包括粘贴钢板加固和粘贴纤维复合材料加固两种形式,粘贴钢板加固通过在构件受拉面粘贴钢板并用锚栓加以固定,利用钢板参与受拉来提高截面抗弯能力,施工简便、效果可靠。粘贴纤维增强复合材料(FRP)加固是近年来发展迅速的技术,碳纤维布(CFRP)和玻璃纤维布(GFRP)因具有轻质高强、耐腐蚀性好、施工便捷等优点被广泛应用。FRP加固的增强效果主要取决于纤维方向与受力方向的匹配度,通常将纤维方向沿主拉应力方向布置以充分发挥其优异抗拉性能。该法对原结构几乎不增加附加荷载,尤其适合对自重增加有严格限制的情况,但加固效果受黏结质量影响较大,且纤维材料属于各向异性材料,设计计算需采用专门的力学模型。

3.3 体外预应力加固法

体外预应力加固法通过在梁体外部设置预应力筋并施加张拉力,对原结构引入附加偏心压力,改善结构的内力分布状态。该方法能够有效提高构件的抗裂性能和承载能力,同时在一定程度上恢复因预应力损失而退化的结构性能。体外预应力筋的布置形式较为灵活,可根据加固目标选取直线形、折线形或曲线形线型。与其他加固方法相比,体外预应力的优势在于主动施加加固力,对原结构内力状态有直接的改善作用^[3]。但其施工工艺要求较高,张拉端和锚固端的构造处理需精细设计,且体外束在使用阶段需要设置有效的防护措施以防止意外损伤。

3.4 裂缝修补与截面修复技术

裂缝修补和截面修复属于功能性修复措施,通常与其他加固方法配合使用。针对宽度小于0.2毫米的裂缝,可采用表面封闭法涂覆渗透性封闭材料防止水分和腐蚀介质侵入。对于宽度较大且贯穿性裂缝,通常采用压力注浆法,将环氧树脂或水泥基灌浆材料压入裂缝内部实现黏合修复。截面修复则针对混凝土剥落、蜂窝、麻面等缺陷进行,首先清除劣化混凝土,然后进行钢筋除锈和阻锈处理,最后采用高性能修补材料恢复截面。此类

技术虽然不能直接提高承载力,但可有效阻断病害的进一步发展,是加固工程中不可或缺的基础工序。

3.5 加固技术的组合应用策略

实际加固工程中,单一加固技术往往难以全面解决复杂的病害问题,多种技术的组合应用正逐渐成为主流做法。例如,对于承载能力不足且裂缝密集的梁体,可采用体外预应力加固法主动改善内力状态,同时结合粘贴钢板或 FRP 对局部应力较大区段进行补强,再辅以裂缝注浆封闭和截面修复恢复结构的完整性和耐久性。组合方案的设计应遵循“主动加固与被动加固互补、承载力提升与耐久性修复并重”的原则,根据病害类型、结构特点和施工条件进行有针对性的组合比选,避免技术过度叠加造成资源浪费。

4 加固修复方案设计原则与实施流程

4.1 基于病害诊断的方案设计原则

加固修复方案设计的首要前提是准确诊断病害的类型、程度和成因。设计阶段应遵循以下基本原则:安全性原则要求加固后的结构承载能力和使用性能满足现行规范要求;适用性原则强调加固方案应与原结构协调,对既有结构的损伤控制在最低限度;耐久性原则要求加固材料和构造措施具有足够的使用寿命,避免短期内再次失效;经济性原则要求在满足前三条原则的前提下,综合考虑材料费用、施工措施费、交通影响费等因素,选择综合成本较低的可实施方案。

4.2 加固修复实施的标准化流程

加固修复工程的实施可划分为检测评估、方案设计、施工实施和质量检验四个阶段。检测评估阶段应完成外观普查、无损检测、材料取样试验、荷载试验等工作,形成结构现状的完整认知。方案设计阶段需根据检测结果比选适宜的技术方案,完成加固构件的计算分析和构造设计。施工实施阶段应严格遵循设计文件和相关施工规范,对关键工序(如界面处理、植筋锚固、预应力张拉等)实施旁站监督。质量检验阶段通过非破坏性检测和荷载试验验证加固效果,确认是否达到预期目标^[4]。

4.3 施工质量控制要点

加固施工质量直接决定加固效果与使用寿命,须在关键环节建立严格管控。界面处理是增大截面加固和粘贴加固成败的首要因素,原结构表面的凿毛深度、清洁程度及湿润状态均须达到设计标准,界面缺陷将破坏新旧材料的整体协同受力。植筋施工的钻孔深度、孔径偏差和清孔质量应符合规范要求,锚固胶灌注应饱满密实,避免气泡影响锚固承载力。粘贴 FRP 加固中,纤维

布的张拉平整度、浸渍树脂饱满度及养护温湿度条件均须严格受控。体外预应力加固的孔道定位精度、张拉程序与伸长量校核是确保有效预应力的核心,张拉过程须实施双控监测,以张拉力为主、伸长值为辅,偏差超标时应立即暂停并查明原因。

4.4 加固效果检验与长期监测

加固工程完成后,应通过系统的效果检验手段验证加固措施是否达到预期目标。静载试验和动载试验是检验加固效果的主要方法,通过对结构承载能力、刚度分布和动力特性的全面测试,将实测数据与设计预期值进行逐项比对,确认加固后结构的安全储备和使用性能是否满足规范要求。对于采用新型材料或特殊工艺的加固工程,以及加固方案较为复杂的重点桥梁,建议在关键受力部位和加固界面处布设长期监测点,在加固后运营初期适当加密观测频次,重点追踪加固界面的协同工作状况和新旧材料的变形协调性。长期监测数据不仅可用于评估加固措施的持续有效性,及时发现异常退化迹象以便早期干预,还可为同类工程的设计优化和施工改进积累宝贵的实测资料,推动加固技术从经验依赖向数据驱动转变,提升行业整体技术水平。

结束语

既有混凝土桥梁的病害诊断与加固修复是保障交通基础设施安全运营的关键环节。本文系统梳理了裂缝、钢筋锈蚀、混凝土劣化等典型病害类型,揭示了力学作用、环境侵蚀、材料特性与施工质量等多因素耦合的成因机制,明确了科学诊断对加固方案制定的基础性作用。在此基础上,比较分析了增大截面法、粘贴加固法、体外预应力加固法等常用修复技术的适用条件,提出了基于病害诊断—方案比选—施工控制—效果检验的系统化实施框架。随着新材料与新技术持续发展,混凝土桥梁加固修复领域在智能化检测评估和绿色加固材料应用方面仍有广阔探索空间。

参考文献

- [1] 田永利.既有铁路钢筋混凝土Ⅱ形梁典型病害成因分析[J].铁道工务,2025,3(3):41-44.
- [2] 朱容.公路桥梁病害成因及加固维修技术[J].数字化用户,2025(49):127-129.
- [3] 蓝章礼,马鑫,张洪,等.基于纹理特征分析的混凝土桥梁表面病害识别[J].铁道科学与工程学报,2026,23(4):1969-1981.
- [4] 邹兰林,金辉.混凝土桥梁隐伏病害的红外无损检测研究[J].机械设计与制造,2023,391(9):212-216,220.