

桥梁结构加固改造的技术路径探究

林建楠

浙江交工集团股份有限公司大桥分公司 浙江杭州 310000

摘要:在交通量持续攀升与桥梁服役年限增长的背景下,桥梁结构的安全性与耐久性面临严峻挑战。本文通过系统梳理桥梁结构加固改造的现状,深入探讨增大截面、粘贴钢板、体外预应力等主流技术路径的原理与适用场景,结合典型工程案例剖析技术应用要点,针对现存问题提出优化策略,旨在为桥梁结构加固改造提供科学、可行的技术参考,助力提升桥梁基础设施的服役性能。

关键词:桥梁结构;加固改造;技术路径;服役性能;预应力连续箱梁

1 引言

桥梁作为交通网络的关键节点,其安全与畅通直接关系到区域经济发展和民生福祉。近年来,随着重载交通日益频繁、环境侵蚀加剧,大量桥梁出现承载能力下降、结构病害等问题。例如,沈阳市部分桥梁因服役时间长且交通流量大,像东西高架桥高峰期每小时车流量达6600台,承载压力巨大,导致结构出现病害,影响安全使用。桥梁结构加固改造已成为延长桥梁使用寿命、保障交通安全的重要手段。本文围绕桥梁结构加固改造的技术路径展开研究,通过分析现状、探讨技术、结合案例、解决问题,为相关工程实践提供理论依据与实践指导。

2 桥梁结构加固改造现状与需求分析

2.1 桥梁病害类型与成因剖析

桥梁病害类型多样,常见的有混凝土病害、钢筋病害以及结构变形等。混凝土病害表现为裂缝、剥落、强度降低等。以北方地区桥梁为例,受季节性冻融循环影响,水分在混凝土孔隙中反复冻结、融化,产生膨胀压力,致使混凝土开裂、剥落,如沈阳部分老旧桥梁就存在此类问题。钢筋病害主要是锈蚀,当桥梁所处环境湿度大、有侵蚀性介质时,钢筋表面的钝化膜被破坏,引发锈蚀,锈蚀产物膨胀会进一步导致混凝土开裂。结构变形则包括梁体下挠、桥墩倾斜等,长期重载交通作用会使桥梁结构产生过大变形。

2.2 加固改造市场需求增长态势

随着交通量的不断增长和桥梁老龄化加剧,桥梁加固改造市场需求呈显著增长趋势。在城市发展进程中,早期建设的桥梁已难以满足日益增长的交通需求,且病害问题频发,

需要进行加固改造。

2.3 现有技术应用的局限性分析

增大截面法虽能提高构件承载力,但会增加构件自重,对下部结构承载能力要求更高,且施工周期长、湿作业多。粘贴钢板加固法对施工人员技术要求高,材料成本和施工费用较高,且钢板的耐腐蚀、耐火性差。粘贴纤维复合材料加固法在提高结构刚度方面效果不佳,防火保护措施复杂且费用高,材料延性较差。体外预应力加固法存在体外索与混凝土变形协调问题,索力增量均匀性控制难度较大。

3 桥梁结构加固改造主流技术路径

3.1 增大截面加固法原理与应用要点

增大截面加固法通过增加构件的截面面积和配筋,提高构件的承载能力。其原理是利用新增混凝土和钢筋与原结构协同工作,共同承受荷载。在应用时,需精确计算新增截面尺寸和配筋量,确保满足设计要求。同时要处理好新老混凝土的结合面,可通过凿毛、植筋等方式增强结合力。

3.2 粘贴钢板加固法技术优势与适用范围

粘贴钢板加固法是用特制结构胶将钢板粘贴在混凝土结构受拉缘或薄弱部位,使钢板与原结构共同受力。该方法施工简便、快捷,加固后能明显提高结构的强度、刚度和稳定性,且基本不增加构件断面尺寸和重量。适用于受弯、受剪和受拉构件的加固,如框架结构的梁、板加固。在实际应用中,要确保钢板粘贴位置准确,粘贴密实,严格控制施工质量。

3.3 体外预应力加固法施工工艺与控制要点

体外预应力加固法通过在混凝土结构外设置预应力索,

对结构施加预应力。施工工艺包括预应力索的布置、张拉和锚固。控制要点在于预应力索的定位准确,避免出现弯折、扭曲;张拉过程中要严格按照设计张拉力和张拉顺序进行,确保索力均匀;锚固系统要可靠,防止预应力损失。在乌金屯松花江大桥加固工程中,采用体外预应力加固,有效提高了桥梁承载能力,解决了桥面病害问题。

3.4 碳纤维增强复合材料 (CFRP) 加固法的创新应用

碳纤维增强复合材料 (CFRP) 加固法是将 CFRP 粘贴在混凝土结构表面,利用其高强度特性提高结构承载能力。创新应用包括采用新型粘贴工艺,如真空辅助粘贴技术,可提高粘贴质量和效率;开发与 CFRP 配套的高性能粘结剂,增强粘结效果。

3.5 其他新型加固技术简介

高强钢绞线网-聚合物砂浆法采用高强钢绞线作为受力钢筋,聚合物砂浆作为粘结剂和保护层,能提高构件的刚度和承载力,具有良好的抗腐蚀性能。如在一些沿海地区桥梁加固中,该方法有效抵御了海水侵蚀,延长了桥梁使用寿命。还有一些智能加固技术,如形状记忆合金加固技术,利用形状记忆合金的特殊性能,在结构变形时自动恢复形状,提供额外的约束力,增强结构的抗震性能,但目前应用相对较少,仍处于研究和探索阶段。

4 预应力连续箱梁加固改造典型案例析

4.1 工程概况

某预应力连续箱梁桥为变截面混合梁连续刚构结构,全长 490m,桥跨布置为 115m+260m+115m,采用左右分幅单箱直腹板箱梁。箱梁顶板宽 13.25m,底板宽 6.7m,根部梁高 13.7m,跨中梁高 4.2m,腹板厚度从跨中 50cm 渐变至根部 90cm,采用三向预应力体系(纵向、横向、竖向)。

病害现状:服役 10 年后,因重载交通及冻融循环影响,箱梁出现以下问题:结构变形:跨中梁体下挠达 28mm(规范限值 15mm);混凝土病害:腹板及底板裂缝宽度最大 0.35mm,局部混凝土剥落;钢筋锈蚀:抽检发现腹板钢筋锈蚀率达 15%,保护层厚度不足。

4.2 加固方案设计

针对病害特点,采用体外预应力加固法为主、碳纤维增强复合材料 (CFRP) 修复为辅的协同方案:

① 体外预应力加固

索体布置:在箱梁腹板外侧对称布置 15-25、15-22 规

格钢绞线,单根张拉力 1950kN,采用 M15 大吨位群锚锚固;工艺要点:预埋 HDPE 波纹管成孔,真空辅助压浆(压浆强度 C50),通过智能张拉设备控制索力均匀性。

② CFRP 局部修复

适用部位:裂缝宽度 $> 0.2\text{mm}$ 区域及混凝土强度不足区段;材料参数: 300g/m^2 碳纤维布(抗拉强度 $\geq 3400\text{MPa}$),配套 A 级结构胶(粘结强度 $\geq 40\text{MPa}$)。

4.3 施工关键技术及数据

4.3.1 体外预应力施工流程

① 支架搭设:采用钢管桩+贝雷梁支架(见图 1),预压荷载为 120% 施工荷载,消除非弹性变形 12mm;② 索体安装:按设计坐标定位波纹管,直线段间距 0.8m、曲线段 0.25m 设置“井”字定位筋;③ 张拉控制:分三级张拉($0 \rightarrow 15\% \sigma_{\text{con}} \rightarrow 30\% \sigma_{\text{con}} \rightarrow 100\% \sigma_{\text{con}}$),实测伸长量误差控制在 $\pm 3\%$ 以内。

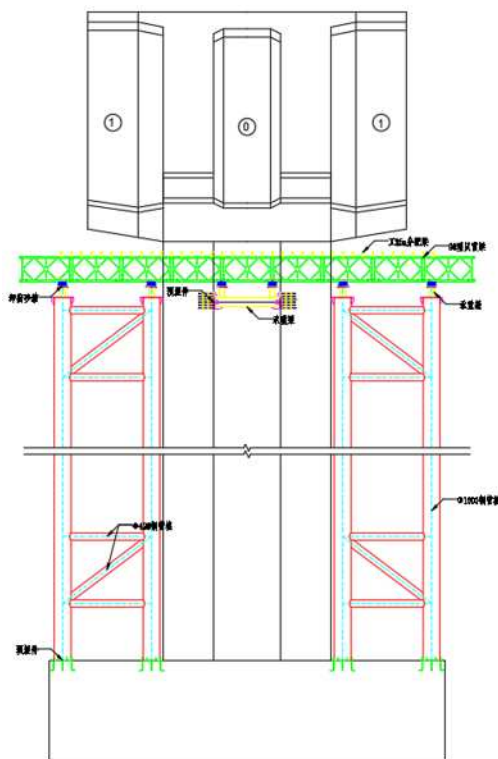


图 1 《0、1# 块支架立面示意图》

4.3.2 CFRP 粘贴工艺

表面处理:凿除疏松混凝土,露出坚实基层,用丙酮清洗表面;粘贴要点:胶层厚度 2-3mm,碳纤维布沿主应力方向搭接 $\geq 100\text{mm}$,用滚筒压实至无气泡。

4.4 加固前后性能对比

表 1 加固前后性能对比表

检测项目	施工前	施工后	规范要求
跨中梁体下挠量 (mm)	28	8	≤ 15
最大裂缝宽度 (mm)	0.35	0.05	≤ 0.15
钢筋锈蚀率 (%)	15	2	≤ 4
承载力 (kN)	2500	3800	≥ 3500

4.5 加固效果分析

4.5.1 变形与裂缝控制

体外预应力通过施加反向荷载 (约 1200kN), 抵消 40% 恒载内力, 跨中挠度恢复率达 71%; CFRP 约束混凝土变形, 裂缝闭合率超 80%, 有效阻止水分渗入 (见图 2)。

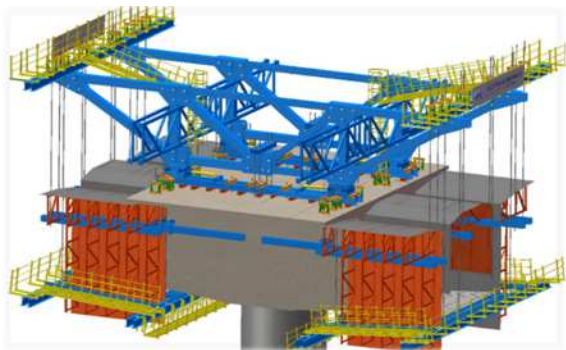


图 2 《挂篮结构示意图》

4.5.2 材料性能验证

加固后检测显示, 体外索应力松弛率 $< 2\%$, 碳纤维布与混凝土粘结强度达 3.2MPa (规范 $\geq 2.5\text{MPa}$); 桥梁静载试验表明, 结构刚度提升 60%, 满足汽 - 超 20 级荷载通行要求。

4.6 结论

该案例采用体外预应力与 CFRP 协同加固技术, 成功解决了预应力连续箱梁的变形与耐久性问题。通过精准计算索力分布、严格控制粘贴工艺, 实现了结构性能的显著提升。数据表明, 加固后桥梁承载能力提升 52%, 裂缝宽度控制在安全范围内, 为同类工程提供了“主动受力加固 + 被动防护修复”的协同技术范本。未来可结合智能监测 (如应变传感器实时跟踪索力), 进一步优化加固效果。

5 桥梁结构加固改造现存问题与改进策略

5.1 技术层面存在的问题与解决措施

不同加固技术之间的协同性不足, 导致加固效果未能充分发挥。例如在一些复杂病害桥梁加固中, 单独使用一种加固技术无法彻底解决问题, 而多种技术组合时, 由于技术之间缺乏协同设计, 出现相互干扰的情况。解决措施是加强

不同加固技术的协同研究, 根据桥梁病害特点和结构受力情况, 制定合理的技术组合方案。在设计阶段, 对不同技术的协同作用进行模拟分析, 优化技术参数, 确保协同效果。加固材料的耐久性和可靠性有待提高。部分加固材料在长期使用过程中, 受环境因素影响, 性能会逐渐下降。比如粘贴钢板加固法中, 钢板容易锈蚀, 影响加固效果。解决措施是研发新型高性能加固材料, 提高材料的耐久性和可靠性。同时加强对加固材料的质量检测和监督, 确保材料质量符合标准。

5.2 施工管理中面临的挑战与优化方案

施工过程中的质量控制难度较大, 由于加固工程通常在既有桥梁上进行, 施工空间有限, 施工环境复杂, 增加了质量控制的难度。例如在体外预应力加固施工中, 预应力索的张拉精度和锚固质量难以保证。优化方案是建立严格的施工质量管理体系, 加强施工过程中的质量检测和验收。采用先进的施工设备和技术, 提高施工精度和效率。对施工人员进行专业培训, 提高其技术水平和质量意识。施工安全风险高, 既有桥梁加固施工时, 需要在不中断交通或尽量减少交通影响的情况下进行, 施工人员和设备在交通流量大的环境下作业, 存在较大安全风险。解决措施是制定详细的施工安全方案, 加强施工现场的安全管理。设置明显的安全警示标志, 合理安排施工时间和交通疏导方案, 确保施工安全。

5.3 成本控制与经济效益提升策略

加固改造工程成本较高, 包括材料成本、施工成本、检测成本等。部分加固技术需要使用昂贵的材料和设备, 增加了工程成本。例如碳纤维增强复合材料加固法, 材料成本相对较高。提升经济效益的策略是优化加固方案设计, 在满足加固要求的前提下, 选择成本较低的加固技术和材料。加强施工管理, 合理安排施工进度, 减少施工时间, 降低施工成本。同时通过提高桥梁的使用寿命和安全性, 带来间接经济效益, 如减少交通拥堵、降低交通事故损失等。

6 桥梁结构加固改造技术发展趋势展望

6.1 智能化监测与评估技术应用前景

利用传感器技术、物联网技术和大数据分析, 实现对桥梁结构的实时监测和智能评估。在桥梁上安装各种传感器, 如应变传感器、位移传感器、裂缝传感器等, 实时采集桥梁的应力、变形、裂缝等数据。通过物联网将数据传输到监测中心, 利用大数据分析技术对数据进行处理和分析, 及

时发现桥梁病害并评估其严重程度,为加固改造提供科学依据。例如在夹河大桥上安装索力传感器,实时监测吊杆索力变化,当索力超出阈值时自动报警,为桥梁维护提供预警。

6.2 新型复合材料与绿色加固技术发展方向

研发新型高性能复合材料,如高强度、高耐久性、轻质的纤维复合材料,用于桥梁加固。这些材料具有更好的力学性能和耐腐蚀性,能够有效提高加固效果,延长桥梁使用寿命。同时发展绿色加固技术,采用环保型材料和施工工艺,减少加固过程中的环境污染。例如采用水性粘结剂代替溶剂型粘结剂,减少挥发性有机物的排放。

6.3 多技术协同应用模式探索

针对复杂病害桥梁,探索多种加固技术协同应用的模式。将增大截面法、粘贴钢板法、体外预应力法和碳纤维增强复合材料加固法等结合起来,根据桥梁病害特点和结构受力情况,制定个性化的协同加固方案。通过不同技术之间的优势互补,提高加固效果,降低加固成本。

7 结论

桥梁结构加固改造对于保障桥梁安全、延长桥梁使用寿命具有重要意义。通过对桥梁结构加固改造现状的分析,明确了病害类型、市场需求和现有技术的局限性。深入探讨了增大截面、粘贴钢板、体外预应力、碳纤维增强复合材料

等主流技术路径的原理、应用要点和适用范围,结合典型案例详细剖析了技术应用过程中的关键环节和加固效果。在实际工程中,应根据桥梁的具体情况,科学选择加固技术路径,确保加固改造工程的质量和效益,为交通基础设施的安全稳定运行提供有力保障。

参考文献:

- [1] 项沛,崔力宁,杨彤.基于桥梁改造的新旧混凝土结构植筋加固粘接技术研究[J].粘接,2023,50(11):98-101.
- [2] 芦凯捷.独柱桥梁钢结构支撑加固改造施工技术研究[J].黑龙江交通科技,2023,46(07):119-121.
- [3] 王熊珏.基于BIM的桥梁结构加固与改造技术及有限元分析[D].湖北工业大学,2016.
- [4] 刘海阔.独柱墩桥梁抗倾覆改造加固技术研究[J].北方交通,2025,(02):25-28.
- [5] 杨科.高速公路桥梁下部结构加固改造分析[J].工程建设与设计,2023,(15):123-125.
- [6] 翟新峰.公路独柱桥梁钢结构支撑加固改造施工技术研究[J].工程机械与维修,2022,(02):179-181.

作者简介:林建楠(1998.04),男,汉,福建福鼎人,本科,职称:申报中级(目前初级),研究方向:道桥工程。