

老旧桥涵承载能力提升的加固改造设计方法

周翔

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘要 为了提升老旧桥涵在复杂荷载与水力冲刷下的整体承载能力, 采用构件增强、体系转换、基础处治等多元协同的加固改造技术路径, 对典型桥梁与涵洞结构开展结构重构与性能恢复设计。以某城区 T 梁桥与箱涵联合体为例, 分析病害机制并实施系统加固。结果表明, 涵洞结构通过内衬加固与水流适应性优化实现渗透控制与结构稳定性显著增强, 桥涵整体变形协调性与耐久性能同步提升。

关键词 老旧桥涵; 承载能力; 加固改造

中图分类号: U442

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.09.030

0 引言

随着桥梁基础设施服役年限增长, 老旧桥涵因结构退化、荷载超限及规范滞后等问题广泛存在承载力不足与安全隐患, 严重制约交通系统运行效率。为系统提升桥梁与涵洞结构的整体服役能力与耐久性能, 需构建基于材料补强、力学路径重构与地基协同治理的加固改造设计方法体系, 尤其在涵洞结构中, 底板沉陷、接缝变形、混凝土劣化与排水功能丧失等病害普遍存在, 需在传统桥梁加固思路基础上引入涵洞水文适应性、防渗性能恢复与结构抗冲刷能力重构等关键策略, 实现涵桥一体的协同治理。

1 老旧桥涵承载能力下降的主要原因分析

老旧桥涵因混凝土碳化、氯离子侵蚀、冻融循环等作用, 导致保护层劣化、钢筋锈蚀, 削弱受力截面, 降低抗弯抗剪强度; 钢结构则受疲劳裂纹与腐蚀穿孔影响, 易产生应力集中^[1]。长期积水及防水失效加剧渗水侵蚀, 服役年限增长致承载力持续衰退。超限荷载比例升高使早期按公路—I 级、铁路—ZC 级设计的桥涵无法满足现行需求, 叠加抗震、抗冲刷、防撞能力不足, 隐患突出^[2]。

2 老旧桥涵承载能力加固改造设计方法

2.1 构件增强补固技术

在老旧桥涵构件承载力下降的背景下, 构件增强补固技术需从力学性能恢复与耐久性提升双重目标同步展开。针对钢筋混凝土梁板类构件, 通过粘贴 CFRP 或配置外包型钢提升截面有效刚度, CFRP 粘贴长度宜不小于跨中净跨的 40%, 典型厚度控制为 1.2~2.0 mm,

拉伸弹性模量 $\geq 2.3 \times 10^5$ MPa, 以确保应力重分布稳定。与桥梁上部构造类似, 涵洞箱涵顶板及立墙在长期水流冲刷、车辆荷载与环境侵蚀作用下亦普遍出现裂缝扩展、钢筋锈蚀、节点剪切失稳等问题^[3]。

对于墩柱、桥台等竖向承重构件, 补强设计应以约束提升和整体刚度恢复为核心导向。当原结构混凝土碳化深度超过 15 mm、钢筋保护层剥落面积占比超过 20% 时, 需采用环箍钢带或碳纤维布环抱包裹进行体积约束增强, 其环向拉应力不得小于 2.5 MPa, 以确保在地震或冲击荷载作用下具备足够的塑性耗能能力。在预应力 T 梁端部疲劳裂纹控制中, 广泛采用锚板外贴 + 高强螺杆限位装置形成主动夹持力, 设计张拉力宜控制在 0.6~0.7 倍屈服强度区间, 以保障钢构件稳定性不被扰动应力破坏。加固材料与原构件界面应设置界面剂粘接剪应力上限值不超过 1.5 MPa, 并通过拉拔试验验证耐久锚固性能。

2.2 体外预应力技术

体外预应力技术可有效提升桥梁结构承载力与延性, 适用于预应力耗损严重或布置不合理的老旧 T 梁桥加固。实施时须依据主梁受力路径与残余内力分布优化筋材布置, 形成协同受力体系。常用 $\Phi 15.2$ mm、1860 MPa 级七股低松弛钢绞线, 张拉控制应力为抗拉强度的 65%~70%。若跨中挠度超限或腹板裂缝扩展, 应于中跨与端部设置对称体外筋, 并采用可调锚头抑制裂缝扩展。锚固系统需结合梁端尺寸与混凝土强度配置 U 型锚具与钢板压座, 并以钢筋网增强抗剪性能。张拉施工应分级控制, 误差限于 $\pm 5\%$, 并在张拉后 72 小时内监测挠度与裂缝响应^[4]。与桥梁结构不同, 涵

作者简介: 周翔(1990-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 新能源项目风电道路设计。

洞整体性强、构件截面闭合、受力路径稳定,通常不采用体外预应力方式进行加固。在涵洞顶板承压能力不足、立墙出现受压屈曲或节点剪切失稳等情况下,宜采用内衬钢筋混凝土板、喷射混凝土加固、裂缝注浆封闭等方式形成新的受力单元,使整体刚度提升并恢复通水断面。同时,通过在顶板内设置局部短向构造筋或局部加厚段,可改善涵洞在集中荷载作用下的抗冲击性能。该加固路径与桥梁预应力体系存在实质性差异,但在提升结构整体性能上的逻辑一致。

2.3 体系转换与整体加固技术

对于破坏模式复杂、局部加固难以满足整体性能恢复要求的老旧桥涵,需采用结构体系转换与整体加固技术,重构受力路径与变形协调机制。该方法适用于T梁跨径 > 20 m、裂缝累计长度 $>$ 总跨长20%、桥面连续性破坏或支承系统病害严重的桥涵^[5]。在桥梁设计中,宜通过简支梁转连续梁构造湿接缝(长度 \geq 梁高1.2倍,配筋率1.2%~1.8%),结合纵向预应力或横隔梁实现跨径协同,使跨中弯矩降低15%~25%、挠度下降20%以上。涵洞结构出现顶板下挠、侧墙剪裂、接口错台时,可设置120~160 mm厚钢筋混凝土内衬二衬,内灌强度 ≥ 40 MPa的非收缩浆体以改善整体刚度。对水流冲刷区涵洞入口及急转断面,采用“端部圈梁+加密环带”构建整体约束单元,配筋率1.0%~1.4%;顶板纵裂或薄弱区增设厚 ≥ 180 mm的帽梁,经植筋连接提升抗弯刚度。桥梁支承转换采用中性轴内移式钢构托换结构,配容许位移 ≥ 100 mm的滑移支座,节点局部压应力不超混凝土抗压强度70%。涵洞进出口布设抗弯楔块与加劲肋(楔块高 \geq 净高1/12),配环向箍筋抑制剪切变形,确保传力连续性。加固后应分别对桥梁与涵洞进行有限元建模,涵洞模型重点关注环向拉应力、土压力不均及水流冲击,验证其在静载、动载与温度荷载下的协同变形能力,满足相关桥涵评定标准要求。

2.4 基础加固与桥台处治技术

针对老旧桥涵在长期运营中普遍存在的基础不均匀沉降、承载力不足及背部沉陷问题,基础加固与处治设计需以地基承载能力恢复与结构变形协调控制为核心。涵洞因处于覆土环境并长期受水流冲刷,其底板承载力下降、侧墙接头错台与环向受力不均尤为突出。对于底板沉陷超过规范限值($L/1\ 000$)的涵洞,可采用钢筋混凝土托换板与注浆固结组合方式实现整体抬升,托换板厚度宜为200~260 mm,边缘与侧墙需设置连系筋形成整体底盘,提高地基反力分布均匀性。在出口侧墙出现剪裂、倾斜或环向弯曲变形时,应采用预

应力锚杆结合刚性封闭钢框架构建侧向约束体系,锚杆设计拉力不小于90 kN,框架内部灌注强度 ≥ 40 MPa的非收缩浆料,使侧墙水平变位保持在 ± 5 mm以内。涵洞进出口过渡段易出现路基附加应力集中与错台跳车问题,应设置复合搭板与柔性过渡带。搭板厚度不小于160~200 mm,其端部需加设植筋抗滑单元,使涵洞顶板与路面结构变形协调,避免因车辆冲击导致结构阶跃放大。对水流冲刷较强的涵底,可布设浆砌片石护底与固结注浆帷幕,注浆压力宜控制在0.3~0.6 MPa,固结范围覆盖涵底两倍宽度区,以提高抗冲刷能力及底板承载力。

在桥台部分,应解决台背空洞、车辆荷载引起的周期性沉陷及桥头跳车等问题。当空洞深度超过200 mm、连续长度超过1.5 m时,应采用水泥-水玻璃双液注浆法填充,单孔注浆压力控制在0.3~0.5 MPa,注浆量不小于 0.8 m³/m。应在台背设置双层土工格栅,拔拉强度不低于35 kN/m,并配置整体式桥头搭板(板厚 ≥ 180 mm,锚固长度 ≥ 600 mm),形成柔刚过渡结构,提升台背刚度连续性。涵洞基础治理还需重点关注水位变化对地基有效应力的影响,应设置水位监测孔与沉降观测点,对涵洞底板、侧墙接口及加固层进行至少3个月的变形监测,评估固结注浆均匀性与地基稳定性。

3 工程实践与应用

3.1 案例背景

某城区K11+480处桥涵由三跨预应力混凝土简支T梁桥(3 \times 20 m)与下承式钢筋混凝土箱涵联合构成。桥梁建于2002年,桥宽12.5 m,采用U型桥台与扩大基础;涵洞净宽4.2 m、净高3.6 m,承担汇水区排洪功能。该桥涵体系作为南北主干通道的重要节点,通行量达3.6万辆/日,重载比例21%,涵洞长期受车辆附加动荷载及周期性水流冲刷双重作用。服役20余年未实施系统加固,既有桥梁出现贯通裂缝、支座偏移及不均匀沉降(差值达24.3 mm),涵洞结构亦产生顶板受压开裂、侧墙剪切裂缝、水流冲刷导致的进出口错台(最大18 mm)及渗水扩散带等典型病害。上述病害反映出桥涵体系在耐久性、承载能力及水荷载适应性方面均存在结构退化。本项目作为区域典型老旧桥涵整治工程的代表性案例,为后续加固技术路径、材料体系匹配及系统治理策略的选型提供了实践基础与验证平台。

3.2 加固改造实施技术要点

本工程加固设计以桥梁与涵洞的协同性能恢复为目标,构建由构件修复、体系转换、支座更换、地基与水力稳定性提升组成的综合加固体系。项目组根据结构病

害分布特点, 将桥梁与涵洞分别分区制定技术措施, 确保施工过程中不影响交通通行, 同时控制关键阶段的应力重分布风险。在主梁补强方面, 采用 CFRP 板粘贴与体外预应力联合方案, 布设三道碳纤维板 (厚 1.4 mm、宽 120 mm、有效粘结长度大于 1.8 m), 并外加四束 15.2 mm 体外钢绞线, 张拉应力 1 100 MPa。桥台基础采用 $\Phi 500$ mm 高压旋喷桩, 深度 12 m, 间距 1.2 m, 构建复合地基筏板结构, 同时将原损坏支座更换为水平位移容许量 100 mm、转角容许值 0.02 rad 的聚四氟乙烯滑板支座。施工中布设跨中应变、支座反力、桩身变形监测点进行动态监控, 确保补强体系受力稳定。

在涵洞部分, 针对顶板受弯不足与侧墙剪切损伤, 采用“内衬二衬层+接口注浆+进出口刚度强化”的综合加固路径。顶板内衬采用 140 mm 厚 C40 二衬混凝土, 并通过直径 12 mm 的植筋与原结构可靠连接, 以提高整体抗弯能力。侧墙采用封闭钢框架与预应力锚杆加固, 锚杆设计拉力不低于 100 kN, 框架内部灌注非收缩浆料, 消除剪切裂缝扩展风险。涵洞进出口错台采用钢筋混凝土楔块平整, 楔块厚度 120 ~ 160 mm, 内部布设横向加密筋, 改善行车荷载与水流冲击造成的附加应力。为提高抗冲刷能力, 在涵底布设 0.6 MPa 压力的固结注浆帷幕, 形成连续防护带, 并增设双层防渗水泥基涂层以阻断渗水路径。桥梁与涵洞加固体系通过统一的监测体系校核其受力耦合性, 使两类结构在交通荷载与水流冲击作用下均保持稳定的力流传递过程。

3.3 加固改造实施效果

加固完成后, 项目组从应变、位移、裂缝控制、基础沉降、水流作用响应等维度对桥梁与涵洞进行综合评估。评估方法采用静载试验、现场监测与有限元模拟三种技术路径交叉验证, 监测周期覆盖通车后连续 90 天。监测点包括桥梁跨中与支点、台背沉降点、涵洞顶板跨中、侧墙中高程及进出口错台控制点, 具体性能指标对比结果详见表 1 与表 2。

表 1 桥梁与涵洞关键断面加固前后性能对比

结构部位	指标	加固前	加固后
桥梁跨中	最大挠度 (mm)	38.6	27.7
	主拉应变 ($\mu\epsilon$)	225	148
	裂缝宽度 (mm)	0.34	0.18
涵洞顶板	最大竖向变形 (mm)	9.8	4.1
	环向拉应变 ($\mu\epsilon$)	186	92
	渗水带宽度 (mm)	12.5	3.4

表 1 数据显示, 桥梁加固后最大挠度减少 28.3%, 主拉应变下降 34.2%, 裂缝宽度降低 47.1%, 表明结构刚度与耐裂性能显著提升。涵洞顶板加固后竖向变形下降 58.2%, 环向应变下降 50.5%, 渗水带宽度缩减 72.8%, 反映出二衬内衬与接缝封闭体系在提升承载与防渗性能方面具备显著效果, 涵洞结构安全性与耐久性同步增强。

表 2 桥台与涵洞基础加固前后沉降与错台指标对比

监测点位	初始值	加固后	改善率
台背 A 点沉降 (mm)	18.6	3.4	81.70%
台背 B 点沉降 (mm)	21.2	2.9	86.30%
中桩区沉降 (mm)	9.7	2.1	78.40%
涵洞出口错台 (mm)	18	3	83.30%
涵洞侧墙水平位移 (mm)	5.8	1.6	72.40%

表 2 结果显示, 台背与中桩区沉降量分别下降 81.7%、86.3% 与 78.4%, 地基加固后差异沉降显著缓解。涵洞错台由 18 mm 降至 3 mm, 改善率 83.3%, 侧墙水平位移下降 72.4%, 表明钢筋楔块、注浆帷幕与约束结构有效控制了涵洞基础及连接部位的变形趋势, 显著提升结构整体协同稳定性与服务性能。

4 结束语

老旧桥涵加固改造需从构件修复、体系转换至地基协同治理多维联动, 形成结构—水力—地基一体化提升路径。在桥梁结构中, 预应力重构与材料增强技术可显著恢复承载性能; 涵洞加固则需注重内衬体系、防渗体系与水流冲击适应性的融合。未来应进一步建立以性能评估为导向的桥涵协同设计标准, 提升加固方案在不同服役阶段下的适应能力, 推动老旧基础设施治理体系科学化与工程化发展。

参考文献:

- [1] 朱莉. 预应力碳纤维板在空心板梁桥加固工程中的应用 [J]. 交通世界, 2025(29):172-174.
- [2] 王涛. 公路大跨度混凝土连续梁桥加固和养护施工技术研究 [J]. 工程机械与维修, 2025(10):37-39.
- [3] 张上慧. 公路桥梁养护管理与危桥加固改造研究 [J]. 运输经理世界, 2025(27):157-159.
- [4] 张立乾, 杨延军, 张孝春, 等. 一种旧桥涵加固支撑结构研究 [J]. 山西建筑, 2025, 51(13):174-177.
- [5] 王伟伟. 钢筋混凝土箱涵加固设计研究 [J]. 四川水泥, 2023(01):222-224.