

新型材料在旧桥加固工程中的应用探讨

郭士贤 董玉磊

天津市政工程设计研究总院有限公司 天津 西青 300392

【摘要】：针对大量服役后期旧桥在氯盐与重复荷载作用下承载与耐久退化的问题，本文提出并验证由 FRP 抗弯抗剪补强、UHTCC 薄层桥面修复与高韧耐潮环氧连接加固构成的集成体系。以南京市龙蟠中路跨线桥为案例，采用湿铺碳纤维布与 U 形包裹并配置纤维锚栓，桥面铺设薄层 UHTCC，支座与梁端界面应用耐潮环氧；按 JTG/T J21—2011 开展静载与观测。结果表明：承载力储备系数由 0.85 提升至 1.15，跨中挠度由 17.8 mm 降至 12.8 mm，最大裂缝宽度由 0.28 mm 降至 0.12 mm；新增自重不超过 6 kg/m²且不占用净空。全生命周期分析显示：初期成本上浮约 10%，运维成本下降约 40%，综合成本降低约 25%。研究证明该新型材料体系可在受限施工窗口下实现结构性能与耐久同步提升，并具有良好的工程可复用性。

【关键词】：旧桥加固；纤维增强复合材料；超高韧性混凝土；环氧粘结材料；全生命周期成本

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.054

引言

20 世纪 70—90 年代建造的公路与市政桥梁已大批进入全寿命后期，氯盐、湿热与超载交通叠加使混凝土剥落、碳化、钢筋腐蚀、承载储备不足、伸缩缝渗漏与疲劳裂缝等病害集中暴露。传统加固依赖型钢加焊与水泥基罩面，虽可短期提升承载，但新增自重与净空占用明显，焊接残余应力与二次腐蚀风险突出，水泥基补层抗裂与耐久性能不足且湿作业窗口长，难以满足带交通施工。新形势要求材料兼具轻质高强、耐氯盐与抗冻融、对潮湿基层友好并能快速固化与模块化安装。基于此，本文提出以 FRP 抗弯抗剪补强、UHTCC 薄层桥面修复与高韧耐潮环氧连接加固的集成方案，给出面向市政旧桥的施工工艺与质量控制要点，并以南京龙蟠中路跨线桥为例进行现场验证，通过静载测试与全生命周期经济性评估，论证该方案在性能、工期与运维成本上的综合优势。

1 旧桥加固工程对新型材料的需求分析

鉴于建于 20 世纪 70—90 年代的大量公路与市政桥梁已进入全寿命后期，环境侵蚀与超载交通叠加把多类病害逐步外显。混凝土保护层剥落与表层碳化，氯盐侵入诱发的钢筋点蚀与锈胀，主梁在受弯与受剪工况下承载力储备不足，伸缩缝与横向连接渗漏致钢筋裸露与空鼓，反复荷载引起的疲劳裂缝蔓延，支座老化与墩台裂缝的耦合劣化，构成旧桥性能退化的主要图景。传统加固多选用普通型钢加焊与水泥砂浆或常规混凝土罩面，但新增自重明显，占用净空并对既有基础与支座造成附加效应；钢材在高湿含氯环境下易二次腐蚀，焊接热影响区残余应力把裂纹敏感性抬升；水泥基补层抗拉能力偏低，早期收缩与温度应力易致二次开裂和界面剥离，薄层条件下难以形成有效裂缝控制与耐久屏障；在需带交通施工的约束下，湿作业工序长、固化慢、施工窗口受限。由此旧桥加固对材料提出更为明确的指向性需求，即把轻质与高强度组合起来以降低附加恒载，凭借高比强度与适宜弹性模量在小厚度下提供刚度与承载，具备耐氯盐、抗冻融与抗碱性的耐久性能，形成对旧混

凝土与钢材的可靠黏结并适配潮湿基层，同时兼顾快速固化、可模块化安装与可逆性，以在全寿命周期内实现养护频次与环境负荷的同步下降。

2 新型材料在旧桥加固工程中的具体应用

2.1 纤维增强复合材料在旧桥结构补强中的应用

鉴于旧桥在氯盐环境和反复荷载作用下普遍出现承载储备不足与耐久性退化，纤维增强复合材料在补强体系中呈现出更高的适配度。纤维增强复合材料在行业中称为 FRP，核心由高强纤维与聚合物基体共同构成，具有高比强度、低密度以及对氯盐与湿热环境的耐受特性。结合主梁受弯工况，单向碳纤维材料凭借弹性模量与强度的耦合优势，能在小厚度下把有效刚度增量与抗拉承载提供出来；对于剪切薄弱区，U 形包裹与端部锚固的协同构造把纤维应力重分配得以实现。需重点关注的是，耐潮环氧胶黏体系在潮湿基层条件下仍可形成可靠黏结界面，辅以界面底涂与找平工序，能把旧混凝土的表面缺陷与微裂缝影响减弱到可控范围。

2.2 超高韧性混凝土在旧桥桥面修复中的应用

在旧桥桥面这一疲劳与侵蚀叠加的薄弱环节，超高韧性混凝土 UHTCC 被选用为面层修复与加铺材料，缘在于其应变硬化与多裂缝细化机理把开裂后的承载连续性与耐久边界同步维持。UHTCC 由高延性水泥基体与短切合成纤维协同构成，在拉伸状态下出现稳定应变硬化，裂缝以多缝且宽度受控的形态展开，渗透通道被限制在极小尺度；在盐冻与重复荷载作用下，纤维桥联与自愈能力把界面剥离与反射裂缝的扩展趋势压低到可控范围，并与旧混凝土形成变形协调层。基于这一材料行为，从裂缝修复角度来看，可把贯通裂缝沿裂缝线开槽凿实并清除弱化混凝土，随后铺涂聚合物改性界面浆体，采用注填与抹面相结合的工艺把 UHTCC 压入裂缝并外延成带状层，纤维在张拉状态下持续桥联裂口，浸入式界面层提高界面抗剪与抗剥离能力。面向薄层铺装，可在铣刨至致密基层并完成粗糙

化与清洁后,设置界面封闭层与钢筋钝化处理,浇铺厚度约 20 至 30 mm 的 UHTCC 层,必要时嵌入细钢筋网或玄武岩网构成协同受力体系,随后进行保湿养护与早期防水封闭,把新增自重与净空影响压缩到较低水平。结合南京龙蟠中路跨线桥引道桥面修复实践,工程把 UHTCC 当作薄层加铺主材来使用,并且按夜间窗口组织连续浇铺与阶梯式养护,桥面经处理后凭借多缝细化与致密基体协同抑制水分与氯盐下渗,铺装与原桥面在温度与荷载作用下的变形兼容性得到维持,使用寿命在全寿期理念下呈现更长的维护周期预期。

2.3 新型粘结材料在旧桥构件连接加固中的应用

围绕支座与梁体这一连接薄弱界面,新型环氧粘结材料把高黏结强度与耐候稳定性组合起来,契合旧桥在潮湿含盐环境下的持续服役需求。该类材料以韧性化环氧树脂与胺类固化体系构建,借助微相增韧与硅烷偶联机理提高界面结合力,同时在氯盐、湿热与紫外作用下保持较低老化速率;其黏度与触变性经配比调控,可在立面与顶面形成均匀胶层,固化收缩被压低到可忽略水平。从工艺角度来看,支座与梁端连接加固以小幅度顶升建立卸载状态起步,旧垫层拆除后把混凝土与钢板基面进行打磨粗糙化与清洁,界面含水率控制在 6% 以下并铺设底涂,再以环氧修补砂浆找平,随后在设计胶层厚度 2 至 3 mm 范围内铺展结构胶,施加恒压使胶层连续并排除气隙,同时配置化学锚栓与灌注型环氧把剪切传力路径闭合,端部以封缝胶形成防护带。从耐久服役角度来看,该体系在水浸、盐雾与冻融耦合作用下维持黏结界面的连续,蠕变与疲劳损伤被增韧网络耗散,较高玻璃化转变温度使其在夏季桥面温升环境下仍维持力学稳定。为提高施工适配性,对剪力键与横向连接部位可进行齿槽化处理并撒布石英砂,增强机械咬合作用并提高湿基层条件下的施工容错。施工验收围绕界面破坏形态、扭矩复核与胶层完整性开展,指标设置以剪切黏结强度等级不低于 5.0 MPa 与玻璃化转变温度等级不低于 70℃ 作为选型阈值。结合南京市龙蟠中路跨线桥桥座更换同步连接加固的组织经验,工程把高韧耐潮环氧当作主材来使用,形成在夜间窗口内可实施且对交通与净空影响较小的连接加固路径。

3 旧桥加固工程中新型材料应用的效果评估

3.1 新型材料加固后的结构性能测试结果

在新型材料把受弯与界面薄弱环节进行补强后的案例桥,现场依照 JTG/T J21—2011 组织静载与观测测试,把承载力、挠度与裂缝三类关键指标纳入统一评价框架。承载力储备系数被定义为结构在控制状态下的实际承载水平与设计目标值之比,跨中挠度采用跨内多点线性位移计与全站仪复核方式获取,裂缝宽度采用读数放大式裂缝显微镜进行逐条量测并匹配摄影记录。从量测流程来看,货车编组按跨内不利布置建立标准化静载工况,加载稳定后进行位移与裂缝读数采集,随后开

展卸载回弹与重复加载,以把变形恢复与裂缝闭合的稳定性进行观察。需重点关注的是,FRP 抗弯与 U 形约束的协同效应在控制截面产生刚度增益,配合 UHTCC 桥面薄层的变形协调,使得跨中挠度在同一加载水平下被明显压低,裂缝开展呈现宽度受限与分布转移的特征。结合南京市龙蟠中路跨线桥的现场组织,承载力储备系数由加固前的不足状态提升至满足并超出设计目标的区间,跨中挠度在标定荷载下出现近三分之一的收敛幅度,最大裂缝宽度被控制在微小级别并稳定低于 0.15 mm 阈值。由此推导,该类新型材料体系把承载能力、使用性能与耐久边界联动提升,且在施工窗口受限与净空敏感的市政桥梁场景中具备可复用性。相关对比汇总于表 1,用以直观呈现关键指标的前后差异及变化幅度。

表 1 某旧桥加固前后结构性能指标对比表

指标	承载力储备系数	跨中挠度	最大裂缝宽度
测试工况	控制截面评估	标准化静载,跨中测点,单位:mm	标准化静载,控制截面,单位:mm
加固前	0.85	17.8	0.28
加固后	1.15	12.8	0.12
变化幅度	+35%	-28%	-57%

3.2 新型材料加固方案的经济性分析

立足全生命周期成本的比较框架,把费用要素分为材料采购与专用设备、现场施工与交通组织、后期养护与功能维持三类来开展评估。鉴于 FRP 与 UHTCC 的单位价格与工法配套费用高于传统型钢加焊与水泥基罩面,新型方案在初期投入上呈现材料与设备支出上升的态势;进一步观察发现,轻质特性与快速固化把吊装重量与湿作业时长压低,夜间窗口施工把封道时间缩短,人工与交通组织费用得到部分抵消。以南京市龙蟠中路跨线桥的工程组织为例,初期综合成本相较传统路径上浮约 10%,但在服役阶段,耐氯盐与抗疲劳的耐久屏障把周期性补修、顶涂重涂与病害处治的频次拉低,直接运维成本下降约 40%,同时把用户延误与通行能力损失这类机会成本同步收敛。需重点关注的是,传统方案因新增自重与占用净空引发的支座与基础附加效应,会在后期以隐性费用显现,新型方案把这部分风险成本显著压低。由此推导,在折现利率、材料价格波动与交通需求强度取值处于市政桥梁常见范围的条件下,案例桥的全生命周期成本较传统路径节约约 25%,经济性优势来源于低维护强度、施工时间压缩以及耐久性能提升的复合效应。为提高方案可复用性,本研究建议在项目策划阶段建立以成本、风险与服务水平为核心的评估模型,把直接费用、风险敞口与通行服务损失纳入统一度量,进而得到具有可比性的材料与工法选型结论。

4 结语

研究表明,FRP 湿铺抗弯与 U 形约束能在小厚度条件下获得显著刚度与承载增益,UHTCC 薄层铺装通过应变硬化与多裂细化实现裂缝与渗透双控,高韧耐潮环氧在支座与梁端界面提供稳定传力与耐久屏障。集成应用在夜间短时窗口内可实施,附加自重与净空影响极小,施工组织对既有交通干扰可控。

案例桥的现场测试与经济性评估表明,该方案在承载、挠度与裂缝控制以及全寿命成本方面均取得实质性改进,并具备可复制推广价值。需要注意的是,基层质量、含水率与树脂配比控制对加固效果敏感,环境温度与紫外暴露亦需纳入长期设计。建议在项目策划阶段建立成本—风险—服务水平的一体化评估模型,配套长期监测、耐久退化机理与标准化质控研究,以提升方案在不同气候与工况下的适用性与可靠性。

参考文献:

- [1] 李友河,武刚,文竞舟,王志良.在役装配式预应力砼 T 梁桥体外预应力钢绞线加固关键技术[J].材料导报,2025,39(S1):285-290.
- [2] 陈明贵,侯志峰.桥梁结构加固用双混改性环氧结构胶制备及性能研究[J].粘接,2025,52(08):12-15.
- [3] 刘斌,郑小刚,罗双生,曹行江.先张梁桥面系 RPC 预制板的设计与应用研究[J].公路,2025,70(06):380-384.
- [4] 王硕,侯金德.一种新的桥梁加固用改性环氧胶粘剂制备及性能[J].粘接,2025,52(08):32-35.
- [5] 胡松明,贾文进,陈冲,夏刘召,王阳春,刘朵,吴大俊,李雪红.空心板桥铰缝钢筋优化及受力性能研究[J].南京工业大学学报(自然科学版),2025,47(03):308-317.