

水利工程结构耐久性与加固新技术研究

徐志鹏

山东兴立建设工程有限公司 山东 淄博 255000

摘要: 本文针对水利工程结构服役耐久性病害问题,分析坝体、水闸等水工结构设计标准与病害类型,剖析环境、水环境及人为运维三大损伤机理,阐释结构性能劣化规律。梳理高性能改性材料、纤维复合材料、微创地基加固、绿色生态加固四类新技术,结合老旧水闸工程开展应用验证,对比传统工艺凸显综合优势,剖析技术现存短板,提出智能化、低碳化发展方向,为水工结构病害修复与长效加固提供理论与实践支撑。

关键词: 水利工程; 结构耐久性; 加固新技术

引言: 国内大量水利工程步入中后期服役阶段,水工结构长期受多场耦合作用,冻融破坏、钢筋锈蚀、砂浆风化、地基渗漏等病害频发,结构承载力、防渗抗滑性能持续衰减,威胁工程运行安全。传统加固技术存在工期久、耐久度弱、生态扰动大、运维成本高等弊端,难以适配现代工程延寿需求。为此本文探究结构损伤机理,整合新型加固技术体系并落地工程应用,助力水工结构安全运维与提质改造。

1 水利工程结构耐久性损伤机理及影响因素分析

1.1 水利工程常见主体结构类型及耐久设计要求

(1) 坝体、水闸、渡槽、护坡主流水工结构工况特点: 坝体长期承受高水压与温度变化作用,水闸受周期性启闭动水冲击,渡槽承担输水荷载及温差应力,护坡则面临干湿交替与波浪淘刷。各类结构均处于复杂水-力-环境多场耦合条件,服役环境严苛。(2) 水工混凝土、砌体、钢筋结构耐久性设计标准: 依据SL191及DL/T5057等规范,水工混凝土需满足抗冻等级(如F150-F300)、抗渗等级(如W6-W12)及抗侵蚀性要求;砌体结构控制砂浆强度及饱满度;钢筋结构则要求足够保护层厚度($\geq 50\text{mm}$)并采取阻锈措施。(3) 水环境下结构服役耐久年限管控指标: 设计使用年限一般为50年(大型)或30年(中小型),关键管控指标包括混凝土碳化深度限值、氯离子扩散系数、冻融质量损失率、钢筋锈蚀电位及抗渗安全系数^[1]。

1.2 水工结构典型耐久性病害类型及特征

(1) 混凝土结构: 溶蚀导致钙溶出、孔隙率增大;冻融破坏引发表面剥落及内部微裂纹扩展;碳化使pH值降低,钝化膜失效;钢筋锈蚀产生体积膨胀(2-4倍),造成顺筋开裂及保护层崩落。(2) 砌体水工结构: 裂隙扩张破坏整体性及防渗能力;砂浆风化(硫酸盐侵蚀、溶解失粘)降低胶结强度;渗透破坏表现为管涌、流土

及接触冲刷,严重时引发结构失稳。(3) 基础岩土结构: 冲刷掏空造成底部悬空及不均匀沉降;沉降变形导致上部结构附加应力及开裂;抗渗性能衰减加剧水力劈裂及渗透变形风险。

1.3 结构耐久性核心影响因素及损伤机理

(1) 自然环境因素: 温变产生温度应力疲劳,冻融循环引发孔隙水结冰膨胀(体积膨胀约9%),干湿交替促进盐结晶压及收缩开裂,三者协同加速损伤累积。(2) 水环境因素: 水体中 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子渗透扩散,诱发钢筋脱钝及钙矾石/石膏型膨胀侵蚀;酸碱腐蚀(低pH)溶解水泥石;水力冲刷产生磨蚀及空蚀作用,磨损表层并暴露内部缺陷。(3) 人为与运维因素: 施工缺陷(振捣不实、养护不足、保护层偏差)形成初始劣化通道;运维不当(清淤不及时、裂缝未修补、排水失效)加剧损伤扩展;荷载过载(超设计水位、地震、淤积超重)引发超限应力及加速老化。

1.4 耐久性损伤对水利结构整体性能劣化规律

(1) 结构力学承载性能衰减规律: 随碳化深度增加、钢筋锈蚀截面损失、混凝土强度退化及粘结力下降,结构抗弯、抗剪、抗压承载力逐步降低,刚度退化,变形能力减弱,安全储备缩小。(2) 水工结构防渗、抗滑安全性能劣化特征: 裂缝扩展及孔隙率增大导致渗透系数上升,渗流量增加,扬压力升高,防渗体系失效;基底掏空、摩擦系数降低及排水孔堵塞使抗滑稳定安全系数持续下降,最终可能引发滑动失稳。

2 水利工程结构主流加固新技术体系研究

2.1 高性能改性材料加固技术

(1) 超高性能混凝土(UHPC)薄层加固技术原理: 利用UHPC超高强度(抗压 $\geq 120\text{MPa}$)、高耐久性 & 优异粘结性能,在受损水工结构表面浇筑10~30mm薄层,通过界面植筋或粗糙化处理形成协同受力体系,显著提

升抗裂、抗渗及承载能力,且自身抗冻融、抗冲磨性能优异。(2)环氧改性注浆材料裂隙封堵加固工艺:采用低黏度、高渗透性环氧树脂改性浆液,通过压力注浆充填混凝土或砌体结构的细微裂隙($\geq 0.1\text{mm}$),固化后形成高强度、高粘结的致密填充体,兼具补强与防渗双重功效,适用于有水或微潮环境下的裂缝修复^[2]。(3)水性防腐耐久涂层防护加固技术:以水性环氧或聚脲为基料,涂覆于水工结构表面(厚度 $0.5\sim 2\text{mm}$),形成高附着、耐水、耐化学侵蚀的弹性保护层,有效阻隔氯离子、硫酸根及水分渗透,延缓钢筋锈蚀与混凝土碳化,且环保低VOC。

2.2 纤维复合材补强加固新技术

(1)碳纤维布(CFRP)水工结构抗弯加固技术:将CFRP片材通过浸渍树脂粘贴于梁、板等受弯构件受拉区,利用其高抗拉强度($\geq 3400\text{MPa}$)及轻质特性,提高结构抗弯承载力与刚度,延缓裂缝扩展,且不显著增加自重,适合水闸工作桥、渡槽槽身等部位。(2)玄武岩纤维复合材耐水防腐加固优势分析:玄武岩纤维(BFRP)耐碱、耐酸、耐盐雾性能优于玻璃纤维,且成本低于碳纤维。其与环氧树脂复合后在潮湿水下环境中界面粘结强度保持率超过85%,无电化学腐蚀风险,特别适用于水位变动区及侵蚀性水环境。(3)纤维加固工艺适配潮湿水工工况优化方案:采用水下固化型环氧树脂、真空辅助灌注或预浸料湿法铺层工艺;增设界面锚固件(如不锈钢钉)及多层搭接;施工前局部排水、热风干燥或等离子处理,确保潮湿基面有效粘结强度 $\geq 1.5\text{MPa}$ ^[3]。

2.3 微创无损加固与地基加固新技术

(1)高压旋喷复合注浆地基防渗加固技术:利用高压($\geq 20\text{MPa}$)旋转喷射流切割扰动地层,同时注入水泥-水玻璃或超细水泥浆液,形成直径 $0.6\sim 1.2\text{m}$ 的加固体,填充基岩裂隙或砂砾石层孔隙,有效提高地基抗渗性(渗透系数 $\leq 10^{-6}\text{cm/s}$)及承载力,对上部结构扰动小。(2)聚合物植入式微创裂隙加固工艺:通过微型钻孔(直径 $\leq 20\text{mm}$)将聚氨酯或丙烯酸盐类高分子材料注入结构深层裂隙,材料遇水迅速发泡膨胀或形成凝胶,封闭渗水通道并粘结破裂面,固化时间可控($30\text{s}\sim 10\text{min}$),适用于止水失效、伸缩缝渗漏等快速修复。(3)抗浮锚杆复合加固老旧水工基础技术:在原有底板或基础中钻孔植入高强钢筋或预应力钢绞线,并压力注浆形成全长粘结型锚杆,通过锚固于稳定持力层提供抗拔力,解决因水位抬升、旧结构自重不足导致的上浮及不均匀沉降问题,单根锚杆抗拔承载力可达

200~500kN。

2.4 绿色生态型加固新技术

(1)生态土工复合材料护坡加固技术:采用天然麻椰纤维、聚丙烯等可降解或耐久性土工格栅,与植被草毯、活木桩复合应用,形成加筋生态护坡。初期提供抗冲蚀防护(允许流速 $\leq 2\text{m/s}$),后期植物根系与复合材料共同锚固土体,兼具加固、绿化与水质净化功能。

(2)可降解无机胶凝材料生态修复加固技术:以磷酸镁水泥、地质聚合物等低碳无机胶凝材料为基础,辅以秸秆灰、稻壳灰等农业废料,用于砌体结构裂缝修复或边坡浅层加固。材料在服役期满后可通过酸碱中和自然降解,pH值接近天然水体,对水生生物无毒性影响^[4]。

(3)生态加固技术环保性与耐久性能优势:相比传统环氧或水泥加固,生态材料碳排放降低40%~60%,且不释放双酚A、甲醛等有害物。其耐久性满足一般水工构筑物15~30年服役需求,抗冻融循环可达F100~F150,兼具良好的透水性、与植被亲和力,特别适用于生态灌区、湿地及饮用水源保护区。

3 新技术工程应用、效益分析与发展展望

3.1 实际水利工程案例应用方案设计

(1)老旧水闸混凝土结构耐久性病害勘察诊断:采用无损检测手段(回弹法、超声法测强度,钢筋扫描仪测保护层厚度及锈蚀概率,半电池电位法测锈蚀风险,钻孔电视探测内部裂缝)结合现场取样(钻芯、碳化深度、氯离子含量),系统查明水闸排架、底板、闸墩的冻融剥落、碳化深度超标、钢筋锈胀开裂及渗漏通道等病害分布。(2)纤维复合材+高性能混凝土组合加固方案选型:针对抗弯承载力不足的梁板构件,采用碳纤维布(CFRP)三层粘贴加固;对于闸墩、底板等大面积耐久性退化区,采用20mm厚UHPC薄层植筋加固;伸缩缝及贯穿裂缝采用环氧改性注浆封闭后,再粘贴玄武岩纤维布增强。组合方案兼顾补强、防渗与耐久性提升。

(3)现场施工工艺流程与质量管控要点:流程为基面处理(高压水射流凿毛、露筋除锈)→植筋(孔径、深度、拉拔试验)→裂缝注浆→界面剂涂刷→UHPC浇筑/养护→CFRP粘贴(底胶、找平、浸渍、滚压)。管控要点包括环境温度($5\sim 35^\circ\text{C}$)、粘结强度现场拉拔检测($\geq 1.5\text{MPa}$)、UHPC抗压试块同条件养护及纤维布空鼓率 $\leq 5\%$ 。

3.2 加固后结构耐久性能检测验证

(1)加固后结构力学强度、抗渗性能检测:采用钻芯法检测UHPC抗压强度($\geq 120\text{MPa}$,达到设计值);回弹-超声综合法测定原混凝土强度提升情况。抗渗性能

通过现场逐级加压试验（最大水压0.8MPa）及氯离子渗透系数（RCM法）测定，加固后渗透系数降低2~3个数量级。（2）耐冻融、耐腐蚀耐久性能对比试验分析：取加固前后芯样，进行快速冻融试验（F150）和质量损失率对比，加固后质量损失 $< 3\%$ ，相对动弹模量保持率 $> 85\%$ ；硫酸盐干湿循环（ $5\%Na_2SO_4$ ，50次）后，CFRP-UHPC复合试件抗折强度保留率较未加固混凝土提高40%以上。（3）加固前后结构安全系数对标研判：依据SL191规范复核，加固前水闸抗滑稳定系数（ $K_c = 1.05$ ）及底板抗弯安全系数均低于规范限值（ $K_c \geq 1.20$ ）。加固后，抗滑稳定系数提高至1.35，底板承载力提高约35%，挠度减小约50%，满足设计使用年限要求^[5]。

3.3 技术综合效益与传统加固技术对比分析

（1）施工工期、材料成本经济效益对比：相比传统加大截面（工期长约50%，材料用量多3~5倍），UHPC薄层+CFRP加固工期缩短40%，材料重量减轻70%，综合造价增加约15~20%，但因减少中断运行时间，整体经济性更优。（2）服役周期、后期运维成本耐久效益分析：传统加固后5~8年需再次修补，而新技术体系耐久性寿命可延长20~30年，全生命周期运维成本降低约45%（减少重复注浆、表面修补等频次）。（3）生态环保、施工扰动社会效益对比：水性防腐涂层及无溶剂环氧注浆材料VOC排放降低90%；微创加固（钻孔直径 $\leq 20mm$ ）减少拆除垃圾产生70%，施工现场噪音、粉尘大幅下降，对灌区用水及周边居民生活干扰极小。

3.4 现存问题与行业发展展望

（1）现有加固新技术高寒、高盐工况适配短板：UHPC与CFRP在高寒地区冻融-盐蚀耦合环境下界面耐久性数据不足，极低温（ $\leq -30^\circ C$ ）下环氧树脂脆性增大，粘结强度衰减约30~40%，需开发耐低温增韧型树脂及纤维布。（2）智能化监测-加固一体化技术发展方向：发展内置光纤光栅或压电陶瓷的智能FRP筋/布，实现加固

层应力、应变、温度及锈蚀的实时自感知；结合数字孪生平台，形成“检测-评估-预警-补强”闭环决策系统。

（3）长耐久、低碳型水工加固材料研发趋势：研发地聚物基超高性能混凝土（G-UHPC）及生物矿化修复剂（微生物诱导碳酸钙沉淀），碳排放较普通UHPC降低60%以上；探索自修复纤维复合材料（内置微胶囊或形状记忆合金），实现裂缝自主闭合。（4）水利结构耐久性全生命周期管控体系优化展望：建立从设计阶段预留监测接口、施工期智能养护、服役期定期耐久性体检（每5~10年）到加固决策数据库的全流程标准化体系，推动水工结构耐久性管理由被动维修向主动预测维护转变。

结束语

研究探明了水利工程结构耐久性损伤核心机理，完善了多类型水工加固新技术应用体系，工程实践证明，新型加固技术可有效提升结构力学性能与耐久指标，缩短施工工期、降低全生命周期成本，生态效益突出。当前技术存在高寒高盐工况适配性差、智能化程度不足等问题。后续需攻坚低碳加固材料、智能监测加固技术，搭建全生命周期管控体系，推动水工加固行业绿色、长效、智能化发展。

参考文献

- [1]何鹤彬.老旧堤防与水闸结构耐久性缺陷及复合加固施工技术[J].云南水力发电,2024,40(3):62-65.
- [2]李俊逸.基于耐久性寿命的水利工程加固方案优选与施工管控[J].水利科技与经济,2023,29(7):102-105.
- [3]吴浩.水下非开挖加固新技术在水工构筑物修复中的应用[J].工程机械与维修,2025,23(4):168-170.
- [4]陈峰,韩宝华.高寒区水利混凝土结构耐久性损伤与钢纤维混凝土加固技术[J].人民黄河,2023,45(11):156-160.
- [5]周文彬.生态改性砂浆加固水利构筑物及长期耐久性性能试验研究[J].水利技术监督,2025,33(2):217-220.