

水利工程结构耐久性与加固新技术研究

李翠丽

周口市河湖事务中心 河南 周口 466000

摘要：为解决水利工程结构长期服役中出现的耐久性衰减问题，本文系统梳理混凝土、土石两类主体结构的典型病害类型，剖析环境、运行、施工材料三大核心影响因素。重点探究碳纤维加固、高压注浆、MICP生物加固及微创防渗等新型加固技术的原理与适配场景。结合实际堤坝工程开展组合技术应用验证，结果表明新型加固技术可有效修复结构病害、提升结构稳定性与耐久性，可为老旧水利工程加固改造提供技术参考。

关键词：水利工程；结构耐久性；加固新技术

引言：水利工程是防洪、调蓄、水资源调配的核心基础设施，长期处于干湿交替、冻融腐蚀的复杂工况中，结构易出现碳化、锈蚀、渗流、坍塌等耐久性病害，严重影响工程服役安全与使用寿命。传统加固技术存在适配性差、易产生二次损伤、长效性不足等短板。基于此，本文结合工程病害成因，研究各类新型加固技术的应用优势，通过实际工程验证技术实用性，为水利工程耐久性提升与病害综合治理提供新思路。

1 水利工程结构耐久性病害类型及成因机理

1.1 混凝土结构耐久性病害及成因

（1）混凝土碳化病害：大气环境中二氧化碳与混凝土内部碱性物质发生化学反应，降低混凝土碱度；水体干湿交替环境会加速气体渗透，大幅提升碳化速率。随着碳化深度不断增加，混凝土保护层碱性防护作用失效，无法阻隔外界侵蚀介质，逐步丧失对内部钢筋的保护能力。（2）钢筋锈蚀病害：水利工程水体中的氯离子、硫酸盐等侵蚀介质渗入混凝土内部，搭配渗透进入的氧气与水分，触发钢筋电化学锈蚀反应。钢筋锈蚀后体积膨胀，会对周边混凝土产生挤压力，引发混凝土表层开裂、剥落，逐步造成结构破损、承载力下降^[1]。

（3）混凝土冻融破坏：北方寒冷地区水利工程长期经受冻融循环，混凝土内部孔隙留存的水分低温结冰膨胀，挤压孔隙壁造成内部微损伤。反复冻融使微裂缝持续扩展，最终出现表层剥落、结构疏松、整体性下降等病害，严重破坏结构稳定性。

1.2 土石结构耐久性病害及成因

（1）坝体渗流渗透破坏：土石坝、堤防等工程土体压实度不足、防渗层老化破损时，水体易穿透结构内部形成渗流通道。长期渗流冲刷会带走细小土颗粒，逐步引发管涌、流土病害，破坏土体完整性，削弱结构防渗与承载性能。（2）土体冲刷与坍塌破坏：水流持续冲

刷、风浪反复撞击、水位骤变引发的水流扰动，会持续侵蚀土石结构坡面与坝体表层土体，造成土体剥离、坡面破损。长期作用下冲刷沟槽不断加深扩大，最终引发坝体、坡面坍塌失稳。（3）土体固结沉降变形：土石结构在长期自重与水荷载作用下，土体颗粒持续压缩密实，叠加土体自然老化影响，易出现不均匀固结沉降。沉降差会导致结构开裂、变形，破坏防渗体系完整性，造成防渗失效，加剧结构病害发展。

1.3 结构耐久性影响因素综合分析

（1）自然环境因素：温度、湿度、水质、风力、冻融及腐蚀介质等自然条件，持续侵蚀水利工程结构，是引发各类耐久性病害的核心外部诱因，长期作用下逐步累积结构损伤。（2）工程运行因素：长期荷载挤压、频繁水位波动、运维检修不到位、超标准超负荷运行等工况，会持续加剧结构损耗，加速病害萌生与扩展，降低工程使用寿命。（3）施工与材料因素：原材料性能不达标、施工工艺存在缺陷、结构设计不合理等前期固有问题，会让结构存在先天薄弱点，大幅降低工程整体耐久性，为后期病害发生埋下隐患。

2 水利工程结构新型加固技术研究

2.1 混凝土结构新型加固技术

（1）碳纤维复合材料（CFRP）加固技术。该技术原理是利用高强度碳纤维布与专用粘结胶协同作用，贴合混凝土结构表层，与原结构协同受力，分担结构荷载，约束混凝土裂缝扩展。施工流程包含基层打磨清理、缺陷修补、底胶涂刷、碳纤维布粘贴、面胶防护固化。该技术自重极轻、抗拉强度高、耐酸碱腐蚀，不会增加结构额外荷载，适配水利干湿交替、高腐蚀水环境，可有效提升混凝土结构抗拉、抗裂与耐久性能。（2）高性能聚合物砂浆修补加固技术。聚合物砂浆具备优异的抗渗、抗腐蚀、高强度特性，粘结性能远优于普通水泥砂

浆。技术核心是通过聚合物改性优化砂浆密实度,填充混凝土表层孔隙与微裂缝。施工中针对混凝土碳化、表层剥落、渗漏、蜂窝麻面等病害,经基面处理、界面剂涂刷、分层抹面、保湿固化完成修复,可快速修复结构表层损伤,封堵表层渗水通道,适配水利混凝土结构表层耐久性病害整治^[2]。(3) 预应力加固技术。体外预应力加固技术原理为通过布设体外预应力钢束,对受损混凝土结构施加反向预压应力,抵消结构运营产生的拉应力,改善结构受力状态。该技术主要适配水闸、渡槽等大跨度混凝土梁板结构,施工核心要点为精准定位张拉点位、控制张拉应力与伸长值,规范锚具锚固与防护处理,可高效修复结构受力损伤,提升结构承载极限。

2.2 土石结构新型加固技术

(1) 高压喷射注浆加固技术。该技术依托高压浆液冲击切割土体,使浆液与土体充分混合固化,形成固结体。旋喷适用于坝体深层土体加固,定喷可形成连续防渗墙体,摆喷适配局部堵水加固。施工通过高压设备精准控压注浆,固化后土体密实度、整体性大幅提升,可有效解决土石坝渗流、管涌、土体松散等问题,防渗加固效果稳定。(2) 土工合成材料复合加固技术。依托土工膜的防渗性能与土工格栅的加筋抗拉性能,形成复合加固体系。土工膜可阻断水体渗透路径,降低坝体渗流量;土工格栅可约束土体变形,提升土体抗剪强度。施工重点在于平整坡面、分层铺设搭接、固定压实,主要用于土石坝坡面防护、坝体土体加筋加固,可有效抵抗水流冲刷、土体沉降变形。(3) 微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)加固技术。作为新型环保生物加固技术,原理是通过微生物代谢诱导水体与土体中的钙离子生成碳酸钙沉淀,填充土体孔隙、胶结松散土颗粒。该技术微创无污染、施工扰动小,无需重型设备,适配水利软弱土体加固、表层防渗修复,可从根源改善土体疏松、抗冲刷能力弱的问题,具备极佳的绿色工程应用前景^[3]。

2.3 隐蔽病害微创加固技术

(1) 低压注浆微创加固技术。针对混凝土及土石结构内部细微裂缝、隐蔽渗流通道,依托低压匀速注浆工艺,让浆液缓慢渗透至结构微小空隙深处,充分填充隐蔽病害区域。施工核心为严控0.3–0.5MPa低压注浆压力,避免高压冲击损伤原有结构,精准修复隐蔽裂缝与渗流通道,根治结构内部隐性病害。(2) 非开挖式防渗加固技术。该技术无需开挖破除结构表层,通过预埋注浆孔、微创钻孔的方式完成深层防渗加固,属于无损微创施工工艺。适配老旧堤坝、水闸等已成型结构的加固改造,可最大限度保留原有结构完整性,避免开挖施工

带来的二次损伤,完美适配老旧水利工程隐蔽病害修复与防渗升级^[4]。(3) 隐蔽病害加固质量检测技术。配套微创加固采用超声波检测、雷达无损检测、渗水流量监测等技术,无需破坏加固结构,即可精准检测内部浆液填充密实度、裂缝闭合情况、防渗层完整性。通过多维度数据评估加固效果,弥补隐蔽部位无法肉眼核验的短板,保障隐蔽病害加固施工质量达标。

2.4 新型加固技术性能对比分析

(1) 各技术加固效果对比。混凝土类加固技术中,CFRP与预应力技术结构强度提升效果显著,聚合物砂浆侧重表层防渗与病害修复;土石结构加固中,高压注浆加固强度最优,MICP技术侧重土体改良;微创注浆技术针对性解决隐蔽病害,防渗修复效果突出,可全方位弥补结构隐性耐久性缺陷。(2) 施工适配性对比。聚合物砂浆、土工合成材料施工技术简单、适配各类工况;CFRP、微创注浆技术可在潮湿、水上环境施工;预应力、高压注浆技术施工工艺复杂,适配大型、重难点工程;MICP技术施工门槛低,适配软弱土体浅层加固场景。(3) 经济性与长效性对比。土工合成材料、聚合物砂浆施工成本低、工期短,耐久年限15–20年;CFRP、预应力技术成本偏高,但耐久年限可达25–30年,长效性优异;MICP技术前期技术成本较高,但运维成本低,绿色长效,可根据工程等级、病害类型择优选用适配加固方案。

3 工程案例应用与效果验证

3.1 工程概况与病害分析

(1) 案例工程基本情况。本次选取某中型防洪堤坝工程作为研究案例,工程建成于2008年,为土石混合坝结构,坝顶总长860m,最大坝高22.5m,主要承担区域防洪、河道调蓄功能。工程常年处于水位干湿交替工况,年均水位波动幅度达4.2m,历经18年自然运行,长期受水流冲刷、冻融循环与地下水侵蚀作用,结构耐久性出现明显衰减。(2) 现场病害检测结果。通过现场勘查与超声波、雷达无损检测发现,坝体混凝土护坡平均碳化深度达28mm,超过20mm规范保护层限值;存在12处表层裂缝,最大裂缝宽度0.35mm,局部出现渗水泛白现象。同时坝体背水坡表层土体松散,存在细微渗流通道,部分区域土工防渗层老化破损,整体防渗性能大幅下降。(3) 病害成因判定。病害核心成因分为三类,一是区域年均湿度82%、冬季年均冻融循环45次,自然环境持续侵蚀结构;二是工程长期高水位运行,年均超设计水位运行时长约28天,加剧土体渗流与混凝土损伤;三是早期施工土体压实度仅93.5%,未达95%规范标准,存

在先天施工缺陷,加速结构耐久性衰减。

3.2 加固技术方案设计与施工

(1) 加固技术选型。结合工程病害特征,采用组合新型加固技术:混凝土护坡选用CFRP碳纤维加固+高性能聚合物砂浆表层修补;坝体土体病害采用高压旋喷注浆加固;隐蔽渗流通道采用低压注浆微创封堵,形成表层修补、深层加固、隐蔽防渗的综合加固方案。(2) 专项施工工艺设计。施工前对结构基层彻底打磨清理,去除疏松破损层;CFRP粘贴选用300g/m²标准碳纤维布,粘结胶厚度控制在0.8~1.2mm;高压注浆水灰比设定0.8,注浆压力控制2.5~3.0MPa;低压微创注浆压力稳定0.3~0.5MPa,适配潮湿、水下作业环境,所有工序严格遵循水利工程加固质量验收标准。(3) 施工重难点控制。针对河道风浪大、湿度高、作业面受限的难点,采用分段围堰控水施工,规避水流干扰;严格把控原材料含水率与养护温度,养护周期不少于7天;落实全过程质量抽检,每日监测施工进度,制定汛期应急施工预案,保障施工安全、质量与工期达标^[5]。

3.3 加固效果检测与性能评估

(1) 加固后结构性能检测。完工后专项检测数据显示,混凝土碳化深度降至8mm以内,结构抗压强度提升22%;坝体土体压实度提升至96.2%,渗流量降低85%;所有裂缝全部闭合,无新增渗水、剥落病害,各项耐久性指标均满足设计规范要求。(2) 加固效果对比分析。加固前结构存在防渗薄弱、强度不足、病害持续扩展等问题,加固后混凝土抗腐蚀、抗冻融性能显著提升,坝体渗流、土体松散问题彻底解决,结构整体承载力、稳定性、耐久性得到全方位改善,病害治理效果十分显著。(3) 长期服役性能预判。依据检测数据及技术参数预判,本次新型组合加固技术耐久年限可达25年以上,能够有效抵御区域冻融、水流侵蚀等环境影响,可保障堤坝长期稳定服役,大幅降低后期病害复发概率与运维成本。

3.4 工程应用总结与优化建议

(1) 技术应用成效总结。本次组合加固技术适配老旧水利工程复杂病害治理,兼具微创、高效、耐久的优势,可同步解决混凝土表层病害与土石坝体深层渗流问题,施工对原有结构扰动小,补强防渗效果优异,具备较高的工程实践价值。(2) 现存问题与不足。施工中发现CFRP材料成本偏高,整体工程造价有所增加;MICP生物加固技术未配套应用,软弱土体表层改良效果有限;潮湿环境下部分工序粘结固化速度较慢,对施工工期存在轻微影响。(3) 技术优化与推广建议。后续可优化材料配比,采用新材料复合配比降低施工成本;结合土体工况配套应用MICP加固技术,提升软弱土体加固效果;优化潮湿环境快速固化工艺。该组合加固方案适配多数老旧堤坝、水闸工程,可推广应用。

结束语

本文系统分析了水利工程结构耐久性病害的成因与特征,分类探究各类新型加固技术的施工要点与应用优势,通过实际工程验证了组合加固技术的治理成效。研究证实,新型微创、绿色加固技术可高效解决水利结构显性与隐蔽性病害,显著提升工程耐久性。后续可进一步优化材料配比与施工工艺,完善绿色加固技术体系,推动新型加固技术在水利工程领域的规模化推广应用。

参考文献

- [1]王凤龙.水利工程结构耐久性与加固新技术研究[J].现代工程科技,2025,4(6):65-68.
- [2]达举龙.水利工程如何提高混凝土的耐久性[J].产品可靠性报告,2025,14(3):111-114.
- [3]陈虹.水利工程中水闸加固施工技术的实际应用[J].水上安全,2024,23(10):160-162.
- [4]顾振汉.水利工程施工中防渗和加固技术研究[J].农业灾害研究,2024,14(5):272-274.
- [5]陈昕.大型水闸除险加固工程耐久性检测分析与问题探讨[J].水利技术监督,2023,35(5):283-286.