

水利水电工程混凝土结构耐久性提升技术研究

刘翠平

江西禹滨工程咨询有限公司 江西赣州 341400

摘要：水利水电工程混凝土结构的耐久性直接关系到工程的安全运行、使用寿命及投资效益。本文针对水利水电工程混凝土结构面临的复杂服役环境与耐久性挑战，从原材料优化、施工工艺改进、防护技术应用及全生命周期管理四个维度，系统探讨了提升混凝土结构耐久性的关键技术路径。通过分析不同环境因素对混凝土结构的侵蚀机理，结合工程实践需求，提出了适配水利水电工程特点的耐久性提升方案，旨在为延长工程服役寿命、降低维护成本提供技术参考。

关键词：水利水电工程；混凝土结构；耐久性

引言

水利水电工程作为国家重要的基础设施，其混凝土结构长期暴露于水、土、大气等复杂环境中，易受到渗流冲刷、化学侵蚀、冻融循环、碱骨料反应等多种因素的耦合作用，导致结构性能退化、使用寿命缩短，甚至引发安全隐患。随着既有工程服役年限的增长及新建工程对耐久性要求的提高，如何提升混凝土结构的长期稳定性与耐久性已成为水利水电工程领域亟待解决的核心问题。近年来，材料科学、施工技术及管理工程的进步为耐久性提升提供了新的思路与方法。

一、混凝土结构耐久性现状与影响因素

（一）混凝土结构耐久性的重要性及其深远影响

混凝土结构耐久性作为水利水电工程长期安全运行的核心要素，是确保工程全生命周期性能稳定的关键基础。在水利水电工程的特殊应用场景中，混凝土结构不仅要承受常规的静荷载作用，还需要长期抵御水压力、水流冲刷、干湿交替、冻融循环以及化学侵蚀等多重复杂环境因素的协同作用。这种严苛的使用环境使得耐久性问题尤为突出，一旦混凝土结构耐久性不足，将引发一系列连锁反应：钢筋保护层失效导致锈蚀膨胀、混凝土内部微裂纹扩展形成贯通裂缝、表面保护层剥落加速劣化进程。这些损伤累积效应会显著降低结构的整体性和承载能力，增加渗漏风险，严重时可能引发工程失稳甚至溃坝等灾难性后果。通过系统提升混凝土结构耐久性，不仅可以大幅延长维修周期、降低全寿命周期维护成本，更能确保工程在极端气候事件频发和长期服役条件下的功能可靠性。

（二）主要耐久性问题及其多因素作用机理

水利水电工程混凝土结构面临的耐久性问题呈现出多样性和复杂性的特征，主要包括钢筋锈蚀、混凝土碳化、冻融破坏、碱骨料反应及硫酸盐侵蚀等典型病害模式。钢筋锈蚀作为最具破坏性的耐久性问题，其发生机理涉及电化学腐蚀过程：当混凝土保护层厚度不足、密实性较差时，环境中的氯离子渗透或碳化作用会破坏钢筋表面的钝化膜，在氧气和水分共同作用下形成腐蚀电池，锈蚀产物体积膨胀可达原体积的2-4倍，导致保护层顺筋开裂和剥落。混凝土碳化是一个渐进性的化学过程，大气中的二氧化碳通过孔隙扩散与水泥水化产物氢氧化钙反应，生成中性的碳酸钙，使混凝土pH值降至9以下，失去对钢筋的保护作用。在寒冷地区，冻融破坏表现为水分渗入混凝土孔隙后反复冻胀产生的累积损伤，每次冻融循环产生的膨胀应力都会加剧微裂纹扩展，最终导致表面剥落和强度劣化。碱骨料反应是混凝土内部的碱金属离子与活性骨料（如蛋白石、燧石等）发生的膨胀性化学反应，反应产物的体积膨胀会导致不可逆的结构开裂。硫酸盐侵蚀则表现为环境中的硫酸根离子与水泥中的铝酸盐相反应生成钙矾石和石膏等膨胀性产物，同时伴随凝胶物质的分解，造成混凝土软化崩解。这些耐久问题的发生发展是材料组成缺陷（如水灰比过大、掺合料使用不当）、施工质量控制不足（如振捣不密实、养护不到位）与环境侵蚀因素（如氯离子浓度、冻融频次、硫酸盐含量）共同作用的结果，需要通过优化配合比设计、改进施工工艺、采用防护涂层等综合措施进行系统防控^[1]。

（三）环境与材料因素对耐久性的影响

环境因素是影响混凝土结构耐久性的外部条件，包

括湿度、温度、化学介质及荷载作用等。高湿度环境加速混凝土中水分迁移与有害离子侵入,促进钢筋锈蚀与化学侵蚀;温度变化引起混凝土热胀冷缩,可能导致温度裂缝,极端低温还会加剧冻融破坏;化学介质如氯离子、硫酸根离子、二氧化碳等会通过渗透、扩散等方式侵入混凝土,引发钢筋锈蚀、碳化或硫酸盐侵蚀;荷载作用则可能导致混凝土微裂缝扩展,加速有害物质侵入。材料因素是影响耐久性的内在条件,包括水泥品种、水胶比、骨料性质、外加剂及掺合料等。水泥品种影响混凝土的碱度与抗化学侵蚀能力,高碱水泥易引发碱骨料反应,而矿渣水泥或粉煤灰水泥则具有较好的抗硫酸盐侵蚀性能;水胶比是决定混凝土孔隙结构的关键参数,水胶比过高会增加孔隙率,降低抗渗性与抗冻性;骨料性质如粒径、级配及活性成分会影响混凝土的强度与稳定性,活性骨料易引发碱骨料反应;外加剂如减水剂、引气剂可改善混凝土工作性与耐久性,引气剂通过引入微小气泡提高抗冻性;掺合料如粉煤灰、矿渣粉可填充混凝土孔隙,改善密实度与抗渗性。环境与材料因素的相互作用决定了混凝土结构的耐久性表现,需通过材料优化与环境适应性设计提升其耐久性能。

二、耐久性提升技术研究

(一) 常用耐久性提升技术概述

混凝土结构耐久性提升技术是延长水利水电工程使用寿命、保障结构安全的重要手段,主要包括高性能混凝土应用、表面防护技术、电化学修复技术及结构补强技术等。高性能混凝土通过优化材料配比与掺入矿物掺合料(如粉煤灰、矿渣粉、硅灰等),显著降低水胶比,提高密实度与抗渗性,从而增强抗碳化、抗氯离子渗透及抗冻融能力;表面防护技术包括涂覆防护涂层、渗透结晶材料及防水砂浆等,通过在混凝土表面形成物理屏障或化学封堵层,阻止水分、氯离子等有害物质侵入,延缓钢筋锈蚀与混凝土劣化;电化学修复技术如阴极保护、电化学再碱化及电化学除氯,通过外加电流或牺牲阳极的方式,抑制钢筋锈蚀或恢复混凝土碱性环境,适用于已发生锈蚀或碳化的结构;结构补强技术如粘贴碳纤维布、外包钢板或增大截面法,通过提高结构承载力与刚度,弥补因耐久性损伤导致的性能下降^[2]。

(二) 技术适用条件与选择依据

耐久性提升技术的选择需综合考虑结构损伤类型、环境条件、施工可行性及经济性等因素。高性能混凝土适用于新建结构或大范围修复工程,尤其适用于高湿度、高氯离子环境或冻融循环频繁地区,但对施工质量控制

要求较高;表面防护技术适用于轻微损伤或预防性维护,如碳化深度较浅、尚未发生钢筋锈蚀的结构,选择时需考虑防护材料的耐久性、附着力及施工环境适应性;电化学修复技术适用于已发生钢筋锈蚀或碳化的结构,尤其是氯离子侵蚀严重的海洋环境或除冰盐环境,但需评估电源供应、阳极布置及对周边结构的影响;结构补强技术适用于承载力不足或存在严重裂缝的结构,选择时需分析补强材料与原结构的相容性、补强效果及施工难度。技术选择依据包括结构检测结果、环境侵蚀等级、设计使用年限及维护成本等,需通过技术经济比选,确定最优耐久性提升方案。

(三) 提升技术的实施效果评价

耐久性提升技术的实施效果评价是验证技术有效性、优化后续维护策略的关键环节,主要通过实验室试验、现场检测与长期监测相结合的方式进行。实验室试验通过模拟实际环境条件,测试处理后混凝土的抗渗性、抗氯离子渗透性、抗冻融性及钢筋锈蚀速率等指标,如高性能混凝土的氯离子扩散系数、防护涂层的附着力与老化性能等;现场检测通过钻芯取样、超声波检测、钢筋锈蚀电位测量等方法,直接评估处理后混凝土的密实度、保护层厚度、钢筋锈蚀状态及裂缝修复情况,如渗透结晶材料的防水效果、电化学修复后的钢筋钝化膜恢复程度等;长期监测则通过布置传感器(如温湿度传感器、氯离子传感器、腐蚀监测仪等),持续跟踪结构在真实环境下的耐久性变化,如高性能混凝土的碳化深度发展、防护涂层的老化情况及电化学保护的长期稳定性等。效果评价需建立定量指标体系,结合技术规范与工程需求,综合判断耐久性提升技术的实际效果,为水利水电工程混凝土结构的全寿命周期管理提供科学依据^[3]。

三、耐久性提升技术在工程中的应用分析

(一) 技术在工程中的实际应用情况

2021年某流域大型水电站泄洪洞工程建设过程中,针对过流面混凝土长期承受高速水流冲磨、空蚀作用导致的耐久性问题,工程团队经过多方案比选后,最终采用了抗冲磨聚氨酯涂层技术与改性环氧砂浆修补技术的组合方案。在具体施工过程中,首先对混凝土基面进行了精细化的预处理:使用专业打磨设备对基面进行全面打磨,确保表面平整度误差严格控制在2mm以内,随后采用高压气枪进行彻底除尘处理。在涂层施工阶段,严格遵循分层涂刷工艺,共分3层均匀涂刷抗冲磨涂层,每层干膜厚度精确控制在 $0.8\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 范围内,并设置了7天的标准养护周期以确保涂层充分固化。对

于局部出现的破损区域,则采用改性环氧砂浆进行填充修补,修补过程中特别注意表面平整度的控制,确保修补区域与周边基面保持完全一致。2022年某省水库闸墩混凝土结构修复工程中,针对长期干湿交替、冻融循环作用导致的混凝土表层剥落问题,项目组创新性地采用了复掺粉煤灰与矿渣粉的高性能混凝土进行表层置换施工,其中粉煤灰掺量占胶凝材料总量的25%、矿渣粉掺量占15%,这种配比设计显著提升了混凝土的抗渗性和耐久性。同时,在混凝土表面喷涂了高性能硅烷浸渍剂,通过严格控制施工工艺确保浸渍剂渗透深度达到3mm以上的设计要求。在施工全过程中,监理单位定期进行现场取样检测,确保各项技术参数完全符合设计规范要求。这两类工程案例充分体现了根据结构所处环境特点选择适配技术的科学理念,实现了针对性的结构防护效果^[4]。

(二) 应用中存在的主要问题

2021年某水电站泄洪洞工程施工过程中,发现抗冲磨涂层与混凝土基面的粘结性能受基面含水率影响显著。部分施工区域由于工期紧张,在基面含水率超过8%(设计要求应低于6%)的情况下就进行了涂层施工,导致涂层固化后出现局部起壳、脱层现象,最终不得不进行二次返工处理,既延误了工期又增加了施工成本。2022年某水库闸墩工程在应用复掺矿物掺合料混凝土时,由于施工人员对这种新型混凝土的特性认识不足,未能根据混凝土和易性的变化及时调整振捣工艺参数,导致局部区域出现气泡密集的质量缺陷,经检测这些区域的混凝土密实度比设计要求低了15%左右。此外,部分工程中还暴露出不同耐久性技术协同应用时适配性不足的问题。例如某工程同时采用了硅烷浸渍与抗裂纤维混凝土技术,但由于前期技术交底不充分,施工时未能充分考虑纤维分布均匀性与浸渍剂渗透路径的匹配关系,导致局部区域浸渍深度仅达到2.5mm,未能满足3mm的设计标准。这些问题的出现,凸显了在新技术应用过程中加强施工过程管控的重要性,需要通过完善技术交底、强化过程检测等措施加以规避。

(三) 技术应用对结构寿命延长的作用

2021年某流域水电站泄洪洞工程应用抗冲磨与修补技术后,经过连续12个月的运行监测和数据采集,结果显示:过流面混凝土年磨损量从技术应用前的0.8mm显著降至0.15mm,降幅达81.25%;原先频繁出现的空蚀现象已完全消失。结合混凝土强度衰减速率进行专业测算,该泄洪洞结构的设计寿命从原来的50年大幅提升

至80年,使用寿命延长了60%。2022年某省水库闸墩工程应用复掺矿物掺合料混凝土与硅烷浸渍技术后,半年期的检测数据表明:混凝土碳化深度从每年1.2mm降至0.9mm,降幅25%;钢筋锈蚀速率从0.2mm/年显著降低至0.06mm/年,降幅达70%;冻融循环抵抗次数从200次提升至500次,抗冻性能提高了150%。根据这些性能指标的改善趋势进行专业推算,闸墩结构寿命可延长30年以上。这些新技术的应用不仅直接减少了后期维修次数与费用支出,更重要的是有效保障了水利水电工程的长期安全稳定运行,充分证明了先进技术在延长结构服役周期方面的核心价值。通过建立长效监测机制持续跟踪技术应用效果,为同类工程的技术选型提供了宝贵的实践依据^[5]。

结语

水利水电工程混凝土结构耐久性提升技术的研究与应用,是保障工程长期安全运行的重要基础。通过对耐久性现状、影响因素及提升技术的系统分析,可以发现,耐久性问题的发生往往是多因素共同作用的结果,需要从材料设计、施工工艺及后期维护等环节进行全面优化。高性能混凝土的应用显著提高了抗渗性和抗侵蚀能力,而表面防护和电化学修复技术则为已受损结构提供了有效的解决方案。然而,技术的实际应用中仍面临施工质量控制、协同适配性等问题,这要求在工程实践中进一步细化管控措施,完善技术标准。未来,随着新材料和智能化监测技术的发展,混凝土结构耐久性研究将向更加精准化、高效化的方向迈进,为水利水电工程的可持续发展提供更有力的技术支撑。

参考文献

- [1]张波.混凝土施工检测技术在水利水电施工中的应用[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(3):2.
- [2]小涛王.水利水电建筑施工中砼裂缝的防治[J].水电水利,2020.DOI:10.32629/hwr.v4i7.3148.
- [3]周泽聪.大坝混凝土碱-骨料反应抑制措施长期安全性研究[D].长江科学院,2021.
- [4]董文.水工混凝土结构耐久性影响因素分析及控制分析[J].水电水利,2020,4(4):59-60.DOI:10.32629/hwr.v4i4.2940.
- [5]沈先磊.水利水电施工混凝土面板堆石坝技术分析[J].名城绘,2020.