

# 水利工程中混凝土耐久性检测与提升技术研究

费春芳

苏州科建建设工程质量检测有限公司 江苏苏州 215212

**摘要:** 水利工程作为国民经济的重要基础设施,其服役环境具有高湿度、强侵蚀、荷载复杂等显著特征,混凝土作为核心结构材料,其耐久性直接决定工程的安全稳定性、服役寿命与全生命周期效益。在长期水流冲刷、干湿交替、冻融循环、盐渍侵蚀及微生物腐蚀等多重作用下,水利工程混凝土易发生碳化、钢筋锈蚀、裂缝扩展、强度衰减等耐久性失效问题,不仅可能引发结构渗漏、垮塌等安全事故,还会产生巨额维修加固成本,制约水利工程功能发挥。基于此,本文聚焦水利工程特殊服役环境,系统梳理混凝土耐久性核心检测技术的应用特性与适配场景,深入剖析材料、环境、施工等关键影响因素的作用机制,从多个维度提出靶向性提升技术措施,为水利工程混凝土耐久性的精准管控与长效提升提供理论支撑与实践指引,助力水利工程实现安全、长效、绿色运行。

**关键词:** 水利工程;混凝土耐久性;检测技术

## 引言

水利工程对于促进经济社会发展、保障人民生命财产安全具有重要的作用。然而,水利工程混凝土结构长期暴露在复杂多变的环境中,受到物理、化学等多种因素的侵蚀作用,其耐久性成为影响工程安全和使用寿命的关键因素。混凝土本身作为一项强度和硬度都比较高的工作,结构混凝土的应用在结构上有了改进和创新提升,所以强度和硬度与以前相比都有了整体的提升和改进。但是,由于混凝土最为一种混合建设的物品,在实际应用的过程中,必须做好耐久性的检测,对混合制作过程中存在的问题进行分析,以此就高水平耐久性保持的基础上,对妨碍混凝土耐久性建设的部分进行调整,系统化的改进,整体上保证混凝土的高质量建设。

## 一、混凝土耐久性检测技术

### (一) 环境适配型无损检测技术

针对水利工程混凝土结构体型庞大、服役环境复杂的特点,环境适配型无损检测技术凭借“无破损、高效率、强适配”的优势,成为现场检测的核心手段<sup>[1]</sup>。超声波透射法与回弹—超声综合法可穿透混凝土深层,检测坝体、桩基础等大体积结构的内部密实度、裂缝深度及缺陷分布,尤其适用于水下结构的无损评估;钢筋扫描技术通过电磁感应原理,精准检测水利工程钢筋混凝土结构的钢筋保护层厚度、钢筋间距及锈蚀程度,为判断钢筋锈蚀引发的耐久性风险提供数据支撑;雷达探测

技术可快速筛查隧洞、渠道衬砌混凝土的空洞、脱空及渗漏通道,结合防水耦合剂适配潮湿表面检测需求;红外热成像技术通过捕捉混凝土表面温度场差异,定位水下结构渗漏点、表面裂缝及内部缺陷,实现大面积结构的快速巡检。

### (二) 侵蚀介质专项检测技术

水利工程混凝土耐久性失效多与侵蚀介质相关,侵蚀介质专项检测技术通过精准测定有害介质含量与渗透特性,为耐久性劣化风险评估提供关键依据。氯离子含量快速检测技术可现场测定混凝土表面及内部氯离子浓度,判断氯盐侵蚀程度,预警钢筋锈蚀风险,尤其适用于沿海、盐碱地区水利工程;硫酸盐含量检测通过化学分析方法量化混凝土中硫酸盐离子浓度,结合矿物组成分析判断钙矾石生成潜力,评估硫酸盐侵蚀风险;碳化深度检测采用钻芯取样与酚酞显色结合的方法,测定水利工程混凝土表层碳化程度,分析混凝土内部碱度降低对钢筋钝化膜的破坏影响;渗透系数测定可量化混凝土抗渗性能,判断水流渗透对结构耐久性的影响,为防渗设计与维护提供依据。

### (三) 长效动态智能化监测技术

水利工程混凝土耐久性劣化具有长期性、渐进性特征,长效动态智能化监测技术通过植入式传感器与远程传输系统,实现劣化过程的全程追踪。在大体积混凝土坝体、溢洪道等关键结构中嵌入光纤光栅传感器,可实时监测温度应力、应变及裂缝扩展情况,精准捕捉混凝土早期收缩裂缝与服役期受力裂缝的发展动态;腐蚀监

测传感器可长期埋设于混凝土内部,持续监测侵蚀介质迁移规律与钢筋腐蚀速率,为劣化趋势预测提供数据支撑;温湿度与渗压传感器可实时采集混凝土表面及内部的温湿度、水压数据,分析环境因素对耐久性的影响机制;结合物联网与云平台技术,构建水利工程混凝土耐久性监测网络,实现多测点数据的集中管理、智能分析与异常预警,为维护决策提供实时、科学的依据,打破传统检测“时点性”局限。

#### (四) 微观—宏观联动检测技术

微观—宏观联动检测技术通过结合宏观性能测试与微观结构分析,全面揭示水利工程混凝土耐久性劣化的本质机制。宏观层面采用抗压强度试验、抗冻融试验、抗渗等级试验等方法,量化混凝土宏观性能衰减程度,评估其承载能力与抗环境作用能力;微观层面借助扫描电子显微镜(SEM)观察混凝土水化产物形态、孔隙结构及界面过渡区变化,分析水流冲刷、侵蚀介质作用下微观结构的劣化过程;X射线衍射(XRD)与能谱分析(EDS)技术可定性定量分析混凝土中有害产物的生成情况,明确劣化类型;压汞法(MIP)测定混凝土孔隙率与孔径分布,量化分析密实度变化对耐久性的影响<sup>[2]</sup>。这种“宏观性能表征+微观机理解析”的联动检测模式,能够全面、深入地掌握水利工程混凝土的耐久性状态,为提升技术的靶向设计提供科学支撑。

## 二、混凝土耐久性影响因素分析

### (一) 材料组成与配比因素

材料组成与配比是决定水利工程混凝土耐久性的内在核心,直接影响其抗渗、抗冻、抗侵蚀能力。水泥品种选择至关重要,硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥水化产物稳定性强,适用于大部分水利工程;而在硫酸盐侵蚀严重的环境中,需选用抗硫酸盐水泥等专用品种,避免水化产物与硫酸盐反应引发结构破坏。矿物掺合料的适配性影响显著,粉煤灰、矿粉、硅灰等合理掺加可通过“填充效应”“火山灰效应”优化微观结构,提升密实度与抗渗性,但掺量过高会导致水化延迟,影响抗冻融性能。骨料性能与级配直接关系混凝土密实度,选用强度高、洁净度好、级配合理的骨料可减少内部孔隙,含泥量过高或颗粒级配不良会降低混凝土抗侵蚀能力;对于碱—骨料反应敏感的骨料,需严格控制使用或采取抑制措施,避免体积膨胀开裂<sup>[3]</sup>。水胶比是关键配比参数,过高的水胶比会增加混凝土孔隙率,降低密实度,为侵蚀介质渗透提供通道,合理控制水胶比是保障水利工程混凝土耐久性的基础。

### (二) 复杂服役环境因素

水利工程特殊服役环境是引发混凝土耐久性劣化的核心外部驱动力,多种环境因素协同作用加速性能衰减。水流作用方面,高速水流冲刷会磨损混凝土表面,破坏表层防护,形成冲蚀坑,为侵蚀介质渗透创造条件;水位变动区的混凝土经历频繁干湿交替,水分蒸发与渗透导致盐类结晶析出,产生膨胀应力,引发表面起砂、裂缝。气候与侵蚀介质方面,寒冷地区水利工程混凝土遭受冻融循环作用,内部水分结冰膨胀、融化收缩反复进行,破坏微观结构,导致强度下降、表面剥落;沿海地区的氯盐、盐碱地的硫酸盐等侵蚀介质,通过渗透作用进入混凝土内部,引发钢筋锈蚀、水化产物分解等劣化反应;工业废水污染的水域中,酸性物质、重金属离子等会加速混凝土腐蚀。

### (三) 施工与运维因素

施工质量与运维管理直接影响水利工程混凝土的成型质量与服役状态,是耐久性管控的关键环节。施工过程中,混凝土搅拌不均、振捣不密实会导致内部孔隙率过高、密实度不均,形成耐久性薄弱区域;浇筑过程中产生的施工缝、冷缝处理不当,会成为侵蚀介质渗透与裂缝扩展的通道;钢筋保护层厚度控制不足,会缩短侵蚀介质到达钢筋的路径,加速钢筋锈蚀。养护环节对水利工程混凝土耐久性影响显著,养护不及时、湿度不足会导致水化反应不完全,混凝土强度与密实度下降,表面易产生干缩裂缝;大体积混凝土养护不当引发的温度应力,会产生贯穿性裂缝,严重影响耐久性<sup>[4]</sup>。运维管理方面,缺乏定期检测与维护会导致早期病害持续发展,如裂缝未及时修补、表面防护层破损未修复,会加速侵蚀介质渗透,加剧耐久性劣化;水利工程长期超负荷运行、水流状态突变等也会增加混凝土结构的疲劳损伤,降低耐久性。

## 三、提升混凝土耐久性的具体技术措施

### (一) 环境靶向型配合比优化技术

针对水利工程不同服役环境的侵蚀特征,采用环境靶向型配合比优化技术,从源头提升混凝土抗劣化能力。对于冻融循环严重的寒冷地区,采用“低水胶比+引气剂+优质矿物掺合料”的配合比设计,引入均匀分布的微小气泡缓解冻胀应力,同时通过低水胶比与矿物掺合料优化微观结构,提升抗冻融性能;对于氯盐侵蚀严重的沿海地区,选用低碱水泥与阻锈剂复合使用,控制氯离子渗透,同时掺加硅灰、超细矿粉等提升混凝土密实度,构建“物理屏障+化学阻锈”的双重防护体系;对于硫酸盐侵蚀环境,采用抗硫酸盐水泥,优化矿物掺合

料掺量,抑制钙矾石过量生成,避免体积膨胀开裂。配合比优化需结合具体环境的侵蚀类型与强度,通过试验确定最优参数,确保混凝土性能与服役环境精准适配,从根本上提升耐久性。

### (二) 高性能材料与复合改性技术

采用高性能材料与复合改性技术,通过材料创新强化混凝土自身抗劣化能力。选用高标号、低碱、水化热低的优质水泥,搭配级配良好、洁净度高的骨料,减少材料自身缺陷;推广使用复合矿物掺合料,将粉煤灰、矿粉、硅灰按比例复合掺加,发挥协同效应,进一步优化混凝土微观结构,提升密实度与抗侵蚀能力;选用适配性强的高性能外加剂,高效减水剂可在降低水胶比的同时保证工作性,引气剂提升抗冻性,阻锈剂抑制钢筋锈蚀,渗透结晶型外加剂可在混凝土内部形成结晶,堵塞毛细孔隙,提升抗渗性。此外,引入新型复合材料进行改性,如在混凝土中掺加碳纤维、钢纤维等增强材料,抑制裂缝产生与扩展;采用纳米材料改善混凝土界面过渡区性能,提升微观结构稳定性,进一步拓展水利工程混凝土耐久性的提升空间。

### (三) 抗侵蚀施工与精细化养护技术

通过抗侵蚀施工与精细化养护技术,减少施工缺陷,保障混凝土成型质量。施工过程中,采用高频振捣设备确保混凝土浇筑密实,对于大体积水利工程混凝土,采用分层浇筑、温控措施控制温度应力,避免产生温度裂缝;加强施工缝、后浇带的处理,采用界面凿毛、涂刷界面剂、增设抗剪钢筋等措施,提升结合部位的整体性与抗渗性;严格控制钢筋保护层厚度,采用高强度垫块、定位筋等确保钢筋位置准确,避免保护层过薄或不均<sup>[5]</sup>。养护环节实施“环境适配型”精细化养护方案,水下结构采用湿法养护或蓄水养护,确保水化充分;水位变动区与潮湿环境采用覆盖保湿材料+喷雾养护,延长养护周期至28天以上;寒冷地区冬季施工采用保温养护,避免冻害;通过精准控制养护温度、湿度与时间,确保混凝土水化反应完全,形成密实、稳定的微观结构,减少早期裂缝与耐久性隐患。

### (四) 长效防护与病害修复技术

针对水利工程混凝土的服役特点,采用长效防护与病害修复技术,构建“主动防护+被动修复”的双重保障体系。表面防护方面,水下结构与水位变动区采用渗透性结晶型防水涂料、聚合物水泥基防水涂料等,形成

连续防护膜,阻断侵蚀介质渗透;沿海、盐碱地区水利工程混凝土表面涂刷硅烷、硅氧烷等憎水剂,降低表面吸水率,提升抗氯盐、硫酸盐侵蚀能力;隧洞、渠道衬砌混凝土采用防腐涂层与混凝土界面剂复合防护,增强抗渗与抗冲刷能力。病害修复方面,对已出现的裂缝采用压力注浆进行封堵,阻止侵蚀介质进一步渗透;对表面起砂、剥落区域采用聚合物修补砂浆、喷射混凝土进行修复,恢复结构完整性;对钢筋锈蚀严重的区域,凿除锈蚀层、涂刷阻锈剂后重新浇筑高性能混凝土,恢复钢筋与混凝土的协同工作能力。同时,建立定期检测与维护机制,根据耐久性监测数据及时开展修复,实现“预防为主、防治结合”的长效管控。

### 结语

水利工程混凝土耐久性的检测与提升是适配特殊服役环境、保障工程安全长效运行的核心课题,其技术体系需围绕“环境适配、精准检测、靶向提升”的核心逻辑构建。检测技术的综合运用,为耐久性状态评估提供了全面、精准的数据支撑;影响因素的系统解析,明确了耐久性劣化的核心成因;环境靶向型配合比优化、高性能材料改性、长效防护修复等技术的协同应用,构成了全链条的提升路径。未来,需进一步加强多学科交叉研究,推动检测技术智能化、材料技术长效化、施工技术绿色化、维护管理精细化发展,持续优化技术体系。通过技术创新与实践应用,全面提升水利工程混凝土耐久性,为水利工程高质量建设与可持续发展提供坚实保障,彰显其重要的工程价值与社会意义。

### 参考文献

- [1] 施文红. 混凝土耐久性的无损检测方法 with 评估[J]. 实验室检测, 2024, 2(11): 90—92.
- [2] 杨承磊. 基于保护层厚度检测结果的混凝土耐久性分析[J]. 科学技术创新, 2024, (18): 121—124.
- [3] 曾亮红. 航运高桩码头混凝土结构耐久性检测分析[J]. 珠江水运, 2024, (13): 4—6.
- [4] 张霆. 建筑结构耐久性检测及加固技术应用分析[J]. 工程技术研究, 2024, 9(02): 109—111.
- [5] 罗大明, 李凡, 牛荻涛. 人工智能时代混凝土结构耐久性诊断研究进展[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(02): 1—13.