

水利工程混凝土裂缝自修复材料应用与耐久性提升研究

宋三玲

江西嘉源水利水电建设工程有限公司 江西宜春 331100

摘要: 水利工程混凝土结构是保障水资源调控、防洪减灾的核心基础设施,其耐久性直接关系工程运行安全与使用寿命。水工混凝土长期服役于复杂水环境,裂缝易发且易扩展,不仅削弱结构承载能力,还易引发渗漏等次生灾害。传统裂缝修补方法存在耐久性不足、易再次开裂等缺陷,难以满足工程长效防护需求。自修复材料凭借主动修复裂缝的特性,为提升水工混凝土耐久性提供了全新路径。本文结合水利工程混凝土服役环境特性,系统分析当前裂缝处理现状与耐久性保障面临的核心问题,从材料优选、施工控制、性能协同提升三个维度,构建自修复材料应用与耐久性提升策略,配套制定技术规范、施工管理、人员培养等保障措施。研究旨在为自修复材料在水利工程中的科学应用提供实践指引,助力提升水工混凝土结构耐久性,保障水利工程长效安全运行。

关键词: 水利工程;混凝土裂缝;自修复材料

引言

水利工程是重要基础设施,承担防洪、供水、发电等功能,其安全运行关乎社会经济发展与人民安全。混凝土因强度高、耐久性好、成本低等优势,广泛用于水工建筑物。但水工混凝土长期处于复杂水环境中,易产生裂缝。裂缝是耐久性下降的主因,初期裂缝未及时处理会扩展,导致强度降低、渗透增加,甚至引发渗漏与钢筋锈蚀,威胁工程安全。传统修补方法多为被动处理,难以长效修复。自修复材料可主动修复裂缝,恢复结构完整性与防水性能,为提升耐久性提供了有效手段。目前自修复材料应用仍处探索阶段,面临材料适配性不足、施工难、标准缺失等问题。深入研究其应用与耐久性提升路径,梳理核心问题,构建科学策略,对推动水利工程长效防护具有现实意义。

一、水利工程混凝土裂缝处理现状与耐久性面临的问题

(一) 水工建筑物长期处于复杂水环境导致裂缝易发与扩展的现状

水工建筑物服役环境具有显著的复杂性与特殊性,混凝土结构长期承受多重环境荷载作用,导致裂缝易发且易扩展。水位变动区的混凝土经历频繁的干湿交替,水分蒸发与渗入过程中产生的毛细压力会引发混凝土内部应力变化,逐步形成微小裂缝;寒冷地区的水工混凝土需承受冻融循环作用,内部孔隙水结冰膨胀产生的冻胀力会破坏混凝土内部结构,导致裂缝产生与扩展。

水环境中的化学物质会加速裂缝的发展。水中的氯离子、硫酸盐等有害物质会通过裂缝渗入混凝土内部,引发钢筋锈蚀,锈蚀产物体积膨胀会进一步拓宽裂缝;酸性水体还会与混凝土中的水泥水化产物发生化学反应,降低混凝土强度,加剧裂缝扩展。此外,水工混凝土结构还需承受水压力、温度应力、结构自重等荷载作用,荷载与环境因素的耦合作用会加速裂缝的产生与发展,进一步削弱结构耐久性^[1]。

(二) 传统裂缝修补方法耐久性差与再次开裂及渗漏风险高的问题

传统水工混凝土裂缝修补方法以被动修补为主,常见的有表面封堵法、压力灌浆法、粘贴加固法等,这些方法普遍存在耐久性差的问题,难以实现裂缝的长效修复。表面封堵法仅能修复表层裂缝,无法深入裂缝内部,且修补材料与原混凝土界面易产生剥离,在环境荷载作用下易再次开裂;压力灌浆法受灌浆材料流动性、裂缝宽度等因素影响,易出现灌浆不密实、空洞等问题,影响修复效果。

传统修补方法的修复效果难以适配水工混凝土的复杂服役环境,再次开裂与渗漏风险较高。修补材料与原混凝土的物理力学性能、耐久性往往存在差异,在温度变化、干湿交替等环境作用下,两者变形不协调,易在界面处产生新的裂缝;部分修补材料抗化学侵蚀、抗冻融能力不足,长期服役后会发生老化、降解,导致修补层失效,裂缝再次显现并引发渗漏。渗漏不仅影响水工建筑物的正常使用功能,还会进一步加剧结构损伤,形成恶性循环。

（三）自修复材料成本控制难度大与施工工艺要求高及应用标准缺失的挑战

自修复材料在水利工程中的应用面临成本控制难度大的挑战。目前多数自修复材料处于研发或推广阶段，生产工艺复杂，原材料成本较高，导致自修复材料的应用成本显著高于传统修补材料。对于大型水利工程而言，大面积应用自修复材料需要巨额资金投入，部分工程建设与运维单位难以承受，制约了自修复材料的规模化应用。

施工工艺要求高与应用标准缺失进一步阻碍了自修复材料的推广。自修复材料的修复效果对施工工艺参数敏感，如材料掺量、搅拌均匀性、浇筑振捣方式等，均需严格控制，否则会影响材料的分散性与活性，降低修复效果。但当前行业内缺乏针对水利工程混凝土自修复材料的统一应用技术标准，对材料性能指标、施工工艺要求、质量验收标准等缺乏明确规定，导致不同工程的应用方案差异较大，应用效果参差不齐。此外，施工人员对自修复材料的施工工艺掌握不足，也会影响材料应用的规范性与可靠性。

二、水利工程混凝土裂缝自修复材料应用与耐久性提升策略

（一）构建基于裂缝特征与环境适应性分析的自修复材料优选策略

自修复材料的优选需基于裂缝特征与环境适应性分析，确保材料性能与工程需求精准匹配。首先开展全面的裂缝检测与环境评估，明确裂缝的类型、宽度、深度、分布规律等特征，同时分析工程所处水环境的水质成分、冻融循环频率、水位变动情况等环境因素，为材料优选提供依据。不同类型的自修复材料具有不同的修复机理与适用范围，需结合工程实际需求针对性选择^[2]。

对于宽度较小的微裂缝，可优先选择微生物自修复材料或纳米自修复材料。这类材料粒径小，可通过渗透作用进入裂缝内部，在适宜条件下触发修复反应，生成碳酸钙等产物填充裂缝；对于宽度较大的宏观裂缝，可选择水泥基渗透结晶型自修复材料或胶囊型自修复材料，这类材料可通过物理填充或化学反应实现裂缝的有效修复。同时，需考虑材料的环境适应性，在氯离子含量高的水环境中，优先选择具有抗氯侵蚀能力的自修复材料；在寒冷地区，选择抗冻融性能优良的自修复材料，确保材料在复杂环境中能够稳定发挥修复作用。

（二）建立自修复材料在混凝土结构中的分散性与活性激发控制策略

自修复材料的分散性与活性是影响修复效果的关键

因素，需建立科学的控制策略确保材料性能充分发挥。在材料制备阶段，优化自修复材料的颗粒级配与表面改性工艺，提升材料在混凝土中的分散能力。对于粉体类自修复材料，可通过添加分散剂、改进搅拌工艺等方式，避免材料颗粒团聚，确保材料均匀分散在混凝土基体中；对于胶囊型自修复材料，合理设计胶囊的粒径与强度，避免胶囊在搅拌与浇筑过程中破损，同时确保胶囊能够在裂缝扩展时精准破裂释放修复剂。

建立针对性的活性激发控制策略，确保自修复材料在裂缝产生时能够及时触发修复反应。根据自修复材料的修复机理，优化混凝土配合比与养护工艺，为材料活性激发创造适宜条件。对于微生物自修复材料，通过调整混凝土内部孔隙溶液的pH值、养分含量等，为微生物生长与代谢提供良好环境，促进修复产物生成；对于水泥基渗透结晶型自修复材料，优化养护湿度与养护时间，加速材料与水泥水化产物的化学反应，提升修复效率。同时，可通过设置触发装置，在裂缝扩展达到一定宽度时主动触发修复反应，确保修复过程的及时性与有效性。

（三）形成自修复材料应用后混凝土抗渗性与抗冻性协同提升策略

自修复材料的应用不仅要实现裂缝修复，还需同步提升混凝土的抗渗性与抗冻性，形成协同提升策略。通过自修复材料的合理应用，填充混凝土内部裂缝与孔隙，降低混凝土的孔隙率与渗透性，减少水分与有害物质的渗入，提升抗渗性能。同时，优化自修复材料与混凝土基体的界面结合性能，增强界面粘结强度，避免水分在界面处积聚，进一步提升抗渗效果。

在提升抗冻性方面，通过自修复材料填充混凝土内部孔隙，减少孔隙水含量，降低冻融循环过程中冰胀力对混凝土结构的破坏。选择具有良好抗冻性能的自修复材料，或在自修复材料中掺入适量的引气剂，引入均匀分布的微小气泡，缓解冻胀应力。此外，建立抗渗性与抗冻性协同优化的混凝土配合比设计方法，综合考虑自修复材料掺量、水胶比、骨料级配等因素，实现抗渗性与抗冻性的同步提升。通过抗渗性与抗冻性的协同提升，全面增强水工混凝土结构的耐久性，延长工程使用寿命^[3]。

三、推进自修复材料应用的保障措施与质量控制管理对策

（一）建立健全水利混凝土自修复材料应用技术规范与验收标准

建立健全水利混凝土自修复材料应用技术规范，填补行业标准空白。组织行业专家、科研单位、施工企业

等多方力量,结合水利工程实际需求,制定涵盖材料性能指标、施工工艺要求、质量控制要点等内容技术规范。明确不同类型自修复材料的适用范围、性能参数要求,规范材料的储存、运输与使用流程;细化施工工艺参数,对材料掺量、搅拌、浇筑、振捣、养护等环节提出明确要求,确保施工过程的规范性。

制定完善的质量验收标准,建立全流程质量验收体系。明确自修复材料应用后的质量验收指标,如裂缝修复率、混凝土强度、抗渗性、抗冻性等,规定相应的检测方法与合格标准。加强施工过程中的质量抽检,对材料性能、施工工艺参数、混凝土半成品质量进行实时监测与验收;工程竣工后,开展长期性能跟踪检测,评估自修复材料的长期修复效果与结构耐久性^[4]。

(二) 完善自修复材料施工工艺流程管理与后期性能监测评估措施

完善自修复材料施工工艺流程管理,提升施工质量控制水平。制定详细的施工组织设计,明确施工流程、人员分工、设备配置等内容,确保施工过程有序推进。加强施工前的技术交底,向施工人员详细说明自修复材料的性能特点、施工工艺要求、质量控制要点等,提升施工人员的操作规范性。施工过程中,加强对关键工序的质量管控,如材料搅拌环节需确保搅拌均匀,浇筑振捣环节需避免过度振捣或振捣不足,养护环节需严格控制养护湿度与时间。

建立完善的后期性能监测评估措施,实现自修复效果与结构耐久性的长期跟踪。在水工混凝土结构的关键部位设置监测点,安装传感器实时监测裂缝变化、混凝土湿度、渗透性等指标,及时掌握自修复材料的修复效果与结构性能变化。建立监测数据管理平台,对监测数据进行系统分析,评估自修复材料的长期有效性及结构耐久性。根据监测结果,及时调整运维策略,对修复效果不佳的区域采取补充修复措施,确保结构长期安全稳定运行。

(三) 加强工程技术人员新材料应用培训与全寿命周期耐久性管理意识

加强工程技术人员新材料应用培训,提升专业素养与实操能力。制定系统化的培训计划,定期组织施工、监理、运维等相关人员参加自修复材料应用技术培训。培训内容涵盖自修复材料的修复机理、性能特点、施工工艺、质量控制、检测方法等核心内容,采用理论教学与实操演练相结合的方式,提升培训效果。邀请行业专家、技术骨干开展专题讲座与案例分享,传播先

进的应用经验与技术理念,提升技术人员解决实际问题的能力^[5]。

强化全寿命周期耐久性管理意识,推动工程管理理念转型升级。通过宣传教育、专题培训等方式,引导工程建设与运维单位树立全寿命周期管理理念,充分认识自修复材料在提升结构耐久性、降低运维成本中的重要作用。将耐久性管理贯穿工程设计、施工、运维全过程,在设计阶段充分考虑自修复材料的应用需求,在施工阶段严格落实质量控制措施,在运维阶段加强性能监测与评估。

结语

水利工程混凝土裂缝自修复材料应用与耐久性提升是保障工程长效安全运行、推动水利工程高质量发展的的重要举措。当前水利工程混凝土裂缝处理面临传统方法耐久性差、自修复材料应用成本高、施工工艺要求高、应用标准缺失等问题,这些问题制约了自修复材料的推广应用与结构耐久性的提升。

构建自修复材料优选策略可实现材料与工程需求精准匹配;建立分散性与活性激发控制策略确保修复可靠性;形成抗渗性与抗冻性协同提升策略增强混凝土耐久性。通过完善技术规范、施工管理、性能监测及人员培训等保障措施,确保策略顺利实施。该系统性工作需多方协同,解决裂缝处理与耐久性保障问题,推动自修复材料应用,延长工程寿命、降低成本、保障安全,具有重要工程与社会价值。

参考文献

- [1] 金城阳. 裂缝自修复材料修复性能评价的实验研究[D]. 浙江工业大学, 2020.
- [2] 辛晓斌, 李骁男, 马挺, 等. 基于抗渗性试验的混凝土自修复材料研究[J]. 河南科学, 2022(004): 040. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3918.2022.04.015.
- [3] 姚嘉诚, 延永东, 徐鹏飞, 等. 水泥基渗透结晶型防水材料和纳米二氧化硅改性混凝土自修复性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2020.
- [4] 姚嘉诚, 延永东, 徐鹏飞, 刘荣桂, 谢桂华, 郭彦领. 水泥基渗透结晶型防水材料和纳米二氧化硅改性混凝土自修复性能的研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(6): 1772-1777.
- [5] 徐建妙, 泮佳佳, 程峰, 等. 混凝土微生物自修复材料的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(2): 12.