

水利工程混凝土结构裂缝成因分析及新型修补材料应用研究

曹 宁 陈文龙

山东泉建工程检测有限公司 山东 济南 250000

摘 要：随着水利工程规模扩大，混凝土裂缝问题日益凸显。本文聚焦水利工程混凝土结构裂缝问题，首先概述其基本情况，接着深入剖析裂缝成因，涵盖材料性能缺陷、施工工艺不当、环境因素以及结构受力超限等方面。在此基础上，着重探讨新型修补材料在水利工程混凝土裂缝中的应用，包括高强混凝土修补料、新型化学灌浆材料和碳纤维补强加固技术等。通过研究，旨在为水利工程混凝土结构裂缝的防治与修复提供理论依据和技术支持，提高水利工程的安全性及耐久性，保障其长期稳定运行。

关键词：水利工程；混凝土结构；裂缝成因；新型修补材料

引言：水利工程作为国家基础设施建设的重要组成部分，对经济发展和社会稳定意义重大。混凝土结构因其诸多优势，在水利工程中广泛应用。然而，受多种因素影响，水利工程混凝土结构常出现裂缝问题，这不仅影响结构外观，更会降低其强度、耐久性和抗渗性，威胁工程安全。传统修补材料与方法在应对复杂裂缝时存在一定局限性。随着材料科学的发展，新型修补材料不断涌现。深入研究水利工程混凝土结构裂缝成因，并探索新型修补材料的应用，对于提升水利工程质量和可靠性，延长其使用寿命，具有重要的现实意义和迫切性。

1 水利工程混凝土结构的概述

(1)水利工程混凝土结构是水利设施的核心组成部分，承担着挡水、输水、泄洪等关键功能。其结构形式多样，涵盖大坝、水闸、渡槽、渠道衬砌等，需根据工程规模、地质条件及水流特性进行针对性设计。混凝土材料凭借其高抗压强度、良好的可塑性及耐久性，成为水利工程结构的主要建筑材料，直接关系到工程的整体安全性与运行稳定性。(2)水利工程混凝土结构的设计需综合考虑多重因素。一方面，需满足结构力学要求，确保在静水压力、动水冲击、地震荷载等复杂工况下保持稳定；另一方面，需适应环境作用，抵抗冻融循环、化学侵蚀、碳化等耐久性挑战。此外，结构还需兼顾施工可行性，通过合理分缝、配筋优化等措施降低施工难度，确保工程质量。(3)水利工程混凝土结构的维护与管理至关重要。长期运行中，结构易因材料老化、环境侵蚀或荷载变化出现裂缝、剥落等病害，需通过定期检测、评估与修复维持其功能。现代水利工程强调全生命周期管理，从设计阶段融入耐久性设计理念，到施工阶

段严格控制材料质量与工艺，再到运行阶段实施智能化监测与预防性维护，形成闭环管理体系。这一模式不仅延长了结构使用寿命，也降低了全生命周期成本，为水利工程的可持续运行提供了保障^[1]。

2 水利工程混凝土裂缝成因分析

2.1 材料性能缺陷引发的裂缝

水利工程混凝土材料性能缺陷是裂缝产生的重要内在因素。水泥质量不稳定，如熟料矿物成分波动、细度不达标，会导致混凝土水化热异常，早期强度发展过快或过慢，引发收缩裂缝。骨料含泥量超标、级配不良，会削弱骨料与水泥石的粘结力，在荷载作用下易产生界面裂缝。外加剂掺量不准确或与水泥适应性差，可能造成混凝土凝结时间异常、泌水离析，形成塑性收缩裂缝。此外，混凝土配合比设计不合理，如水胶比过大、胶凝材料用量不足，会降低混凝土密实度与抗裂性能，在温度应力或干缩作用下易开裂。材料性能缺陷贯穿混凝土制备全过程，从原材料选择到配合比设计，任何环节失控均可能为裂缝埋下隐患。

2.2 施工工艺不当引发的裂缝

施工工艺缺陷是混凝土裂缝的直接诱因。浇筑过程中振捣不密实，会导致混凝土内部孔隙率增大，形成薄弱区，在荷载或温度变化下易开裂。分层浇筑时接缝处理不当，如未清除浮浆、未设置键槽，会造成新旧混凝土界面粘结力不足，产生层间裂缝。养护环节忽视湿度与温度控制，如未覆盖保湿材料、未采取保温措施，会加剧混凝土干缩与温度收缩，导致表面龟裂或贯穿裂缝。模板拆除时间过早或顺序错误，可能因结构受力突变引发裂缝；预应力张拉工艺偏差，如张拉力控制不精

准、锚具松动,会导致结构应力分布不均,产生局部裂缝。施工工艺的每一环节均需严格把控,否则易因操作失误引发裂缝。

2.3 环境因素引发的裂缝

环境作用是混凝土裂缝的外在驱动因素。温度变化是主要诱因之一,混凝土热胀冷缩特性使其在昼夜温差或季节性温度波动中产生温度应力,当应力超过抗拉强度时即开裂,如大体积混凝土水化热积聚导致的内外温差裂缝。冻融循环作用会破坏混凝土内部孔隙结构,水分结冰膨胀产生应力,反复作用后引发表面剥落或深层裂缝。化学侵蚀环境,如海水中的氯离子、硫酸盐等,会与混凝土成分发生反应,导致膨胀、溶蚀或钢筋锈蚀,进而引发裂缝。此外,长期处于干湿交替环境中的混凝土,因水分蒸发与吸收的反复作用,易产生干缩裂缝。环境因素具有长期性与复杂性,需通过材料选择与结构设计进行适应性应对^[2]。

2.4 结构受力超限引发的裂缝

结构受力超限是混凝土裂缝的力学成因。设计阶段荷载估算偏差或安全系数取值不足,会导致结构实际承载力低于使用需求,在长期荷载或突发超载作用下产生裂缝。施工阶段临时支撑拆除过早、堆载超限,会改变结构受力体系,引发局部应力集中,导致裂缝扩展。运行阶段水流冲刷、地震作用等动态荷载,可能使结构产生疲劳裂缝或脆性断裂。此外,基础不均匀沉降会导致结构附加应力,当应力超过混凝土抗拉强度时,会产生沉降裂缝,常见于地基软弱或地质条件复杂区域。

3 新型修补材料在水利工程混凝土裂缝中的应用

3.1 高强混凝土修补料

高强混凝土修补料作为水利工程混凝土裂缝修复的核心材料,凭借其优异性能与广泛适用性,成为保障水利设施安全运行的关键技术支撑。(1)其核心优势在于高强度与耐久性。该材料以特种水泥为基材,通过添加纳米级矿物掺合料与高性能化学外加剂,形成致密微观结构,抗压强度可达80MPa以上,远超普通混凝土。在三峡水利枢纽工程中,该材料成功修复大坝迎水面裂缝,修复后区域抗渗等级提升至P12,有效抵御库水渗透压力。其耐久性经实测验证,在盐雾、冻融循环等极端环境下,20年强度损失率低于5%,显著延长结构使用寿命。(2)快速硬化特性提升施工效率。材料采用早强型配方,初凝时间控制在30分钟内,终凝不超过2小时,实现“当日修补、次日通水”。在棉花滩水电站溢洪道修复中,采用该材料完成120米长裂缝处理,较传统工艺缩短工期70%,减少停水损失超千万元。(3)优异粘结性能保障修复质量。通过引入聚

合物乳液改性技术,材料与基材界面粘结强度达3.5MPa以上,形成“化学键合+机械咬合”的双重锚固效应。在龙羊峡水电站导流墙修复中,该技术使新旧混凝土界面抗剪强度提升2倍,彻底消除剥离风险。

3.2 新型化学灌浆材料

新型化学灌浆材料凭借其独特的渗透固化特性与适应性优势,成为水利工程混凝土裂缝深度修复的关键技术手段,为结构安全提供可靠保障。(1)其核心特性在于超强渗透与精准固化。材料以水溶性聚氨酯、环氧树脂等为主剂,通过分子级设计将粘度降低至20mPa·s以下,可深入宽度0.05mm以上的微细裂缝,实现“无孔不入”的渗透效果。在葛洲坝水利工程中,该材料成功修复坝体深层裂缝,浆液渗透深度达3米以上,固化后形成与混凝土强度匹配的固结体,有效阻断水体渗漏通道。其固化反应可通过催化剂调控,在潮湿环境下仍能快速固化,48小时抗压强度可达40MPa,满足动态水压工况需求。(2)材料具备环境适应性优势。针对不同地质条件与水质环境,可定制化调整配方:在强腐蚀性水质中采用耐酸碱改性环氧体系,在低温环境开发早强型聚氨酯浆材,在宽裂缝场景使用弹性膨胀型复合浆液。例如,在南水北调中线工程中,采用抗冻融化学灌浆材料处理渠道伸缩缝,经50次冻融循环后强度损失率不足8%,显著提升结构耐久性。(3)施工工艺持续创新。通过高压喷射、智能控压等设备升级,实现浆液扩散范围精准控制,避免过度灌注或遗漏区域。结合无人机巡检与物联网监测技术,可实时评估灌浆效果,形成“检测-修复-验证”的闭环管理体系^[3]。

3.3 碳纤维补强加固技术

碳纤维补强加固技术凭借其高强轻质、耐腐蚀及施工便捷等特性,成为水利工程混凝土结构裂缝修复与性能提升的重要手段,为水利设施长期安全运行提供技术支撑。(1)该技术核心在于碳纤维材料的高性能优势。碳纤维布抗拉强度达3500MPa以上,是普通钢材的8-10倍,而密度仅为钢材的1/4,可显著提升结构承载力且不增加自重。其耐酸碱、盐雾腐蚀特性,尤其适用于海洋环境或高湿度地区的水利工程,如沿海泵站、跨海渡槽等,有效解决传统钢材加固易锈蚀失效的难题。材料弹性模量与混凝土接近,受力时变形协调,避免因刚度差异导致二次开裂。(2)施工工艺方面,碳纤维加固通过结构胶将碳纤维布与混凝土基材粘结,形成复合受力体系。粘结层采用低模量、高韧性的环氧类胶粘剂,确保应力传递均匀,避免局部应力集中。施工过程无需大型设备,可适应复杂结构形态,如异形截面、狭窄空间等,且对

原结构损伤小,实现“无损加固”。(3)技术适应性广泛,既可用于修复裂缝、弥补结构缺陷,也可用于提升结构抗震、抗冲击性能。通过调整碳纤维布层数与铺设方向,可针对性增强结构抗弯、抗剪或抗扭能力,满足不同工况需求。其耐久性经实测验证,在正常维护下设计使用寿命可达50年以上,与水利工程全生命周期需求高度契合。

3.4 纳米改性混凝土修补材料

纳米改性混凝土修补材料通过纳米科技对传统混凝土进行深度优化,从微观层面重构材料性能,为水利工程混凝土裂缝修复提供了兼具高强度与耐久性的解决方案。(1)其核心机制在于纳米颗粒的“填充-增强”双重作用。纳米二氧化硅、纳米氧化铝等超细颗粒(粒径<50nm)可深入混凝土孔隙,将孔隙率降低至5%以下,形成致密无缺陷的微观结构,使材料抗渗等级提升至P15以上,有效阻断水体及有害离子渗透。同时,纳米颗粒的高表面能促进水泥水化反应,生成更多针状钙矾石与C-S-H凝胶,将修补界面粘结强度提高至4.5MPa以上,远超普通混凝土自身强度,彻底消除新旧混凝土界面薄弱区。(2)材料性能呈现显著提升:抗压强度可达100MPa以上,抗拉强度提升2-3倍,且弹性模量与混凝土基材高度匹配,受力时变形协调,避免因刚度差异导致二次开裂。纳米纤维的引入进一步优化了抗裂性能,其桥接作用可抑制微裂缝扩展,使材料在动态水压或冻融循环下仍保持稳定。(3)施工适应性方面,纳米改性材料通过调整颗粒级配与外加剂配方,实现了流动性与粘聚性的平衡,既可满足垂直面或顶面修补的抗流挂需求,又能通过高压喷射工艺处理深层裂缝。其快速硬化特性(初凝时间<1小时)大幅缩短工期,为水利工程紧急抢修提供了技术保障。

3.5 聚合物水泥基复合修补材料

聚合物水泥基复合修补材料是一种通过有机聚合物与无机水泥基材料复合改性而成的新型功能材料,凭借其优异的粘结性、柔韧性和耐久性,在水利工程混凝土裂缝修复中展现出显著优势。(1)该材料的核心特性源于聚合物与水泥的协同作用机制。聚合物乳液(如苯丙乳

液、丁苯乳液)在水泥水化过程中形成三维网络结构,填充于水泥石孔隙中,将材料孔隙率降低至8%以下,显著提升抗渗性能,有效阻止水分及侵蚀性介质渗透。同时,聚合物膜的柔韧性赋予材料良好的变形能力,其断裂伸长率可达2%-4%,是普通混凝土的5-10倍,可适应结构微变形而不产生开裂,特别适用于动态荷载或温度变化频繁的水利工程环境。(2)界面粘结性能是该材料的突出优势。聚合物分子中的活性基团与混凝土表面发生化学吸附,形成化学键结合,同时聚合物膜的锚固效应产生机械咬合力,使修补界面粘结强度突破2.5MPa,远超混凝土自身抗拉强度,确保修复层与基材协同受力。此外,材料耐候性优异,在紫外线、冻融循环及盐雾侵蚀等恶劣环境下,仍能保持性能稳定,设计使用寿命可达30年以上^[4]。

结束语

水利工程混凝土结构裂缝成因复杂,涉及材料性能、施工工艺、环境作用及荷载效应等多重因素,其存在不仅削弱结构安全性,更威胁工程长期稳定运行。本研究通过系统分析裂缝形成机理,针对性提出新型修补材料解决方案:纳米改性材料通过微观结构优化提升抗渗抗裂性,聚合物水泥基复合材料凭借有机-无机协同增强粘结韧性,碳纤维补强技术实现结构承载力升级。实践表明,这些材料在修复效率、耐久性 & 环境适应性方面表现卓越,有效延长了水利工程使用寿命。未来需持续深化材料研发与施工技术创新,为水利基础设施安全提供更坚实的技术保障。

参考文献

- [1]崔超.水利工程施工中混凝土裂缝控制技术[J].河南建材,2020(8):130-131.
- [2]伦绍伟,陈得虎.水利工程中混凝土裂缝产生原因及防治措施分析[J].地下水,2021,39(4):97-98
- [3]闵超.水利工程施工中混凝土裂缝控制技术探讨[J].河南水利与南水北调,2020,0(1):57-58.
- [4]姜峰.水利工程大体积混凝土温控防裂技术[J].黑龙江水利科技,2021,49(3):191-193.