

# 水利工程中混凝土裂缝控制技术研究

王烨峰<sup>1</sup> 姚文平<sup>2</sup>

1 盐城市亭湖区水旱灾害防御调度指挥中心

2 盐城市亭湖区水利综合服务中心

DOI:10.12238/hwr.v9i10.6596

**[摘要]** 在水利工程建设过程中,混凝土裂缝是影响工程整体质量与长期安全运行的关键问题之一。本文系统分析水利工程混凝土裂缝的成因,包括温度变化、收缩变形、施工工艺及地基不均匀沉降等因素,并针对性地提出从原材料控制、配合比优化、温度调控到施工全过程管理等一系列裂缝防控关键技术。同时,对已出现裂缝的修补与结构加固方法进行归纳,并新增“混凝土裂缝的智能监测与预警技术”和“基于全寿命周期的裂缝综合管理策略”两个重要章节,旨在形成一套完整的水利工程混凝土裂缝控制技术体系,为实际工程提供理论依据与实践指导,提升工程耐久性与安全性。

**[关键词]** 水利工程; 混凝土裂缝; 控制措施; 施工工艺; 智能监测; 全寿命周期管理

中图分类号: TV331 文献标识码: A

## Research on Concrete Crack Control Technology in Water Conservancy Engineering

Yefeng Wang<sup>1</sup> Wenping Yao<sup>2</sup>

1 Yancheng Tinghu District Flood and Drought Disaster Prevention and Dispatch Command Center

2 Yancheng Tinghu District Water Conservancy Comprehensive Service Center

**[Abstract]** Concrete structure cracks are one of the key issues affecting the overall quality and long-term safe operation of water conservancy projects. This article systematically analyzes the causes of concrete cracks in hydraulic engineering, including factors such as temperature changes, shrinkage deformation, construction technology, and uneven settlement of the foundation. It also proposes a series of key crack prevention and control technologies, including raw material control, mix proportion optimization, temperature regulation, and overall construction process management. At the same time, the repair and structural reinforcement methods for cracks that have already appeared are summarized, and two important chapters, "Intelligent Monitoring and Early Warning Technology for Concrete Cracks" and "Comprehensive Crack Management Strategy Based on the Whole Life Cycle", are added, aiming to form a complete technical system for controlling concrete cracks in hydraulic engineering, providing theoretical basis and practical guidance for practical engineering, and improving the durability and safety of engineering.

**[Key words]** water conservancy engineering; Concrete cracks; Control measures; Construction technology; Intelligent monitoring; Whole life cycle management

水利工程作为支撑国民经济发展的重要基础设施,其施工质量直接关系到水资源调度、防洪安全及生态环境保护等多重目标的实现。混凝土因其优良的抗压性能与成型便利性,在水利工程建设中应用极为广泛。然而,由于混凝土材料本身的非均质性以及施工与使用环境的复杂性,裂缝问题一直是困扰工程技术人员的主要难题。裂缝不仅影响结构外观,更会削弱其整体性、抗渗性和承载能力,甚至诱发钢筋锈蚀,加速材料老化,严重影响工程使用寿命。因此,深入分析裂缝成因,系统总结防控技术,对提高水利工程建设的科技水平与质量管理能力具有重要意义。

本文结合工程实际,从原因分析、防控措施到处理技术展开全面探讨,并引入智能监测与全寿命周期管理等新理念,以期为相关工程实践提供参考。

## 1 水利工程混凝土裂缝的成因分析

### 1.1 温度应力引发的裂缝

混凝土在硬化阶段会因水泥水化反应释放大量热量,致使内部温度显著升高。当混凝土截面尺寸较大时,内部热量难以迅速散发,而表层混凝土受环境温度影响散热较快,由此形成内外温差。这种温差会引起不均匀的温度变形,进而产生温度应力。

一旦温度应力超出混凝土早期抗拉强度,便会导致开裂。特别是在高温季节施工的大体积混凝土构件,由于入模温度高、水化热积聚明显,温度裂缝的发生概率显著增加。此外,在寒冷地区,混凝土结构表面急剧降温也会引起较大的温度梯度,增加表面裂缝风险。

### 1.2 收缩变形导致的裂缝

混凝土在硬化前后均会发生体积收缩,主要包括塑性收缩与干燥收缩两种类型。塑性收缩多出现于浇筑后数小时内,混凝土尚处于可塑状态,若表面水分蒸发速率大于内部泌水速率,将导致表层体积收缩,而内部仍保持相对湿润,由此产生表面拉应力并形成不规则裂缝<sup>[1]</sup>。干燥收缩则发生在硬化后期,由于混凝土内部吸附水与毛细孔水逐渐散失,引起胶凝材料收缩,进而导致整体体积减小。当收缩受到外部或内部约束时,即会产生拉应力,当该应力超过混凝土抗拉极限,裂缝便随之形成。

### 1.3 施工工艺因素的影响

施工过程中的操作不当也是裂缝产生的原因之一。例如,混凝土拌合物搅拌不充分会造成组分分布不均,影响其工作性与强度发展;振捣不足易引起蜂窝、孔洞等缺陷,降低密实度与抗裂能力;而过振则可能导致骨料下沉、浆体上浮,增大不均匀收缩。模板支撑不牢固或拆模时间过早,混凝土强度尚未达到规定要求,此时结构自重或施工荷载可能引起开裂。此外,养护不及时或养护方式不当,会加速表面水分流失,增大收缩应力,从而诱发裂缝。

### 1.4 地基不均匀沉降引起的结构性裂缝

水利工程常建于地质条件复杂区域,若地基处理不当或土层压缩性差异较大,易导致基础不均匀沉降。当地基出现差异沉降时,上部混凝土结构将产生附加内力,特别是在结构刚度突变或截面形状不连续处,应力集中现象突出,进而导致混凝土开裂。此类裂缝通常宽度较大、延伸较长,对结构整体性与安全性影响显著,需在设计与施工阶段予以重点防控。

## 2 水利工程混凝土裂缝控制的关键技术措施

### 2.1 原材料优选与质量控制

水泥作为水利工程混凝土的核心胶凝材料,其品种与性能对裂缝控制具有重要影响。推荐选用中热或低热水泥,如粉煤灰硅酸盐水泥、矿渣水泥等,以降低水化热峰值。同时,应严格控制水泥的安定性、凝结时间及强度等级,确保材料质量稳定。

骨料在水利工程混凝土中起骨架作用,其级配、粒形和含泥量对混凝土工作性、强度及收缩性能影响显著。粗骨料宜采用连续级配,压碎指标与针片状含量应符合规范要求;细骨料宜选用级配良好、细度模数在2.3~3.0之间的中粗砂,含泥量须低于规定限值。

掺合料与外加剂的合理使用能有效改善水利工程混凝土抗裂性能。粉煤灰、矿粉等活性掺合料可替代部分水泥,降低水化热,改善微观结构;高效减水剂能在保证工作性前提下减少用水量,从而降低收缩;缓凝剂可延缓水化进程,有利于散热与施工操作。

### 2.2 配合比设计的科学优化

水利工程混凝土配合比设计需在满足强度、耐久性与施工和易性要求的基础上,重点考虑抗裂性能。通过试验确定适宜的水胶比,一般建议在满足工作性前提下尽量取较低值,以减小收缩与徐变。胶凝材料总量不宜过高,可通过掺入矿物掺合料控制水泥用量,降低温升。砂率的选取应兼顾流动性与抗离析需求,通常通过试配确定最优值<sup>[2]</sup>。

可采用正交试验、响应面法等现代设计方法,系统分析各因素对混凝土开裂敏感性的影响,从而得出抗裂性能优良的配合比方案。此外,应根据季节变化与施工环境对配合比进行动态调整,例如夏季施工可适当增加掺合料比例并采用缓凝型外加剂。

### 2.3 温度控制综合策略

对于水利工程大体积混凝土,温度控制是防裂的关键。可采用预冷骨料、加冰拌和等方式降低混凝土出机与入模温度。在结构内部布置冷却水管,通过循环水带走水化热,是实现内部降温的有效手段。冷却水管间距、通水流量与时长需通过热工计算确定,并加强温度监测,实行智能化调控。

在水利工程混凝土浇筑后,应及时采取保温保湿措施。表面覆盖塑料薄膜、土工布或设置喷淋系统,能够有效抑制表面水分蒸发,减缓降温速率,减小内外温差。保温层的材料与厚度应根据气候条件与混凝土内部温度场确定,防止表面温度骤降引发裂缝。

### 2.4 施工工艺的精细化管理

水利工程混凝土搅拌应保证均匀性,搅拌时间符合规范要求。运输过程中需采取措施防止离析与坍落度损失。浇筑宜分段分层进行,每层厚度控制在300~500mm,避免一次浇筑过厚导致内部温升过高。振捣作业应规范,做到不过振、不漏振,以混凝土表面泛浆、无明显下沉为度。

浇筑完成后需及时进行抹压收面,以封闭表面塑性裂缝。在终凝后立即开始养护,保持混凝土表面持续湿润,养护时间不应少于14天,对大体积混凝土或干燥大风环境应适当延长。可采用蓄水养护、覆盖湿麻袋或自动喷淋系统等方式,确保持续保湿。

## 3 水利工程混凝土既有裂缝的处理与加固技术

### 3.1 表面封闭法

针对宽度小于0.2mm的表层裂缝,若无渗水且对水利工程结构承载力无影响,可采用表面封闭处理。常用材料包括聚合物水泥砂浆、环氧树脂胶泥等。施工前需沿裂缝走向凿槽清理,涂刷底层界面剂后压抹修补材料,必要时加贴纤维布增强封闭效果。

### 3.2 注浆修复技术

对水利工程宽度较大或较深的混凝土裂缝,宜采用压力注浆进行修复。根据裂缝性质选择水泥基浆液、环氧树脂或聚氨酯等化学浆液。注浆前应沿裂缝埋设注浆管或粘贴注浆嘴,并封闭裂缝表面。注浆压力一般控制在0.2~0.5MPa,由低到高分级施加,待临近注浆嘴出浆后依次封闭,直至整条裂缝填充密实。

### 3.3 结构加固补强措施

当水利工程混凝土裂缝影响结构安全或正常使用时,需采取加固措施。常见方法包括粘贴钢板、碳纤维布(CFRP)加固、增设预应力筋。粘贴钢板法适用于提高构件抗弯、抗剪能力;碳纤

维布具有轻质高强、施工便捷的优点，广泛用于梁、板、柱的抗弯抗剪补强；预应力加固则可有效闭合裂缝并改善应力状态<sup>[3]</sup>。选择加固方案时，应依据结构检测鉴定结果，综合考虑裂缝成因、开展状态及受力特征进行设计。

#### 4 水利工程混凝土裂缝的智能监测与预警技术

##### 4.1 现代监测手段的应用

当前，基于新型传感原理的监测方法为水利工程混凝土裂缝识别提供了多样化技术路径。分布式光纤传感技术通过测量光信号在光纤中的传输特性变化，可获取混凝土结构全截面的应变场和温度场分布信息，实现对裂缝萌生位置和发展趋势的精确判断。压电传感器技术利用应力波在介质中传播时的能量衰减和波形变化特征，反演裂缝的深度和扩展方向。基于机器视觉的表面监测系统采用高分辨率摄像设备，结合数字图像处理算法，能够非接触式地获取裂缝的宽度、长度和形态等几何参数，并实现长期自动化跟踪<sup>[4]</sup>。这些监测手段形成了从内部到表面、从局部到整体的多层次监测网络，为水利工程混凝土裂缝的早期识别和定量分析提供了可靠的数据支撑。

##### 4.2 大数据分析与预警平台

通过构建水利工程混凝土裂缝多源信息融合数据库，整合材料特性、环境条件和结构响应等多维度参数，建立基于数据驱动的裂缝智能预测系统。该平台采用机器学习算法，通过对历史监测数据的学习训练，建立裂缝发生概率与多种影响因素之间的非线性映射关系。系统能够根据实时采集的应变、温度等数据，预测裂缝产生的可能性及其时空演化规律，实现分级预警功能。针对不同风险等级，平台可发出相应级别的预警信号，并提供针对性的处置建议，为工程管理人员制定预防措施和应急预案提供科学依据，显著提高水利工程混凝土裂缝控制的预见性和主动性。

##### 4.3 数字孪生技术的集成应用

数字孪生技术通过构建与物理实体相对应的虚拟模型，实现水利工程混凝土结构的全生命周期数字化管理。该系统集成BIM模型与实时监测数据，建立能够反映结构真实状态的动态仿真模型。通过数值模拟方法，系统可以预测不同荷载组合和环境条件下裂缝的发生发展过程，并对各种防控措施的效果进行虚拟验证。这种“虚实互动”的技术手段使工程人员能够在数字空间中进行方案比选和优化，为水利工程混凝土裂缝控制策略的制定提供科学依据，推动裂缝防控模式从被动处置向主动预防的转变，提升水利工程混凝土结构的智能化管理水平<sup>[5]</sup>。

#### 5 基于全寿命周期的水利工程混凝土裂缝综合管理策略

##### 5.1 设计阶段的防控措施

在设计阶段应充分考虑水利工程混凝土裂缝控制要求，通过合理的结构分缝、配置温度钢筋、设置后浇带等措施释放约束应力。同时，基于全寿命周期成本分析，选择抗裂性能优良的材料与结构形式，从源头上降低裂缝发生风险。

##### 5.2 施工期的精细化控制

制定详细的水利工程混凝土裂缝控制专项施工方案，明确各环节质量控制指标。建立施工全过程监测系统，实时采集混凝土温度、应变等参数，及时调整施工措施。推行标准化施工工艺，加强施工人员培训，确保裂缝控制措施有效落实。

##### 5.3 运营期的维护管理

建立定期检测与评估制度，运用现代检测技术对水利工程混凝土裂缝进行定期监测与记录。根据裂缝发展情况制定分级维护计划，对轻微裂缝进行预防性维护，对严重裂缝及时采取修复措施。建立完整的工程档案，为长期维护提供数据支持。

##### 5.4 智能化管理平台建设

构建集监测、评估、预警、维护于一体的水利工程混凝土裂缝综合管理平台。该平台应整合设计、施工、运营各阶段数据，实现裂缝信息的全流程可追溯。通过数据分析与挖掘，不断优化裂缝控制策略，提升管理水平。

#### 6 结论与展望

##### 6.1 结论

混凝土裂缝控制是工程施工中的一项系统性工程，涉及材料、设计、施工及维护等多个环节。通过优选原材料、优化配合比、加强温度监控与施工过程管理，能够有效预防大多数非结构裂缝的产生。对已出现的裂缝，则应科学判别其性质与危害程度，采取适宜的处理与加固措施，恢复结构整体性与耐久性。智能监测与全寿命周期管理新章节的加入，进一步完善了裂缝控制技术体系，体现了现代水利工程管理的发展方向。

##### 6.2 展望

未来，随着材料科学与监测技术的发展，基于大数据与人工智能的裂缝预测预警系统、自修复混凝土等新型技术有望在水利工程中得到应用，进一步提升裂缝控制的智能化与精细化水平。同时，应加强全寿命周期管理理念，从设计、施工到运营维护各阶段通盘考虑，系统提升水利工程混凝土结构的长期性能与服务水平。

#### 参考文献

- [1] 马伟.水利工程施工中控制混凝土裂缝的技术思考[J].水上安全,2025,(11):161-163.
- [2] 孙久社.水利工程施工中控制混凝土裂缝的技术研究[J].四川建材,2025,51(06):150-152+155.
- [3] 李振全.水利工程混凝土裂缝成因分析及控制技术研究[J].石化技术,2025,32(05):409-410.
- [4] 周艳艳,孙震国.水利工程混凝土施工技术及裂缝控制研究[J].水上安全,2025,(04):196-198.
- [5] 颜晓晓,李永波.水利工程施工中控制混凝土裂缝技术分析[J].水上安全,2025,(02):139-141.

#### 作者简介：

王烨峰(1988--),男,汉族,江苏东台人,本科,工程师,研究方向:水利工程建设管理、水利规划等。

姚文平(1989--),女,汉族,连云港市赣榆区人,本科,工程师,研究方向:水利工程、工程建设或工程管理。