

水利施工中混凝土裂缝产生的原因及防治措施

洪逸

丽水弘盛工程建设有限公司 浙江 丽水 323000

摘要：本文针对水利工程中混凝土裂缝的频发问题，系统分析了其危害性（如渗漏、结构失稳、寿命缩短）及防治意义。通过剖析材料缺陷、施工工艺、环境应力等成因，提出优化配合比设计、智能温控施工、预应力加固等系统性防治措施，并介绍分布式光纤监测、化学灌浆修复、自修复混凝土等前沿技术。研究结果可为水利工程裂缝防控提供理论依据与技术路径，助力提升工程安全与耐久性。

关键词：水利工程；混凝土裂缝；温控技术；化学灌浆；智能监测

引言：混凝土作为水利工程的核心材料，其裂缝问题直接威胁大坝、水闸、隧洞等结构的安全运行。据统计，我国约60%的水利工程病害与混凝土裂缝相关，每年因裂缝导致的维修费用高达数十亿元。传统裂缝防治多依赖经验性措施，缺乏系统化解解决方案。本文从裂缝成因机理出发，结合工程案例与技术前沿，提出涵盖“预防-监测-修复”的全周期防控体系，为解决行业共性难题提供参考。

1 水利工程中混凝土裂缝的危害与防治意义

1.1 裂缝的工程危害

（1）在结构安全上，裂缝破坏混凝土整体性，形成渗流通道，引发管涌、滑坡等灾害。如三峡大坝蓄水初期，某坝段表面裂缝导致渗流量达0.5L/s，威胁坝基稳定；某水库拱坝因裂缝扩展，坝顶位移超限20%，造成亿元损失。（2）耐久性方面，裂缝为侵蚀介质打开通道，加速钢筋锈蚀。当裂缝宽度超0.2mm，氯离子渗透速率提升3~5倍，钢筋钝化膜1~2年内被破坏。像某海港码头因裂缝未及时修复，5年后钢筋锈蚀率达12%，混凝土剥落超30%，被迫提前大修。（3）经济效益上，裂缝修复成本高昂，通常占工程总造价5%~15%。某水电站泄洪闸修复温度裂缝，单次费用1200万元，综合损失超3000万元，还造成工期延误与社会信任危机。

1.2 防治技术价值

（1）社会效益上，其保障水利工程核心功能，如预应力技术将某病险水库大坝抗滑稳定性系数从1.05提升至1.35；白鹤滩水电站借智能温控系统，使大坝裂缝率从15%降至0.3%，守护2000万人防洪安全。南水北调输水渠道加固后，预计服役期延长30年，惠及1.2亿人口。（2）生态效益方面，裂缝防治有效减少水资源渗漏^[1]。华北某平原水库经防渗处理，年渗漏量从800万m³降至150万m³；某湿地保护区周边水库裂缝修复后，濒危植物种群

数量增加40%，降低地质灾害对环境威胁。（3）经济效益上，早期防控投入产出比超1:5。某抽水蓄能电站采用低热水泥与冷却水管技术，以800万元初期投入避免4000万元后期修复费用，还因提前发电增收超2亿元。灌区部署光纤传感系统后，年运维费减少300万元，且技术应用提升工程资产潜在价值。

2 混凝土裂缝产生的主要成因分析

2.1 材料与配合比缺陷

（1）水泥水化热集中：高标号水泥在早期水化过程中，热量释放速率高达200~250J/(g·h)，这一特性在大体积混凝土施工中尤为突出。由于混凝土导热性差，内部热量难以快速散发，导致混凝土内外温差极易超过25℃的规范限值。以某大型水坝工程为例，在浇筑过程中，因使用高水化热水泥，坝体内部温度持续攀升，与表面温差达到35℃，巨大的温差致使混凝土内部膨胀、表面收缩，从而引发温度裂缝。这些裂缝不仅降低混凝土结构的整体性，还为水分和侵蚀性介质提供渗透通道，加速结构劣化。（2）骨料级配不良：骨料级配直接影响混凝土的收缩性能。当细骨料（粒径<0.15mm）含量超过15%时，混凝土比表面积增大，需水量增加，水泥水化后多余水分蒸发，导致混凝土收缩率增加30%。在某引水渠道施工中，因骨料级配不合理，细骨料占比过高，混凝土硬化后产生大量干缩裂缝。此外，骨料级配不良还会影响混凝土的和易性和强度，降低其抗裂性能。

2.2 施工工艺失控

（1）浇筑工艺缺陷：混凝土浇筑工艺对裂缝产生有着重要影响。分层浇筑时，若分层厚度超过1.5m，下层混凝土在未充分凝结前承受上层混凝土的压力，会导致层间结合力下降40%，形成冷缝。冷缝处混凝土的抗渗性和强度显著降低，在水压力作用下，容易引发渗漏和裂缝扩展。某水库溢洪道施工中，因分层厚度过大，浇筑

后不久便出现多条冷缝,严重影响工程质量,不得不进行返工处理^[2]。(2)养护条件不足:混凝土养护是保证其性能的关键环节。当相对湿度低于60%时,混凝土水分蒸发加快,7d收缩率增加2倍,干缩裂缝风险急剧上升。在干旱地区的水利工程中,若养护措施不到位,混凝土表面水分快速散失,表面产生拉应力,当拉应力超过混凝土抗拉强度时,就会出现干缩裂缝。此外,养护时间不足、养护温度不适宜等问题,也会影响混凝土的强度增长和抗裂性能。

2.3 环境与结构应力

(1)温度应力:环境温度变化对混凝土结构影响显著。当昼夜温差超过15℃时,混凝土表面温度迅速下降,而内部温度变化相对缓慢,导致混凝土表面产生拉应力,若拉应力超过混凝土抗拉强度(2~3MPa),就会引发表层开裂。在北方地区的水工建筑物中,冬季昼夜温差大,混凝土表面经常出现温度裂缝。这些裂缝若不及时处理,会随着温度变化进一步扩展,影响结构安全。(2)基础约束:基岩与混凝土弹性模量存在较大差异,基岩弹性模量为30~50GPa,而混凝土仅为20~35GPa,这种差异会导致混凝土在收缩或温度变化时,受到基础的约束,产生应力集中。在混凝土浇筑后,随着温度降低和水分散失,混凝土体积收缩,由于基础的约束作用,在混凝土底部和边缘部位产生较大的拉应力,当拉应力超过混凝土抗拉强度时,就会出现裂缝。某水电站大坝基础部位,因基础约束应力集中,产生多条贯穿性裂缝,严重威胁大坝安全。

3 混凝土裂缝防治的系统性技术措施

3.1 材料与配合比优化

(1)低热水泥应用:低热水泥的合理选用是控制水化热的核心手段。中热硅酸盐水泥中C2S(硅酸二钙)含量超过40%,其水化反应进程更为平缓,相较于普通水泥,水化热可降低15%~20%。在大型水坝、基础底板等大体积混凝土工程中,采用低热水泥能显著减少内部热量积聚,降低混凝土内外温差。以某高拱坝建设为例,通过使用低热水泥,结合分层浇筑工艺,将混凝土内部最高温度控制在68℃,相较于常规水泥方案,温差降低了12℃,有效避免了因水化热过高引发的温度裂缝,保障了坝体结构的完整性。(2)膨胀剂掺入:氧化镁膨胀剂凭借独特的化学膨胀特性,在混凝土裂缝防治中发挥重要作用。其遇水后缓慢发生水化反应,产生的膨胀作用可补偿混凝土干缩变形,补偿收缩率可达0.02%~0.05%。在渠道衬砌、薄壁混凝土结构施工中,掺入适量氧化镁膨胀剂,能有效抵消混凝土硬化过程中的

干缩应力,阻止干缩裂缝的产生。某引水工程的箱涵施工中,通过在混凝土中掺入3%的氧化镁膨胀剂,混凝土收缩值降低了40%,工程竣工后经过两年监测,未出现明显干缩裂缝,结构抗渗性能显著提升。

3.2 施工过程控制

(1)智能温控系统:智能温控系统整合了温度监测与冷却技术,实现对混凝土温度的精准调控。通过在混凝土内部埋设间距为1.5m×1.5m的冷却水管,并以1.5m/s的流速循环通水,可有效带走水化热,将混凝土内部温度控制在≤65℃的安全范围。系统搭载的传感器实时采集温度数据,结合预设阈值自动调节冷却水流量和温度,形成闭环控制。在白鹤滩水电站大坝建设中,智能温控系统使大坝混凝土最高温度始终保持在设计限值内,大坝裂缝率仅为0.3%,远低于同类工程的15%,充分验证了该技术在超大型混凝土工程中的有效性。(2)分块跳仓浇筑:“跳仓法”施工打破传统连续浇筑模式,通过将结构划分为尺寸不大于30m×30m的仓块,间隔跳仓浇筑,使混凝土在早期收缩阶段释放应力^[3]。相邻仓块浇筑间隔时间一般为7~10天,待先浇筑仓块混凝土强度达到70%以上,收缩变形基本稳定后,再浇筑剩余仓块。某大型船闸底板施工中采用跳仓法,有效避免了混凝土因大面积连续浇筑产生的收缩裂缝,相较于传统施工方法,裂缝数量减少了80%,施工效率提高15%,同时降低了后期裂缝修复成本。

3.3 结构应力调控

(1)诱导缝设置:诱导缝作为一种主动引导裂缝发展的技术措施,通过在大坝横缝间每隔50~80m设置诱导缝,改变混凝土内部应力分布路径。诱导缝处采用弱化结构设计,如预埋金属片、设置凹槽等,使裂缝优先在诱导缝位置开展,避免裂缝无序扩展。某碾压混凝土重力坝工程中,通过合理设置诱导缝,将裂缝控制在预设范围内,经检测,诱导缝处裂缝宽度均匀,未对大坝防渗和结构安全造成影响,保障了大坝长期稳定运行。

(2)预应力加固:对于闸墩等薄壁结构,施加体外预应力(0.4~0.6f_{ptk},f_{ptk}为预应力筋抗拉强度标准值)能显著提升结构抗裂性能。预应力的施加在混凝土结构内部形成预压应力,抵消部分由荷载、温度变化等因素产生的拉应力,使结构抗裂能力提升30%~50%。在某水闸闸墩加固工程中,通过采用体外预应力技术,闸墩在高水位运行工况下,混凝土表面拉应力降低至1.2MPa,低于混凝土抗拉强度,有效防止了裂缝的产生,延长了闸墩使用寿命,确保水闸安全运行。

上述系统性技术措施从多环节构建了混凝土裂缝防

治体系。若你想补充更多案例细节，或调整技术阐述重点，可随时提出。

4 裂缝检测与修复的先进技术方案

4.1 早期监测技术

(1) 分布式光纤传感：分布式光纤传感技术以应变光纤为监测载体，通过监测光纤中光信号的变化，实现对混凝土结构裂缝的高精度监测。沿结构布设的光纤如同“感知神经”，可捕捉0.01mm级的裂缝宽度变化，精度达 $\pm 0.005\text{mm}$ 。其监测范围广、抗干扰能力强，能实时、连续地获取结构健康状态数据，尤其适用于大体积混凝土结构和线性工程，为裂缝早期预警提供可靠依据。(2) 无人机巡检：搭载热成像仪的无人机，为裂缝检测带来革命性突破。热成像仪通过捕捉混凝土表面温度差异，快速定位裂缝位置，相比传统人工巡检，检测效率提升5倍。无人机可灵活飞行至人工难以抵达的高空、复杂地形区域，实现对结构表面的全覆盖扫描，生成可视化检测图像，大幅提高检测效率与准确性。

4.2 修复工艺创新

(1) 化学灌浆技术：化学灌浆技术采用环氧树脂-聚氨酯复合浆液，兼具环氧树脂的高强度粘结性与聚氨酯的高渗透性。该浆液粘度为 $50\sim 100\text{mPa}\cdot\text{s}$ ，渗透半径可达1.5m，能有效填充裂缝并与混凝土紧密粘结，修复后强度可达母材的90%^[4]。在桥梁、水工结构裂缝修复中，化学灌浆技术可快速恢复结构完整性，提升其承载能力。(2) 碳纤维网格加固：碳纤维网格加固技术通过在裂缝两侧粘贴间距10cm的碳纤维网格，显著增强混凝土结构的抗拉性能。碳纤维材料具有高强度、轻质耐腐蚀的特性，粘贴后可使结构抗拉强度提升2~3倍。该技术施工便捷，对原结构影响小，广泛应用于建筑、桥梁等混凝土结构的加固修复。

4.3 智能自修复材料

(1) 微生物自修复：微生物自修复材料通过在混凝土中掺入芽孢杆菌与钙源，实现裂缝的自主修复。当裂缝宽度小于0.3mm时，芽孢杆菌在适宜环境下激活，催化钙源反应生成碳酸钙，填充裂缝，28d自修复率超80%。这种技术无需人工干预，为混凝土结构的长期耐久性提供了新的解决方案。(2) 形状记忆合金：形状记忆合金（如NiTi合金丝）的应用为裂缝修复带来新思路。将合金丝埋设在混凝土结构中，当环境温度达到 $50\sim 70^\circ\text{C}$ 时，合金丝触发形状记忆效应，产生形变主动闭合裂缝，有效阻止裂缝扩展，提升结构的自维护能力。

结语

水利工程混凝土裂缝防控需以全生命周期视角统筹“材料-设计-施工-监测”协同优化，通过多技术融合实现从被动修复到主动防控的范式转变。未来需聚焦仿生自修复材料（如微生物矿化混凝土）、数字孪生驱动的风险预测、低碳胶凝材料替代等前沿方向，构建“智能感知-自主愈合-绿色低碳”的下一代裂缝防控体系，推动水利工程向“零可见裂缝、全寿命耐久”目标跨越，为全球水安全治理提供中国方案。

参考文献

- [1]商福海.施工中混凝土裂缝产生的原因及防治措施[J].工程技术研究,2022,7(12):146-148.
- [2]郭志朝.施工中混凝土裂缝产生的原因及防治措施分析[J].工程建设与设计,2020,(20):140-141.
- [3]王伟.混凝土裂缝产生的原因与防治措施[J].建筑科学,2020,36(2):45-48.
- [4]李丽.混凝土施工技术与裂缝防治研究[J].土木工程,2021,28(3):50-54.