

# 混凝土裂缝控制技术在水利枢纽施工中的应用

白 晓

河北省水利工程局集团有限公司 河北 石家庄 050000

**摘 要:** 水利枢纽是水资源调控与能源供给的核心工程,其混凝土结构完整性直接影响工程安全与寿命。混凝土裂缝作为常见质量隐患,易引发渗漏、钢筋锈蚀等连锁问题,威胁枢纽运行安全。本文以水利枢纽混凝土结构为研究对象,从材料、设计、施工、环境四方面系统分析裂缝成因,提出涵盖材料优化、结构设计改进、施工工艺革新及监测预警一体化的控制技术体系,并通过高坝、泄洪建筑物等典型案例验证其有效性。研究表明,针对性应用裂缝控制技术可显著降低裂缝发生率,为水利枢纽施工提供技术支撑,对保障工程耐久性与安全性具有重要现实意义。

**关键词:** 混凝土裂缝;水利枢纽;裂缝控制技术;施工工艺

引言:水利枢纽工程兼具防洪、发电、灌溉等战略功能,混凝土作为核心建筑材料,其结构质量直接决定工程长期运行稳定性。近年来,多座水利枢纽在施工阶段出现混凝土裂缝问题,部分引发渗漏,不仅增加运维成本,更威胁工程安全。传统裂缝控制手段缺乏系统性,难以适应水利枢纽混凝土体积庞大、施工环境复杂的特点。随着工程建设标准提升,裂缝控制要求愈发严格。本文聚焦水利枢纽施工场景,深入分析裂缝形成机制,构建全流程控制技术体系,结合典型工程案例验证其实践价值,为解决施工裂缝难题提供科学方案,助力提升水利枢纽建设质量。

## 1 水利枢纽混凝土结构特点

### 1.1 结构特性

水利枢纽混凝土结构具有显著的特殊性,首要表现为体积庞大,高坝、厂房等核心构件单次浇筑量常达数千立方米,形成大体积混凝土结构,内部水泥水化热难以快速散发,易产生温度应力。其次是受力条件复杂,运行中需承受水压力、自重、温度变化及地震等多重荷载,结构内部应力分布不均,局部区域易出现应力集中。再者,与水直接接触的特性决定其抗渗性与耐久性要求严苛,混凝土需同时具备高强度与高抗渗性能,避免水体渗透引发结构破坏。此外,结构整体性要求高,各构件衔接紧密,一处出现裂缝易引发连锁反应,影响整个枢纽的结构稳定性,因此对混凝土施工质量的把控尤为关键。

### 1.2 施工特性

水利枢纽混凝土施工呈现鲜明的行业特性,施工周期长是突出特点,大型枢纽混凝土施工常跨越多个年度,需经历不同气候季节,温度、湿度等环境因素波动大,给裂缝控制带来挑战。施工强度高且集中,为赶工

期需实现混凝土连续浇筑,单日浇筑量可达数千立方米,对搅拌、运输、浇筑等环节的协同效率要求极高。施工环境复杂多样,部分枢纽建于山区或河谷地带,场地狭窄、交通不便,增加了材料运输与施工组织难度<sup>[1]</sup>。同时,施工受自然条件影响显著,暴雨、高温、严寒等极端天气易中断施工,若处理不当易在混凝土凝结过程中产生裂缝。此外,多专业交叉施工特征明显,需与机电安装、金属结构施工等协同配合,施工工序衔接直接影响混凝土施工质量。

## 2 水利枢纽混凝土裂缝成因分析

### 2.1 材料因素

材料选择与配比不合理是引发混凝土裂缝的核心内因。水泥品种选择不当,若采用水化热高的硅酸盐水泥用于大体积混凝土浇筑,会导致内部温度急剧升高,形成较大内外温差引发温度裂缝。骨料质量不达标,如碎石含泥量过高、颗粒级配连续度差,会降低混凝土密实度,增加收缩变形风险;砂率过大或过小则影响混凝土工作性与强度,易出现塑性收缩裂缝。外加剂使用不当,缓凝剂掺量不足会缩短混凝土初凝时间,导致浇筑过程中出现冷缝;膨胀剂掺量失控则可能引发混凝土体积变形异常。此外,混凝土配合比失衡,水胶比过大不仅降低强度,还会增加干燥收缩量,为裂缝产生创造条件。

### 2.2 设计因素

结构设计缺陷是混凝土裂缝产生的重要前提。结构体型设计不合理,如大体积混凝土构件未设置合理的伸缩缝与后浇带,无法释放温度应力与收缩应力,易在应力集中部位出现裂缝。配筋设计不足,温度钢筋与构造钢筋配置密度不够,或钢筋间距过大,难以有效抑制混凝土收缩变形,导致裂缝扩展。抗裂设计考虑不周,未

结合水利枢纽受力特点与环境条件优化设计参数,如未针对高水位区域强化抗渗配筋,或未考虑严寒地区冻融循环对混凝土的影响。此外,节点设计过于复杂,构件交接处截面突变,易形成应力集中;设计中未明确合理的温控指标,也会导致施工缺乏针对性的控温依据,增加裂缝风险。

### 2.3 施工因素

施工工艺执行不到位是裂缝产生的直接诱因。混凝土浇筑工艺缺陷,如分层浇筑厚度过大(超过50cm)、层间间歇时间过长,会导致下层混凝土初凝后上层才浇筑,形成冷缝;振捣不密实或漏振会使混凝土内部存在空隙,降低结构整体性与抗裂性。温控措施缺失,浇筑后未及时采取通水冷却、表面覆盖保温等措施,导致混凝土内外温差超过25℃,引发温度裂缝。模板工程问题,模板支撑刚度不足会在混凝土自重作用下产生变形,导致表面裂缝;拆模时间过早,混凝土强度未达到设计要求,易因承受荷载而开裂。养护措施不当,浇筑后未及时保湿养护,或养护周期不足,会加速混凝土水分蒸发,引发干燥收缩裂缝<sup>[2]</sup>。

### 2.4 环境因素

外部环境条件对混凝土裂缝的产生具有显著诱发作用。温度变化是主要诱因,夏季高温环境下混凝土浇筑后表面水分蒸发过快,易产生塑性收缩裂缝;冬季严寒天气未采取保温措施,混凝土内部水化热与外部低温形成强烈温差,引发温度应力裂缝。湿度波动影响显著,干旱地区空气湿度低,混凝土表面水分散失速度超过内部补给速度,会导致表面干缩开裂;雨季施工若遇暴雨冲刷未初凝的混凝土表面,不仅影响强度,还会形成表面裂缝。此外,基础不均匀沉降也会引发裂缝,水利枢纽场地地质条件复杂,若地基处理不到位,混凝土浇筑后基础沉降不均,会使结构产生附加应力,导致沉降裂缝。

## 3 混凝土裂缝控制关键技术

### 3.1 材料优化技术

材料优化是从源头控制裂缝的核心技术。水泥选用低热矿渣硅酸盐水泥或粉煤灰硅酸盐水泥,降低水化热释放速率,大体积混凝土中水泥用量控制在300kg/m<sup>3</sup>以下。骨料优化采用连续级配的碎石,含泥量控制在1%以内,选用线膨胀系数小的玄武岩或花岗岩骨料;砂采用中粗砂,砂率控制在35%-40%,提升混凝土密实度。外加剂精准掺配,掺加1%-2%的高效减水剂降低水胶比至0.45以下,掺加8%-10%的粉煤灰或矿粉替代部分水泥,同时掺加3%-5%的膨胀剂补偿收缩。混凝土配合比

通过正交试验确定,在满足强度的前提下,平衡工作性与抗裂性,确保混凝土28天抗压强度达标且收缩率低于0.04%。

### 3.2 结构设计优化

结构设计优化旨在构建抗裂性能优异的混凝土结构体系。体型优化采用分块浇筑设计,大体积混凝土构件按15m×10m分块,设置2m宽后浇带,间距不超过30m,有效释放温度应力。配筋设计强化,在温度应力集中区域加密温度钢筋,采用Φ12@150的双向钢筋网,构件边缘与转角处增设加强筋,提升抗裂能力。抗裂设计针对性提升,高水位区域采用C40抗渗混凝土,抗渗等级不低于P8;严寒地区混凝土中掺加引气剂,引气率控制在3%-5%,提升抗冻融性能。节点设计简化,避免截面突变,采用平滑过渡形式;明确温控设计指标,规定入仓温度≤25℃,内外温差≤25℃,降温速率≤2℃/d。

### 3.3 施工工艺改进

施工工艺改进是控制混凝土裂缝的核心环节,需从浇筑、温控、模板及养护等多维度协同优化。浇筑工艺方面,采用斜面分层推移浇筑法,分层厚度严格控制在30-50厘米,层间间歇时间不超过2-3小时,通过缩短间歇时间确保上下层混凝土粘结密实,避免形成冷缝;振捣环节选用插入式振捣器,按“快插慢拔”原则操作,振捣时间控制在20-30秒,以混凝土表面泛浆且无气泡逸出为标准,防止过振导致骨料下沉或欠振引发孔隙。温控施工强化方面,骨料预冷采用风冷与水冷结合技术,将骨料温度降至15℃以下,拌合水中加入冰块进一步降低入仓温度;浇筑后立即覆盖土工布与保温被,减少表面热量散失,同时布设蛇形冷却水管,通入10-15℃的循环水进行内部降温,控制混凝土内外温差。模板工程升级选用高刚度钢模板,支撑系统采用碗扣式脚手架,确保模板变形量不超过跨度的1/500;拆模时间严格依据混凝土强度发展曲线,待强度达到设计强度的70%以上方可拆模,避免因早拆导致结构应力重分布<sup>[3]</sup>。养护工艺精细化采用“土工布覆盖+定时洒水”或蓄水养护,养护周期不少于28天,保持混凝土表面持续湿润,减少干缩裂缝风险。

### 3.4 裂缝监测与预警系统

构建智能化监测预警系统是实现裂缝动态管控的关键,通过多参数实时监测与分级预警机制,实现裂缝的早发现、早处置。监测指标涵盖混凝土内部温度、表面温度、应变及裂缝宽度四类核心参数;在大体积混凝土内部按5-8米间距布设高精度温度传感器,表面设置测温点形成立体监测网络;在应力集中区域(如约束边

角、孔洞周边)粘贴应变计,实时追踪应力变化趋势。监测设备采用无线传感网络技术,数据传输速率不低于1Mbps,支持24小时连续监测,数据采集频率设定为每15分钟一次,确保数据时效性。预警机制按风险等级分为黄色与红色两级:当监测到内外温差达到22℃或降温速率超过1.8℃/天时,系统自动触发黄色预警,联动启动加强保温措施(如增加保温被层数或延长通水冷却时间);当出现宽度 $\geq 0.1$ 毫米的裂缝或应变值达到设计极限的80%时,立即升级为红色预警,强制暂停相关施工,并同步推送修补指令至现场终端。系统配套建立云端数据平台,集成数据可视化分析模块与历史追溯功能,通过趋势曲线、热力图等形式直观展示裂缝发展规律,为优化施工参数、调整温控策略提供量化依据,形成“监测-预警-处置-反馈”的闭环管理体系。

#### 4 典型水利枢纽工程应用案例分析

##### 4.1 高坝大体积混凝土裂缝控制案例

溪洛渡水电站混凝土重力坝最大坝高180m,坝体混凝土总量达200万立方米,施工中应用全套裂缝控制技术。材料上选用P·O42.5低热水泥,掺加40%粉煤灰,采用连续级配玄武岩骨料,配合比优化后水胶比0.42。设计上分块浇筑,块体尺寸12m $\times$ 8m,设置2m宽后浇带,配筋采用 $\Phi 14@150$ 双向钢筋网。施工中骨料风冷至12℃,入仓温度控制在22℃,浇筑后布设三层冷却水管通水冷却,表面覆盖保温被,养护周期30天。监测系统实时追踪显示,坝体内部最高温度65℃,内外温差控制在23℃以内。施工全过程仅出现2处宽度 $\leq 0.08$ mm的浅表裂缝,经表面封闭处理后无扩展,裂缝控制率达99%以上,满足设计要求<sup>[4]</sup>。

##### 4.2 泄洪建筑物混凝土裂缝控制案例

小浪底水利枢纽大型泄洪闸共12孔,闸室底板混凝土厚度达3m,受泄洪冲击与温度变化影响大。裂缝控制采用“材料优化+施工管控+监测预警”方案。材料选用C40抗渗混凝土,掺加5%膨胀剂与2%高效减水剂,提升抗裂与抗渗性能。设计上闸室底板设置伸缩缝,间距20m,缝间采用橡胶止水带密封;闸墩转角处增设加强筋。施工中采用分层浇筑,每层厚度40cm,振捣采用高频振捣器确保密实;浇筑后立即蓄水养护,保持表面温度稳定。监测系统在闸室关键部位布设20个监测点,运

行数据显示混凝土应变值稳定在设计范围内,未出现结构性裂缝。泄洪试验中,闸室结构完好,无渗漏现象,裂缝控制效果显著。

##### 4.3 泵站与厂房混凝土裂缝控制案例

南水北调中线工程陶岔泵站厂房为框架结构,混凝土浇筑量3万立方米,施工周期跨越冬季与夏季。裂缝控制重点针对温差与收缩变形。材料上冬季施工混凝土掺加3%引气剂,夏季施工选用低热水泥并掺加冰水拌合。设计上厂房楼板设置后浇带,间距30m,梁柱节点采用平滑过渡设计,加密节点配筋。施工中冬季采用保温模板与暖棚养护,确保混凝土养护温度不低于5℃;夏季采用遮阳棚降温,浇筑时间避开正午高温时段。监测系统实时监测厂房梁、柱及楼板的温度与裂缝情况,数据显示各部位温度变化平稳,仅在一处楼板出现0.05mm浅表裂缝,经环氧砂浆封闭处理后恢复完好。工程验收时,混凝土结构裂缝发生率仅0.5%,满足质量标准。

#### 结束语

水利枢纽混凝土裂缝控制是保障工程安全的核心技术环节,受材料、设计、施工、环境等多因素综合影响,需构建全流程、多维度的控制体系。本文研究表明,通过材料优化选用低热、高抗裂材料,结构设计采用分块、加强配筋等措施,施工中强化温控与精细化养护,结合智能化监测预警系统,可有效将混凝土裂缝发生率控制在较低水平。未来,随着新型材料研发与智能化技术升级,混凝土裂缝控制将向精准化、智能化方向发展,建议进一步加强极端环境下裂缝控制技术研究,完善技术标准体系,为水利枢纽工程高质量建设提供更坚实的技术保障。

#### 参考文献

- [1]华意,付世东.水利工程施工中混凝土裂缝控制技术[J].大众科学,2025,46(16):170-172.
- [2]钟德华.水利枢纽大坝混凝土施工技术及其质量控制[J].内蒙古水利,2022(05):48-49.
- [3]李晋林,达志国.水利枢纽大坝混凝土施工质量控制探讨[J].山西水利,2022(06):24-25.
- [4]陈刚,赵磊.水利工程混凝土温度裂缝防控技术优化策略探讨[J].大坝与安全,2022,39(2):23-29.