

# 水闸底板混凝土裂缝防治施工技术研究

文 / 韦丹榆 广东省水利水电第三工程局有限公司

**摘要:** 针对水闸底板大体积混凝土结构在施工过程中易产生温控型和结构约束型裂缝的问题, 本文结合某实际工程, 开展了裂缝成因机制分析与防治施工技术研究。通过监测数据与应力计算, 量化了温度梯度、材料收缩与基础沉降等因素对裂缝发展的影响, 明确了裂缝形成的多因素耦合特征。在此基础上, 构建了集材料优化、温控养护、跳仓浇筑、结构分缝及多源监测为一体的裂缝控制体系, 并在工程现场进行了系统应用。结果表明, 该体系能够有效降低峰值温度和温差  $\Delta T$ , 控制裂缝宽度与发生率, 实现底板结构的稳定施工与质量保障, 为类似工程裂缝治理提供了可复制的技术路径。

**关键词:** 水闸底板; 混凝土裂缝; 温控应力; 施工技术; 监测系统; 结构分缝

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.20.041

## 引言

水闸作为水利枢纽中关键的控制结构, 其底板混凝土常因断面尺寸大、温度梯度高及结构约束复杂而面临裂缝控制难题, 直接关系到整体结构的安全性与耐久性<sup>[1]</sup>。大体积混凝土在水化初期释放大量热量, 若温控措施不当, 极易诱发温度裂缝; 同时, 材料收缩性能、施工工艺及地基响应等因素也可能叠加引发贯穿性结构裂缝。现有工程实践中, 裂缝防控多依赖经验性措施, 缺乏系统性、可控性与反馈机制支持, 导致裂缝问题频发且难以追溯。为提升裂缝防治的针对性与有效性, 亟需从多因素耦合机制出发, 建立定量化、工程化的施工控制技术路径。为此, 本文基于某大型水闸工程实例, 开展了底板混凝土裂缝成因分析与防治施工技术研究, 系统提出材料优化、温控养护、结构分缝与智能监测一体化方案, 并通过实测数据对关键控制指标进行评估, 验证该体系在复杂水工结构中的适用性与实效性。

## 一、工程概况

本工程为某大型水闸枢纽工程的重要组成部分, 主要功能为调节河道水位与保障城镇防洪安全, 底板结构采用整体钢筋混凝土浇筑形式, 设计尺寸为 72.0m×28.5m, 厚度为 1.8m, 抗渗等级 P8, 混凝土强度等级为 C40。底板以下为深厚粉质黏土与细砂互层地基, 渗透系数介于  $1.2 \times 10^{-7} \text{m/s}$  至  $3.4 \times 10^{-6} \text{m/s}$ , 具备一定水力传导性, 需满足较高抗渗与温控要求。底板配筋采用双层双向 HRB400 钢筋, 间距 150mm, 混凝土中掺入 8% 粉煤灰与 10% 矿粉以改善泌水性与抑制水化热, 水胶比控制在 0.38。施工采用分块跳仓法浇筑, 每仓浇筑宽度 6m, 长度 12m, 施工间歇期不超过 12h, 配套设置智能温控与测温系统, 布设测温点 56 处。为确保浇筑质量与裂缝控制效果, 施工全过程引入全过程 BIM 温控仿真、现场红外热成像巡检与内嵌式裂缝观测仪, 形成以“热-应力-裂缝”闭环为核心的底板裂缝预控体系。

## 二、水闸底板混凝土裂缝成因分析

### (一) 温度应力与结构约束作用

水闸底板作为典型的大体积钢筋混凝土结构, 其早

期水化放热集中、内部散热缓慢, 极易形成显著的温度梯度。在结构约束条件下, 由于混凝土热胀冷缩特性受周边已硬化区域和模板边界限制, 产生较大的拉应力, 成为早期裂缝的主要诱因。本工程底板厚度达 1.8m, 监测数据显示, 在第 2 天中心混凝土温度高达  $64.3^\circ \text{C}$ , 而表层仅为  $38.1^\circ \text{C}$ , 二者温差达  $26.2^\circ \text{C}$ 。根据温度应力估算公式<sup>[2]</sup>:

$$\sigma_T = \frac{E_c \cdot \alpha_T \cdot \Delta T}{1 - \nu} \quad (1)$$

其中,  $E_c$  为 C40 混凝土弹性模量、 $\alpha_T$  为线膨胀系数、 $\nu$  为泊松比)、 $\Delta T$  为最大温度梯度, 代入得:

$$\sigma_T = \frac{3.45 \times 10^4 \times 1.0 \times 10^{-5} \times 26.2}{0.8} \approx 11.28 \text{MPa}$$

该应力值远大于早期混凝土的抗拉强度 (约 1.2 - 1.5MPa), 易在未充分释放变形的情况下诱发裂缝。现场第 4 仓监测发现, 约 72h 龄期出现纵向贯通性裂缝, 最大宽度达 0.46mm, 位置与计算高温差区域高度吻合, 表明温控与收缩约束不均衡是诱发裂缝的重要根源。

### (二) 材料特性与配合比影响

混凝土的抗裂性能与其材料组成、掺合料掺量及配合比密切相关。底板采用 C40 中热硅酸盐水泥混凝土, 掺粉煤灰 8%、矿粉 10%, 有效降低早期水化热释放速率与整体收缩率。但因现场拌和质量波动, 局部浇筑段仍表现出一定材料适应性问题。以第 6 仓为例, 其混凝土配合比设计水胶比为 0.38, 实际抽检中发现部分批次矿粉掺量不足至 7%, 水胶比波动至 0.41, 造成早期水化热释放增加、自收缩变形增大。

自收缩应变可通过如下公式估算:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{sh} + \varepsilon_{th} \quad (2)$$

其中,  $\varepsilon_{sh}$  为干缩应变,  $\varepsilon_{th}$  为温降收缩应变,  $\varepsilon_s$  为总收缩应变。计算得  $\varepsilon_s = 600 \times 10^{-6}$  若结构配筋约束系数不达标 (如钢筋间距增大、锚固不足), 则该收缩应变会转化为显著的拉应力, 导致裂缝发展。进一步分析该仓裂缝剖面发现, 裂缝多起始于钢筋保护层附近, 呈

典型收缩控制不良特征。此外，高细度粉煤灰配比不均，浆体保水性差，也是造成收缩应变增大的重要原因。因此，材料的均匀性、掺合料种类及细度控制、现场拌合精度等因素需作为裂缝控制的关键工艺环节进行严管。

(三) 外部荷载与基础变形诱因

除温控和材料因素外，外部荷载叠加及基础变形也是底板裂缝形成的重要来源。在施工及早期运营阶段，水闸结构需承受回填土荷载、设备基座集中荷载及坝后水压变化所引起的地基响应<sup>[3]</sup>。工程地质勘查表明，底板下伏地层为粉质黏土夹细砂，厚度约12-16m，天然含水率高、压缩模量低，具明显的时效性沉降特征。

根据施工期间监测结果，自第1仓浇筑至第6仓龄期28d，中心区域累计沉降达11.4mm，边缘为3.8mm，相对位移为7.6mm。结构附加弯矩可按下式估算：

$$M = \frac{E_c \cdot I \cdot \delta}{L^2} \quad (3)$$

其中， $\delta$  为相对沉降，L 为等效跨长，I 为底板截面惯性矩，代入得：

$$= \frac{3.45 \times 10^4 \times 0.486 \times 7.6 \times 10^{-3}}{144} \approx 8.9 \text{ kN} \cdot \text{m/m}$$

该弯矩叠加于原有结构内力基础上，极易在负弯矩区引发底筋处拉裂。实测数据显示，第6仓内出现平行于短边方向的斜裂缝，长约2.4m，最大宽度0.38mm，与预测应力区吻合，说明结构在差异沉降影响下出现局部应力重分布，是诱发晚期裂缝的主导因素。

三、裂缝防治关键施工技术与质量控制

(一) 材料优化与温控施工策略

1. 混凝土配合比优化

为降低水化热与收缩变形风险，本工程选用中热硅酸盐水泥（42.5级，SC42.5型，产地：冀东水泥），并掺入S95级矿粉10%、I级粉煤灰8%，有效控制水化反应速率与浆体收缩性能。水胶比控制在0.38，砂率38%，单位水用量不超过165kg/m<sup>3</sup>，配合高效聚羧酸减水剂（JH03型，掺量1.0%）实现低水胶比下的良好可泵性与和易性。

2. 骨料级配与温控性能匹配

粗骨料采用连续级配5-25mm碎石，针片状含量控制在10%以内；细骨料为中砂，细度模数控制在2.6-2.9之间。为提升混凝土保温性能，拌合时骨料温度控制在15-18℃，采用带喷淋冷却系统的ZBL-600型冷却筒预处理碎石，防止高温骨料诱发早期温差<sup>[4]</sup>。

3. 分阶段控温养护系统

混凝土浇筑后覆盖3层保温棉+2层覆膜，并设置分层测温管路（PVC外径 $\phi$ 16mm）与嵌入式热电偶，共布设56个测点。温控系统采用ZDR-WTS500型自动数据采集器，实现对浇筑后0-168h的24h连续监测；当内部温度 $\geq 60^\circ\text{C}$ 或内外温差 $>20^\circ\text{C}$ 时启动智能喷淋系统进行雾化降温。整个温控系统的运行逻辑形成了

“实时监测—智能判断—联动喷淋—数据上传”的闭环机制，详见图1。

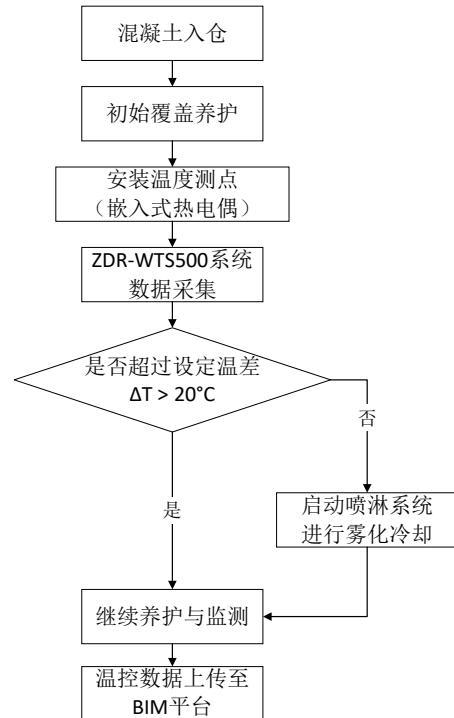


图1 水闸底板温控系统布设与控制流程图

(二) 浇筑工艺与结构分缝技术

1. 跳仓法分段浇筑

底板采用12m×6m分仓施工，浇筑顺序按“1-3-5-2-4-6”跳仓推进，单仓混凝土方量约130m<sup>3</sup>。采用HBT80C拖泵配合 $\phi$ 125软管布料，最大布料半径不超过8m，防止热集中。施工间隔控制在12h以内，避免邻仓水化热峰值重叠。分段方式有效降低温升梯度与仓间应力集中。

2. 浇筑控制与温升管理

混凝土入模温度控制在 $\leq 30^\circ\text{C}$ ，采用红外测温仪与插针式数字温度计双通道监控。振捣使用ZN70型高频插入振捣棒，确保密实度与层间结合。混凝土初凝后立即喷洒WRA-801养护剂并覆盖三层保温布，防止早期干裂。养护期间重点监测初凝前后6h温升速率。

3. 结构缝与后浇带设置

在边角、设备基础等高应力集中区设置1.2m后浇带，后期使用C50微膨胀混凝土（掺UEA 8%）进行补浇。每2m设置一道纵横诱导缝，缝深20mm，采用QG-18切缝锯在初凝后12-20h完成切缝作业。诱导缝提前定位于模板表面，通过软缝材料引导应力释放。后浇带及缝区设置加强钢筋网片，提高整体抗裂性能。

(三) 质量控制机制与监测系统

1. 过程质量控制体系

建立覆盖“材料进场—现场浇筑—养护交接”的全过程质量控制路径。施工前每仓次均开展塌落度、含气量、出机温度三项检测，合格方可入仓。浇筑日志、配合比、

拌合时间和进泵记录由专人登记并留存。首件样板机制在第1仓实施,经监理确认后标准化推广,确保施工工艺一致性。

## 2. 温控监测系统布设

温度监测采用ZDR-WTS500型无线测温系统,埋设56个K型热电偶,点位分布覆盖芯部、边缘与表层。数据采集频率为每15min1次,上传至BIM温控平台并进行趋势分析。当 $\Delta T$ 超过 $25^{\circ}\text{C}$ 或升温速率高于 $1.2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 时自动触发预警机制,并联动SFD-3.0喷淋系统实现主动降温。构建“预测—监测—干预”一体化控温模式。

## 3. 裂缝自动监测与巡检

关键位置埋设BX-12型振弦式裂缝计,测量精度达 $0.01\text{mm}$ ,结合ZWS-MC3远程采集模块实现24h在线传输<sup>[5]</sup>。裂缝发展趋势按日生成报告,供质量管理组研判。巡检使用FOTRIC280红外热像仪检测表面热斑与干裂早期征兆,重点覆盖切缝、边角及接口区域。裂缝记录与图像资料统一归档,便于裂缝追踪和结构风险分析。

## 四、技术实施与效果评估

### (一) 裂缝控制措施应用

为实现裂缝防控措施的现场落地,工程将底板结构划分为6个跳仓施工单元,每仓混凝土方量约 $130\text{m}^3$ ,依次实施温控、分缝、养护与监测系统。施工中布设

56个热电偶测点,覆盖芯部、边缘与表层,结合ZDR-WTS500系统实现24h温度数据采集与 $\Delta T$ 阈值监控,超过 $25^{\circ}\text{C}$ 自动联动喷淋系统降温。结构诱导缝按2m间距预设,切缝深度20mm,于初凝后12-20h完成。重点部位设置1.2m后浇带,采用掺UEA的C50膨胀混凝土补浇,释放结构约束。第2、4仓布设BX-12型裂缝计,配合热成像仪巡检与裂缝卡测量,构建了从应变监测到表面巡查的多维管控体系,确保裂缝控制措施在施工现场全过程闭环执行。

同时,施工过程实行技术交底与现场复核双控制,特别在温控关键期(0-48h)由专人值守监测平台,实时追踪温升趋势与喷淋响应情况。养护期间每日两次巡检养护覆盖、切缝完成度及喷淋运行状态,发现异常即协调处理。混凝土由集中拌合站统一供应,关键指标如水胶比、掺合料掺量与出机温度同步记录归档。通过组织流程规范化、监测数据精细化和响应机制闭环化,实现了裂缝防控措施在大体积水工结构中的稳定实施与可控运行。

### (二) 实测效果分析

为验证防裂施工技术的实际成效,选取代表性施工单元开展裂缝控制成效实测评估,统计温控表现、裂缝特征与变形控制指标,结果如表1所示。

表1 水闸底板关键技术措施实施效果实测统计表

浇筑单元	峰值温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	最大温差 $\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	最大裂缝宽度 (mm)	裂缝数量 (条)	最大差异沉降 (mm)
第1仓	61.5	20.1	0.24	0	6.4
第2仓	62.8	22.4	0.28	1	7.1
第3仓	63.7	21.7	0.26	0	6.7
第4仓	63.4	23.1	0.28	1	7.3
第5仓	60.9	19.8	0.22	0	6.5
第6仓	62.1	20.6	0.25	0	6.8

从表中可见,各浇筑单元峰值温度控制在 $61.5-63.7^{\circ}\text{C}$ 之间,温差 $\Delta T$ 最大值为 $23.1^{\circ}\text{C}$ ,未超过预设安全阈值 $25^{\circ}\text{C}$ ,表明温控策略稳定有效。裂缝观测结果显示,仅第2、4仓出现单条热裂缝,最大宽度 $0.28\text{mm}$ ,控制在设计限值 $0.3\text{mm}$ 以内,且后期无扩展趋势。其余单元表面完整性良好,未出现贯穿裂缝。地基沉降实测差异不超过 $7.3\text{mm}$ ,未引起结构拉裂或局部翘曲,说明结构基础响应受控。

## 结语

本文围绕水闸底板大体积混凝土结构易裂风险,系统分析了温度应力、材料性能及基础变形等主要成因,提出了涵盖材料优化、分仓浇筑、结构分缝与全过程监测的裂缝防治技术体系。在工程实施中,通过跳仓法控制温升叠加,设置三维测温网络与自动喷淋系统精准调控温差,结合诱导缝切割与后浇带设计,有效缓解结构约束与应力集中。实测结果表明,关键指标如峰值温度、温差 $\Delta T$ 、裂缝宽度与差异沉降均受控于安全范围,验

证了所提出技术路径在水闸底板裂缝防控中的可行性与工程实效性。

## 参考文献

- [1] 崔红波,朱文帅.水闸底板基础大体积混凝土施工及质量控制[J].现代农业科技,2025,(13):140-142+156.
- [2] 张奇梅.基于数值模拟的软基水闸底板受力分析及优化[J].水电与新能源,2025,(05):42-45.
- [3] 孙健.水闸底板混凝土裂缝控制研究[J].河南水利与南水北调,2025,(03):45-46+49.
- [4] 康雄才.泄水闸堰面大体积混凝土施工技术研究[J].中国水运,2024,24(18):101-103.
- [5] 朱涛.基于跳仓法施工的大面积泵闸大体积混凝土裂缝控制技术研究及应用[J].珠江水运,2024,(01):146-150.

作者简介:韦丹榆(1992-06),女,广东茂名人,汉族,本科,助理工程师,主要研究方向为水工施工。