

水利水电大体积混凝土裂缝防控研究

沈科钟

(上海市园林工程有限公司, 上海市 200083)

摘要: 针对水利水电工程大体积混凝土强约束部位温度裂缝频发难题, 揭示其成因机理并构建具有动态反馈能力的预防控制体系。依托西南某水利枢纽重力坝闸墩仓段, 联合采用绝热温升试验、分布式光纤测温、振弦式应变采集及三维温度-应力耦合有限元建模开展协同分析。结果表明: 与纯普通硅酸盐水泥体系相比, 低热水泥复合粉煤灰和矿渣粉的三元胶凝体系可使结构的绝热温升峰值降低约22%; 与自然养护方式相比, 智能通水与双层柔性保温协同方式可将结构的最大内外温差由26.3℃压缩至14.2℃, 裂缝发生率由12.5%降至0.8%; 同时量化区分出表层自约束浅层裂缝与基岩强约束深层裂缝双机制。将约束度指标由静态参数升级为动态反馈变量, 形成材料、工艺和调控三位一体的抗裂技术路径, 显著提升了水利水电工程大体积混凝土结构的长期服役性能。

关键词: 水利水电工程; 大体积混凝土; 裂缝成因; 温控措施; 预防控制

中图分类号: TM622

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)08-0339-04

Study on Crack Prevention and Control of Mass Concrete in Water Conservancy and Hydropower

SHEN Kezhong

(Shanghai Landscape Architecture Construction Co., Ltd., Shanghai 200083, China)

Abstract: In response to the frequent problem of temperature cracks in the strongly constrained parts of mass concrete in water conservancy and hydropower projects, its cause mechanisms are revealed and a dynamic feedback-based preventive control system is constructed. Relying on the piers and silos section of a gravity dam at a water conservancy hub in Southwest China, the collaborative analysis is carried out by jointly adopting adiabatic temperature rise tests, distributed optical fiber temperature measurement, vibrating strain acquisition and 3D temperature-stress coupling finite element modeling. The result shows that compared with the pure ordinary Portland cement system, the ternary cementitious system of low-heat cement combined with fly ash and slag powder can reduce the peak adiabatic temperature rise of the structure by approximately 22%. Compared with the natural curing method, the collaborative mode of intelligent water supply and double-layer flexible insulation can compress the maximum temperature difference between the inside and outside of the structure from 26.3℃ to 14.2℃, and reduce the crack occurrence rate from 12.5% to 0.8%. At the same time, the dual mechanisms of self-constrained shallow fractures on the surface and strongly constrained deep fractures in the bedrock are quantitatively distinguished. The constraint degree index is upgraded from a static parameter to a dynamic feedback variable to form a three-in-one anti-cracking technical path of materials, processes and regulation, which significantly enhances the long-term service performance of mass concrete structures in water conservancy and hydropower projects.

Keywords: water conservancy and hydropower engineering; mass concrete; crack causes; temperature control measure; preventive control

0 引言

水利水电工程作为国家重大基础设施, 其大坝、闸墩、厂房底板等关键结构普遍采用大体积混凝土浇筑, 具有截面尺寸大、水泥用量多、水化热集中释

放等显著特点。在施工及服役过程中, 大体积混凝土极易因温度应力、收缩变形和外部约束等因素产生裂缝, 轻则影响结构外观和耐久性, 重则危及工程整体安全以及运行稳定^[1]。随着水利水电建设规模的不断扩大和结构形式的日益复杂, 裂缝控制已成为工程质量管控的核心环节。然而目前研究仍存在不足: 一是裂缝成因分析多停留于定性层面, 对表层自约束裂缝与基岩强约束裂缝缺乏量化区分; 二是

收稿日期: 2026-05-19

作者简介: 沈科钟(1984—), 男, 学士, 一级建造师, 从事施工现场管理工作。

传统温控多采用固定参数的被动模式,未能根据温度场和应力场变化进行动态反馈调节;三是材料优化、施工工艺、温控调度各自独立,缺乏系统性协同控裂框架。针对上述问题,本文依托西南某水利枢纽重力坝闸墩仓段,构建以约束度动态反馈为核心的“材料-工艺-调控”三位一体的综合控制体系,以期为大体积混凝土抗裂设计提供理论依据和技术支撑。

1 试验方法

1.1 原材料性能检测和抗裂型配合比优化设计

选取强度等级为 42.5 的低热硅酸盐水泥作为胶凝材料主体;采用 I 级粉煤灰、S95 级矿渣粉按不同比例复合掺入,用以替代部分水泥以降低水化放热峰值。通过胶砂强度试验、比表面积测定和化学成分分析,系统评价各原材料的活性指标和需水特性^[2]。骨料选用连续级配的花岗岩碎石和天然河砂,最大粒径控制在 40 mm 范围以内,旨在降低单位用水量并改善内部密实度。外加剂采用聚羧酸高性能减水剂复掺微膨胀组分。借助正交试验确定胶凝材料总量、水胶比和掺合料比例的最佳组合参数,使混凝土在满足设计强度要求的前提下同时具备低水化热、低收缩以及较高抗裂储备能力^[3]。

经正交试验优化确定的混凝土配合比如下:低热水泥、粉煤灰、矿渣粉、河砂、碎石、水、减水剂、膨胀剂分别为 180、72、48、725、1 085、135、2.7、24 kg/m³;水胶比为 0.45,胶凝材料总量为 300 kg/m³,其中粉煤灰掺量为 24%,矿渣粉掺量为 16%。混凝土设计强度等级为 C25,坍落度为 80~120 mm。混凝土配合比优化的核心在于从源头削减裂缝驱动能量,这是后续所有温控措施能否奏效的物质基础。

1.2 水化热绝热温升测定和温度场监测系统布置

采用绝热温升试验仪对优化后的混凝土胶凝体系进行水化放热全过程测定,获取绝热条件下温升速率和峰值参数。水化热绝热温升随龄期的发展过程采用指数函数进行拟合,表达式为:

$$T(t) = T_0(1 - e^{-mt}) \tag{1}$$

式中: T 为绝热温升,℃; T_0 为最终稳定的绝热温升极限值,℃; m 为反映胶凝材料水化速率快慢的温升速率常数,d⁻¹; t 为混凝土浇筑完成后经历的龄期,d。

现场温度场监测采用分布式光纤和数字式温度传感器相结合的双重采集方案。沿结构厚度方向分别在其表层、1/4 深度、中心和底部布设测点,形成贯

穿浇筑仓的温度监测剖面,实现温度梯度的高精度连续采集,为温度应力的精准反演提供可靠数据支撑。

1.3 应力-应变现场采集和混凝土约束度测试

为确保监测数据的高保真度,各类传感器采用全天候不间断自动采集模式,采样频率设定为前 72 h 每隔 10 min 测 1 次,后续每隔 1 h 测 1 次的分阶段策略,以精准捕捉早龄期水化放热急剧变化特征。对原始信号采用 5.3 次平滑算法剔除电磁干扰噪声,通过无应力计与应变计的差分运算,将总应变分离出纯温度应变、干燥收缩应变和约束应变等独立分量^[4]。为进一步提升约束度 R 的测算可靠性,在同一深度位置,沿相互垂直方向布设 3 组传感器构成冗余监测单元,再通过多元回归剔除异常值,使 R 值的相对误差控制在 5% 以内,为下游有限元反演和温控调度提供高置信度的基础数据支撑^[5]。

2 试验结果与分析

依托西南地区某大型水利水电枢纽重力坝底孔闸墩部位开展系统监测和对比试验。该仓段浇筑厚度 3.5 m,平面尺寸 18 m×24 m,基础强约束条件典型,属于高裂缝风险研究对象。

2.1 水化热温升曲线与内外温差演化规律分析

监测数据显示:中心测点温度在浇筑完成后约 72 h 达到峰值 58.3 ℃,较入仓温度抬升约 36 ℃;表层测点受环境散热影响,峰值温度仅为 41.6 ℃,最大内外温差达到 24 ℃,逼近《大体积混凝土施工标准》(GB 50496—2018)(规定内外温差≤25 ℃)建议的安全阈值边缘。对温升曲线进行拟合,得到温升速率常数 m 为 0.42 d⁻¹,与室内绝热温升试验结果吻合度超过 93%,验证了现场与室内试验的一致性^[6]。

不同胶凝材料体系的水化放热特征参数对比见表 1。

表 1 不同胶凝材料体系水化热特征参数对比

胶凝体系类型	绝热温升 峰值/℃	峰值到达 时间/h	72 h 累计放热量/ (kJ·kg ⁻¹)
普通硅酸盐水泥	71.2	54	328
低热水泥单掺	62.5	66	271
低热水泥+粉煤灰	58.8	70	246
低热水泥+粉煤灰+矿渣粉	55.4	72	223

由表 1 可知:

(1)与普通硅酸盐水泥体系相比,低热水泥复掺粉煤灰和矿渣粉体系的绝热温升峰值约降低 22%;

72 h 累计放热量降至 223 kJ/kg, 降幅达 32.0%; 峰值到达时间后延约 18 h。原因在于矿渣粉的潜在水硬性需碱激发, 其早期活性低, 与粉煤灰形成互补, 使放热过程进一步展宽平缓。

(2) 与普通硅酸盐水泥体系相比, 单掺低热水泥体系的绝热温升峰值降至 62.5 ℃, 降幅达 12.2%, 主要归因于低热水泥中 C₃S 和 C₃A 含量较低, 早期水化速率受到抑制。

(3) 与普通硅酸盐水泥体系相比, 低热水泥复掺粉煤灰体系的绝热温升峰值进一步降至 58.8 ℃, 累计放热量降至 246 kJ/kg, 原因是粉煤灰早期活性低, 主要通过二次火山灰反应在中后期缓慢消耗 Ca(OH)₂, 分散了放热的时间集中度。

对比可见, 每级掺合料的引入均使体系的峰值到达时间后延 4~6 h, 这种梯度延迟效应为现场温控调度创造了宝贵的操作时间窗口。

2.2 温度应力分布特征与裂缝成因识别

基于有限元模拟结合实测应变反演分析, 结构表层在龄期 5~9 d 内出现了明显的拉应力集中区, 最大主拉应力达到 2.1 MPa, 接近同龄期混凝土劈裂抗拉强度的 85%, 裂缝失稳临界状态已然形成。进一步将约束度 R 代入温度应力表达式进行反算, 可得底部强约束区的 R 值为 0.78~0.92, 表层自约束区 R 值为 0.25~0.38^[7]。

研究由此识别出 2 种本质不同的裂缝形成机制。早期表层裂缝主要源于内外温差产生的自约束拉应力, 属于浅层温度裂缝, 而贯穿性深层裂缝则受基岩外约束与降温收缩双重驱动, 属于结构性危险裂缝^[8]。这一机制区分为差异化控裂措施的针对性部署提供了理论依据。

裂缝成因机制识别逻辑链见图 1。

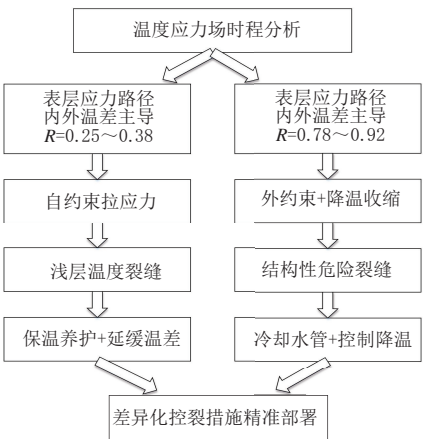


图 1 裂缝成因机制识别逻辑链

对应力场的时程演化特征进行进一步的追踪分析, 结果表明浇筑早期 0~3 d 内混凝土因温升引起体积膨胀, 在约束作用下表现为内部压应力状态, 表层压应力峰值约为 1.4 MPa; 随着水化放热进入衰减期, 结构由升温转入降温阶段, 应力状态在龄期 4~5 d 发生反转, 由压应力迅速过渡为拉应力, 拉应力上升速率高达 0.35 MPa/d^[9], 该“压-拉转换窗口期”即为裂缝萌生的高风险时段。将弹性模量、徐变系数、拉应力增长速率代入开裂概率模型开展敏感性分析, 识别出降温速率和约束度为主控因子, 为后续冷却水管流量动态调节和分层间歇期优化提供了直接的量化依据^[10]。

2.3 冷却水管通水控温与表面保温养护效果评价

在浇筑仓内按水平间距 1.5 m、竖向间距 1.5 m 布设高密度聚乙烯冷却水管, 采用智能通水控温系统根据实测中心温度实时调节流量和进水水温, 避免传统定流量通水容易诱发的局部“冷击”现象; 同步在顶面及侧面铺设聚乙烯保温被复合草帘的双层柔性保温层, 以显著削弱昼夜温差冲击^[11]。

不同控温养护组合方案下的控温指标实测对比见表 2。

表 2 不同控温养护组合方案下的控温指标实测对比

控温养护方案	中心峰值 温度/℃	最大内外 温差/℃	峰后降温速 率/(℃·d ⁻¹)	裂缝发 生率/%
自然养护	66.1	26.3	1.8	12.5
常规通水+ 单层保温	61.4	21.7	1.1	6.2
智能通水+ 单层保温	56.8	18.5	0.6	2.1
智能通水+ 双层保温	54.7	14.2	0.4	0.8

由表 2 可知, 与自然养护方案相比, 智能通水与双层保温协同方案可使结构中心峰值温度下降 11.4 ℃, 最大内外温差压缩至 14.2 ℃, 降温速率稳定维持在 0.4 ℃/d 内, 裂缝发生率则骤降至 0.8%。智能通水系统的核心地位体现为温度场“主动调控中枢”, 改变了以往被动散热的控温范式^[12]。

2.4 分层分块浇筑工艺与综合预防控制措施应用验证

针对强约束部位提出“薄层台阶式”浇筑工艺, 将单层浇筑厚度由 3.5 m 缩减至 1.5 m, 层间间歇期控制在 5~7 d, 使水化热通过分层分次释放得以充分削峰。将抗裂型混凝土配合比、智能通水控温、双层柔性保温及薄层台阶浇筑 4 项技术有机整合, 构建起“材料-工艺-调控”三位一体的综合控制体系^[13]。在随后 6 个同类仓段推广应用, 结构表面未观测

到可见裂缝,实测最大应力安全系数由 1.08 提升至 1.62。本研究首次将约束度 R 由常规静态参数提升为“监测—反演—调控”闭环中的动态反馈变量^[14]。根据实时反演的 R 值来动态调整冷却水流量和层间间歇时间,使裂缝控制由经验驱动转向数据驱动。相较于传统温控方法,本文构建的“材料—工艺—调控”三位一体的综合控制体系可使裂缝发生率由 12.5% 降至 0.8%,降幅超过 93%,为强约束部位大体积混凝土抗裂设计提供了可量化的新型技术路径^[15]。

3 结 语

(1) 三元胶凝体系使结构的绝热温升峰值降低约 22%, 72 h 累计放热量降低 32.0%。

(2) 量化识别出表层自约束浅层裂缝 ($R=0.25\sim 0.38$) 和基岩强约束深层裂缝 ($R=0.78\sim 0.92$) 两种机制。

(3) 智能通水与双层保温协同使结构最大内外温差由 26.3 °C 压缩至 14.2 °C, 裂缝发生率由 12.5% 降至 0.8%。

(4) 将约束度 R 升级为动态反馈变量, 构建闭环控制体系, 应力安全系数由 1.08 提升至 1.62。面向未来, 数字孪生、多源感知和深度学习等先进技术的深度融合, 将推动水利水电工程大体积混凝土裂缝控制由经验驱动迈向全域智能调控, 为绿色智能建造和百年工程服役奠定更加坚实的技术基础。

参考文献:

- [1] 王帅帅, 王键. 大体积混凝土裂缝产生原因分析与防控措施[J]. 粘接, 2026, 53(4): 1161–1165.
- [2] 叶良楠. 水工结构大体积混凝土裂缝成因及防治措施[J]. 四川水泥, 2026(4): 132–134.
- [3] 尹鑫鹏, 徐晓倩. 高层房屋建筑中大体积混凝土裂缝防治分析[J]. 新城建科技, 2026, 35(2): 141–143.
- [4] 庄羽. 建筑工程大体积混凝土施工技术要点研究[J]. 中国房地产业, 2026(6): 90–93.
- [5] 张超. 建筑大体积混凝土裂缝成因与控制[J]. 中国建筑装饰装修, 2026(3): 184–186.
- [6] 李鹏. 水利工程建筑施工裂缝原因分析及有效预防策略[J]. 建材发展导向, 2026, 24(9): 7–9.
- [7] 孙鹏智. 水利水电工程大体积混凝土施工中的技术难点与对策[J]. 全面腐蚀控制, 2026, 40(4): 213–215.
- [8] 任珂莹, 郑刚. 水利工程施工中混凝土裂缝防治技术[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2026(12): 205–207.
- [9] 王建成, 王磊. 混凝土裂缝控制技术在水利工程施工中的应用[J]. 流体测量与控制, 2026, 7(2): 92–94.
- [10] 邢时华. 基于材料性能预防水利工程水泥混凝土裂缝成因分析[J]. 水泥, 2026(4): 118–121.
- [11] 申波. 混凝土面板堆石坝裂缝走势预测算法研究[J]. 中国水利, 2026(7): 58–62.
- [12] 马秀敏, 陈波, 赵聪. 混凝土裂缝防治技术在水利建筑施工中的应用[J]. 科学技术创新, 2026(6): 181–184.
- [13] 于志多, 郭道迁. 水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术研究[J]. 科技资讯, 2026, 24(6): 118–120.
- [14] 俞晓东, 张旭, 曹正. 探析水利施工中混凝土裂缝产生的原因及防治措施[J]. 价值工程, 2026, 45(9): 15–18.
- [15] 刘广泽. 水利水电工程施工中的灌浆技术研究[J]. 科技资讯, 2026, 24(5): 129–131.

(上接第 334 页)

- [2] 赵人达, 张双洋. 桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J]. 中国公路学报, 2016, 29(2): 32–43.
- [3] 王晨阳. 跨越营业线钢结构天桥顶推施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(8): 85–89.
- [4] 冀伟, 邵天彦. 多跨连续梁桥顶推施工双导梁的优化分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(7): 1289–1298.
- [5] 熊斌, 虞志钢, 马明. 下穿上跨既有交通线路钢箱梁桥顶推施工[J]. 建筑结构, 2022, 52(增刊1): 3138–3141.
- [6] 郝玉峰. 步履式顶推施工过程中大跨度钢箱梁的受力性状[J]. 工业建筑, 2020, 50(10): 133–137.
- [7] 华旭刚, 曹利景, 王钰. 钢桁梁桥大悬臂状态顶推启动瞬态动力效应分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(4): 18–22.
- [8] 周浩, 黄方林, 周德. 顶推施工中临时墩位置和主梁节段长度优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(11): 2840–2848.
- [9] 张利民. 大跨度钢桁梁廊道桥顶推施工关键技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(13): 116–120.
- [10] 顾颖, 张远航, 王祥臣. 用于变截面钢箱梁顶推施工的高度可调垫座的研发与应用[J]. 公路, 2025, 70(12): 110–115.
- [11] 林宁. 小半径曲线钢箱梁桥顶推施工关键问题研究[J]. 山西建筑, 2025, 51(24): 130–134.
- [12] 张浩. 公路桥梁钢箱梁顶推智能监控系统研究[J]. 智能城市, 2025, 11(11): 153–156.
- [13] 郭少华. 独塔斜拉桥钢箱梁步履式顶推施工工艺[J]. 交通世界, 2025(35): 145–147.
- [14] 王宝宏. 改扩建高速公路支线上跨桥钢箱梁顶推施工技术研究[J]. 工程建设与设计, 2025(21): 160–163.
- [15] 李金链. 钢箱梁顶推施工关键技术研究与应用[J]. 交通科技与管理, 2025, 6(21): 73–75.
- [16] 邵昱炜. 复杂工况条件下步履式顶推施工过程受力分析及工程应用[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2025.
- [17] 杨建洲. 大跨度钢桁梁桥步履式顶推施工控制技术研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024.