

水利工程混凝土裂缝防治措施的实践研究

杨聪颖

中国葛洲坝集团第二工程有限公司, 四川 成都 610091

DOI:10.61369/ERA.2026100039

摘 要 : 针对水库碾压混凝土重力坝运行期间出现的裂缝问题, 采用超声波检测、钻芯取样、施工记录分析及有限元模拟识别裂缝成因, 并从温度控制、配合比优化、层间施工和保湿养护等方面制定防治方案。结果表明, 温度应力、干缩变形和施工工艺缺陷的成因占比分别为65%、25% 和 10%。实施冷却水管通水、降低水灰比及控制层间间歇后, 混凝土水化热峰值由75 ℃降至60 ℃, 优化配合比干缩率降低 15%。经3个月监测, 裂缝数量由12处降至2处, 最长裂缝由15 m 缩短至3 m, 最大宽度由0.30 mm 降至0.10 mm, 综合成本较原修补方案降低 12%, 表明成因导向的综合防治方案具有良好的工程应用效果。

关 键 词 : 碾压混凝土重力坝; 混凝土裂缝; 温度应力; 干缩变形; 防治措施

Practical Research on Prevention and Control Measures for Concrete Cracks in Hydraulic Engineering

Yang Congying

China Gezhouba Group Second Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610091

Abstract : In response to the cracking problem that occurs during the operation of the reservoir roller compacted concrete gravity dam, ultrasonic testing, core sampling, construction record analysis, and finite element simulation are used to identify the causes of cracks. Prevention and control plans are formulated from the aspects of temperature control, mix proportion optimization, interlayer construction, and moisture retention maintenance. The results showed that the causes of temperature stress, shrinkage deformation, and construction process defects accounted for 65%, 25%, and 10%, respectively. After implementing cooling water pipe drainage, reducing water cement ratio, and controlling interlayer intervals, the peak hydration heat of concrete decreased from 75 ℃ to 60 ℃, and the optimized mix proportion reduced the shrinkage rate by 15%. After 3 months of monitoring, the number of cracks decreased from 12 to 2, the longest crack was shortened from 15 meters to 3 meters, and the maximum width was reduced from 0.30 mm to 0.10 mm. The comprehensive cost was reduced by 12% compared to the original repair plan, indicating that the comprehensive prevention and control plan guided by causes has good engineering application effects.

Keywords : roller compacted concrete gravity dam; concrete cracks; temperature stress; dry shrinkage deformation; prevention and control measures

引言

碾压混凝土重力坝凭借施工效率高、材料用量较少和整体稳定性良好等特点, 已成为水利枢纽工程常用坝型。坝体混凝土在水化放热、环境温度变化、基础约束及水分散失等因素共同作用下, 容易产生温度裂缝、干缩裂缝和层间施工裂缝, 进而削弱结构整体性与抗渗性能, 并对工程长期运行安全形成潜在影响。现有裂缝治理多侧重于形成后的灌浆和表面封闭, 对成因识别、施工参数调节及全过程监测之间的衔接关注不足, 难以实现风险的主动控制。基于此, 本文以水库碾压混凝土重力坝为研究对象, 重点解决裂缝成因判定、关键控制参数确定及措施适用性验证等问题。研究通过超声波检测、钻芯取样和施工资料分析识别主控因素, 利用 ANSYS 模型验证冷却水管方案, 并采用降低水灰比、掺加粉煤灰、限制层间间歇及强化保湿养护等措施开展现场干预, 结合连续监测评价裂缝变化和工程成本, 为同类坝体裂缝的预防、治理及运行维护提供技术依据。

一、工程概况

水库大坝承担区域防洪、农业灌溉以及城乡供水等任务，总库容为5000万 m³。坝址河谷地形较为完整，坝基以中等风化岩体为主，具备重力坝建设条件。工程选用碾压混凝土重力坝作为主体坝型，该坝型是把低坍落度混凝土分层摊铺并连续碾压密实而形成的挡水建筑物，具有施工机械化程度较高以及材料消耗较低等特性。坝体混凝土浇筑总量约12万 m³，浇筑作业涉及仓面摊铺、层间结合、温度控制以及养护管理等环节。

工程运行期间，坝体混凝土逐渐出现可见裂缝，现场共查明12处，裂缝类型主要涵盖温度裂缝以及干缩裂缝。温度裂缝集中于坝体中上部，走向以横向和斜向为主，其形成与混凝土内部温升、表层散热以及环境温差引起的约束应力有关；干缩裂缝多见于坝基邻近区域，受到表面失水、基础约束以及局部养护条件变化影响。现有裂缝中，最长裂缝延伸约15m，最大宽度达到

0.3mm，局部位置存在继续扩展的风险。上述裂缝数据及其空间分布为后续开展成因识别、方案设计以及防治效果评估提供了工程背景依据。

二、混凝土裂缝成因分析与防治方案制定

（一）裂缝成因的现场检测与分析

1. 混凝土裂缝成因分析与防治方案制定

结合坝体裂缝分布状况，现场选用超声波检测以及钻芯取样开展内部缺陷识别。超声波检测是依靠声波传播参数判断混凝土密实程度以及裂缝影响深度的无损方法，测点沿12处裂缝两侧布置，实测波速为3.42 ~ 4.21 km/s。温度裂缝区域出现波速衰减，局部裂缝已向坝体内部延伸。钻芯取样集中布置于裂缝交汇处、坝基约束区以及层间结合面，芯样直径为100 mm，观察内容涵盖骨料分布、裂缝路径以及层间黏结状态。检测情况见表1。

表1 水库大坝混凝土裂缝检测结果统计

裂缝类型	数量	主要分布位置	最大长度	最大宽度	超声波速	钻芯特征	主要成因占比
温度裂缝	8处	坝体中上部	15 m	0.30 mm	3.42 ~ 3.76 km/s	裂缝穿越水泥浆体以及骨料界面	65%
干缩裂缝	3处	坝基邻近区域	6 m	0.18 mm	3.81 ~ 4.05 km/s	表层裂缝向内部逐渐收敛	25%
施工裂缝	1处	层间结合面	4 m	0.12 mm	3.68 ~ 3.92 km/s	层面存在黏结弱化现象	10%

施工期温度记录表明，坝体混凝土水化热峰值达到75℃，内部与表层温差超过25℃。内部混凝土受热膨胀后受到基础以及相邻坝段约束，表层降温收缩又难以自由变形，由此形成较大的温度应力。该应力超过早龄期混凝土抗拉强度后，裂缝沿约束较强方向扩展，这与中上部横向、斜向裂缝的空间形态较为契合。

坝基邻近区域混凝土水灰比为0.45，养护期间环境湿度曾低于60%，表层水分散失速度较快，干缩变形受到岩基约束后产生拉应力。层间芯样还呈现局部黏结弱化，其对应仓面浇筑间歇达到8 h，超出连续摊铺条件下的适宜衔接时段。综合裂缝形态、声学参数、芯样特征以及施工记录开展统计归因，温度应力占65%，干缩变形占25%，施工工艺缺陷占10%，表明温度控制应当作为后续防治方案设计的重点，同时兼顾养护湿度以及浇筑连续性管理。

（二）基于成因的防治方案设计

鉴于温度应力、干缩变形以及施工工艺缺陷的归因比例，防治方案把裂缝主控因素识别当作措施配置依据，并且按照成因判定、参数设计、施工约束以及监测反馈的路径开展方案制定。温控设计需围绕坝体内外温差进行调整，其应力水平可按下式估算。

$$\sigma = E\alpha\Delta T$$

其中， σ 表示温度应力，单位为 MPa； E 表示混凝土弹性模量，单位为 MPa； α 表示混凝土线膨胀系数，单位为每摄氏度； ΔT 表示坝体内部与表层的温差，单位为℃。

结合水化热峰值达到75℃以及内外温差超过25℃的施工记录，在坝体中上部预埋冷却水管，管路沿温度裂缝高发区域分层布置，通水流量控制为0.5 m³/h。冷却过程需根据入水温度、出水温度以及坝体测温数据进行动态调节，把降温速率维持在不会引起表层骤冷的范围内，从而缓解基础约束条件下的拉应力集中。

针对坝基邻近区域的干缩变形，将混凝土水灰比由0.45降至0.40，并按胶凝材料质量掺入2% 粉煤灰，以减少拌和用水量，改善浆体孔隙结构以及后期体积稳定性。浇筑完成后及时开展保湿养护工作，避免表层湿度快速下降。层间结合面的施工控制则把仓面浇筑间歇限制在4 h 以内；发生超时情况时，需清除浮浆以及松散颗粒，对结合面进行湿润和铺浆处理，再恢复摊铺碾压作业。

方案制定流程见图1。流程以检测资料和施工记录为输入，依据裂缝类型匹配温控、配合比优化以及浇筑衔接措施，同时设置温差、湿度和间歇时间控制节点。现场监测信息返回参数调整环节后，可形成持续修正的闭合路径，使各项措施与坝体裂缝的空间分布以及形成条件保持对应关系。

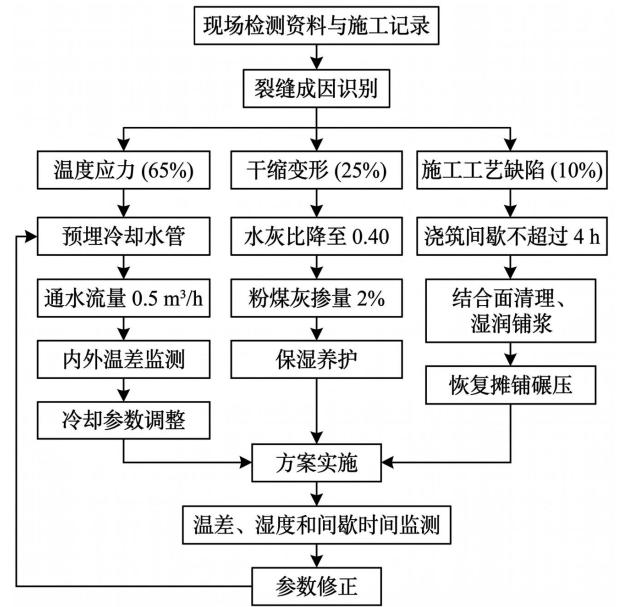


图1 混凝土裂缝防治方案制定流程图

（三）防治方案的技术可行性验证

结合坝体裂缝分布以及施工期温度记录，选用 ANSYS 软件建立坝体三维有限元模型。有限元模型是把连续坝体离散为有限单元并开展温度场以及应力场计算的分析工具。模型把坝体中上部、岩基约束区以及层间结合面纳入计算范围，材料参数按照现场芯样试验结果进行赋值，边界条件则引入环境温度、水化热过程以及冷却水管换热参数。计算结果表明，冷却水流量维持在0.5 m³/h 时，混凝土水化热峰值由 75 ℃ 降至 60 ℃，坝体内外温差同步收窄，温度梯度引起的拉应力集中得到缓解，说明分层布置冷却水管具备技术可行性。

针对坝基邻近区域的干缩风险，选取原水灰比 0.45 配合比以及优化后的水灰比 0.40 配合比开展对比试验。干缩率是表征混凝土失水后长度收缩程度的指标，试件在与现场养护条件相近的温湿度环境中持续观测。结果显示，掺入胶凝材料质量 2% 粉煤灰后，优化配合比的干缩率较原配合比降低 15%，其浆体孔隙结构以及体积稳定性均有所改善。该调整未对碾压施工所需稠度造成明显影响，能够满足仓面摊铺以及振动碾压要求。

施工工艺可操作性评估围绕仓面连续作业、结合面处置以及养护衔接展开。每个作业班组配置 1 名现场负责人、2 名质量检查人员、8 名摊铺碾压人员以及 4 名养护人员，设备配置包括 2 台摊铺机、2 台振动碾、1 套制浆设备以及 2 套移动供水装置。该配置可把浇筑间歇控制在 4 h 以内，并为超时结合面的清理、湿润以及铺浆留出作业条件。结合温度监测人员对冷却水量进行动态调整，现有施工场地、电力供应以及供水能力能够支撑方案实施。

三、防治措施的实践应用与效果评估

（一）防治措施的现场实施过程

结合坝体中上部温度裂缝的集中分布范围，现场在混凝土摊铺前完成冷却水管定位以及固定，管线沿坝轴方向分层布设，接头位置开展密封检查，并把进出水口接入流量计以及测温装置。混凝土覆盖管线后开始通水，冷却水温控制为 15 ℃，单回路流量维持在 0.5 m³/h。值班人员依据坝体测温数据调整通水时段，避免局部降温过快。

配合比调整环节选用低热水泥、连续级配骨料以及粉煤灰，骨料含水率在每班开仓前进行测定，并据此修正拌和用水量。水灰比控制为 0.40，粉煤灰掺量按胶凝材料质量的 2% 计取。拌和站按照骨料、胶凝材料以及水的投放顺序组织生产，延长搅拌时间至 90 s，使低坍落度混凝土保持均匀状态，出机料同步检查稠度以及温度。

仓面施工按照坝基约束区向坝体中部连续推进，摊铺方向与碾压行进方向保持协调，浇筑速度控制为 200 m³/h。相邻条带及时进行搭接碾压，层间间歇限制在 4 h 以内。遇设备停机造成超时，现场把浮浆以及松散颗粒清除后进行湿润和铺浆处理，再组织后续摊铺；混凝土终凝后马上覆盖保湿材料，并依靠移动供水装置维持养护湿度。

（二）实施后的裂缝监测结果分析

防治措施实施后，现场运用裂缝观测仪对坝体开展连续 3 个月

监测。裂缝观测仪是借助位移传感元件记录裂缝张开量变化的测量设备。监测点覆盖原有 12 处裂缝，并在坝体中上部、坝基邻近区域以及层间结合面设置固定测点，每日采集裂缝宽度数据，每周复核裂缝端部位置以及延伸长度，以降低单次观测偏差对趋势判断的影响。

监测周期内，坝体可见裂缝数量呈持续下降趋势，实施后第 1 个月降至 7 处，第 2 个月降至 4 处，第 3 个月仅保留 2 处，具体变化见表 2。最长裂缝由 15 m 逐步缩短至 3 m，最大宽度也从 0.30 mm 降至 0.10 mm。温度裂缝收敛幅度较大，施工裂缝在第 1 个月已不再显现，说明温控以及层间处置对裂缝发展形成了较为明显的抑制作用。

表 2 实施前后裂缝变化对比表					
监测指标	实施前	第 1 个月	第 2 个月	第 3 个月	总体降幅
裂缝总数量	12 处	7 处	4 处	2 处	83.3%
温度裂缝数量	8 处	5 处	3 处	1 处	87.5%
干缩裂缝数量	3 处	2 处	1 处	1 处	66.7%
施工裂缝数量	1 处	0 处	0 处	0 处	100%
最长裂缝长度	15 m	8 m	5 m	3 m	80.0%
最大裂缝宽度	0.30 mm	0.21 mm	0.15 mm	0.10 mm	66.7%

结合逐月数据来看，前 2 个月的裂缝收敛速度相对较快，第 3 个月变化趋于平缓，表明坝体温度场以及表层湿度逐渐进入稳定状态。剩余 2 处裂缝分别位于坝体中上部以及坝基邻近区域，宽度均未超过 0.10 mm，监测期间未出现继续延伸现象。冷却水管调节、低水灰比配合比以及连续浇筑控制共同降低了温度应力、失水收缩以及层间黏结弱化产生的不利影响。

（三）防治效果的综合评估

结合 3 个月监测资料，坝体可见裂缝由 12 处减少至 2 处，裂缝控制率达到 83.3%，最长裂缝以及最大宽度分别降至 3 m 和 0.10 mm。温度裂缝数量下降 87.5%，表明冷却水管对水化热峰值以及内外温差的调节较为有效；施工裂缝全部收敛，说明 4 h 层间间歇控制以及结合面处置能够改善层间黏结状态。干缩裂缝控制率为 66.7%，相较其他类型仍有优化空间。

从工程成本来看，把冷却水管、粉煤灰、养护供水、人工以及监测费用纳入核算后，现行方案较原修补方案节约 12%。成本降幅主要来自裂缝返修工作量减少、灌浆材料消耗下降以及施工停歇时间缩短，表明成因导向的预防措施能够把费用投入前移，降低后续处置成本。

延长跟踪期内，坝体连续 6 个月未产生新裂缝，原有 2 处裂缝宽度保持在 0.10 mm 以内，坝体运行状态较为稳定。该方案具有措施针对性较强、施工衔接顺畅以及现场参数便于调整等优势，但仍存在干缩裂缝收敛较慢、冷却水温依赖人工调节的问题。后续可增设自动温控阀以及湿度传感装置，细化坝基邻近区域的养护频次，同时开展跨季节监测，以进一步评价长期温度循环以及库水荷载变化对裂缝稳定性的影响。

四、结语

本研究建立了由现场检测、成因归因、参数设计、数值验

证、施工实施和动态监测构成的裂缝防治路径，实现了不同裂缝类型与工程措施的对应配置。工程实践说明，水化热控制是降低坝体中上部开裂风险的关键，配合比优化与持续保湿能够改善坝基约束区的体积稳定性，严格控制层间作业时间则有助于保障结合面质量。相较于事后修补，预防性控制可减少返修、材料消耗和施工停歇，兼具结构安全效益与经济效益。现有方案对干缩裂

缝的控制仍弱于温度裂缝，冷却水温调节也较依赖人工操作。后续应配置自动温控阀和湿度传感装置，优化坝基邻近区域养护制度，并开展跨季节、长期化监测，综合分析环境温度循环、库水荷载及材料性能演化对裂缝稳定性的影响，以提升防治方案的自动化水平和长期适用性。

参考文献

[1] 刘波. 基础工程项目中混凝土裂缝防治措施研究——以深汕西部水源及供水工程为例 [J]. 现代工程科技, 2024, 3(24): 4-7.

[2] 刘继红. 农业水利工程施工中混凝土裂缝的防治技术研究 [J]. 农业机械, 2024, (12): 98-100.

[3] 陈芳. 浅析在水利工程监理过程中如何提高混凝土外观质量 [J]. 河南水利与南水北调, 2024, 53(12): 65-66.

[4] 王建忠. 引水隧洞衬砌混凝土裂缝控制技术研究 [J]. 水泥, 2025, (12): 141-143.

[5] 耿川, 耿长亮. 水利工程全寿命周期中高性能混凝土的实践研究 [J]. 水泥, 2025, (12): 74-76.

[6] 刘涛. 钢筋混凝土箱涵施工裂缝分析及控制 [J]. 散装水泥, 2024, (06): 137-139.

[7] 黄文兵. 现代水闸工程中大体积混凝土温度管理与裂缝预防策略研究——以观景口水利枢纽工程为例 [J]. 珠江水运, 2024, (24): 35-37.

[8] 沈富国. 聚合物防水涂料对水泥混凝土裂缝自修复性能的影响 [J]. 中国水泥, 2025, (11): 100-102.

[9] 管仕辄, 李仕林, 刘锋, 倪小龙. 基础大体积混凝土夏季施工裂缝控制措施 [J]. 科技与创新, 2025, (22): 36-39.

[10] 周小燕, 杨洵, 代薇, 孙彦梅, 张芮瑜, 秦小枫, 李阳, 张野. 基于 DIC 技术的修复后混凝土裂缝扩展特性试验研究 [J]. 水电能源科学, 2025, (07): 119-122+68.