

大体积混凝土温控防裂智能监控技术

刘 毅^{1,2,3}, 辛建达^{2,3}, 张国新³, 张 磊^{1,2,3}, 李松辉^{2,3}, 朱振洪^{2,3}, 翟海峰⁴

(1. 中国水利水电科学研究院, 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院 水利部水工程建设与安全重点实验室, 北京 100038; 3. 中国水利水电科学研究院水电中心, 北京 100038; 4. 雅砻江流域水电开发有限公司, 成都 610051)

摘 要: 温控防裂是大体积混凝土施工质量控制的重点和难点问题。介绍了大体积混凝土温控防裂智能监控技术, 首先通过建立混凝土开裂全过程仿真试验技术实现了大体积混凝土温度历程的优化设计; 然后通过实时采集拌合、浇筑、通水、保温等环节的混凝土温度信息, 构建了以温度达标为目标的实时评价和预测模型, 实现了施工过程中混凝土温度指标的精准监控和动态预警, 并自动化、智能化地调控混凝土温度。工程应用表明, 该技术可以实现对大体积混凝土温控的优化和实时监控, 提高混凝土施工质量, 效果良好, 可在同类工程中推广。

关键词: 大体积混凝土; 温控防裂; 开裂仿真试验; 智能监控

中图分类号: TV523 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)05-1228-06

网络出版时间: 2023-04-07



Intelligent Monitoring Technology of Anti-thermal Cracking for Mass Concrete

LIU Yi^{1,2,3}, XIN Jianda^{2,3}, ZHANG Guoxin³, ZHANG Lei^{1,2,3}, LI Songhui^{2,3}, ZHU Zhenyang^{2,3}, ZHAI Haifeng⁴

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Key Laboratory of Construction and Safety of Hydraulic Engineering of Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Research Center for Sustainable Hydropower, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610072, China)

Abstract: Anti-thermal cracking is one of key issues for construction quality control of mass concrete. This paper introduced an intelligent monitoring technology of anti-thermal cracking for mass concrete. The temperature cooling process was optimized by thermal stress tests conducted on the temperature-stress testing machine. The real-time evaluation and prediction models targeting on adequate concrete temperature were established based on the real-time collected information at different stages of mixing, casting, cooling and insulation. The models can achieve precise index monitoring and dynamic warning of concrete temperature, and control concrete parameters such as temperature automatically and intelligently. The technology shows a good application effect on the mass concrete temperature control optimization and real-time monitoring, and it can be popularized in the similar projects.

Keywords: mass concrete; anti-thermal cracking; cracking simulation test; intelligent monitoring

大体积混凝土结构由于断面较厚, 水泥、粉煤灰等胶凝材料在与水拌和后产生的水化热会导致结构内部温度升高, 热量难以快速散失, 导致混凝土温度降至环境温度的过程中承受较大的温降幅度,

产生的拉应力极易超过混凝土的抗拉强度, 诱发开裂^[1-3], 裂缝的出现会导致混凝土材料性能下降, 增加后期修补费用^[4]。

大体积混凝土温控防裂起始于 20 世纪 30 年代,

收稿日期: 2022-10-10。 修订日期: 2022-11-05。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0406700); 雅砻江流域水电开发有限公司科技项目(YLGZ-LHGA-2020017)。

第一作者: 刘 毅(1979—), 男, 教授级高级工程师。

Received date: 2022-10-10. Revised date: 2022-11-05.

First author: LIU Yi (1979—), male, Professor.

E-mail: liuyi@iwhr.com

美国 Hoover 大坝施工过程中为了防止大坝温度裂缝的产生, 采取了诸如分仓、分段浇筑混凝土的施工措施, 有效防止了温度裂缝的产生^[5]。但是随着混凝土坝高和坝段宽度逐渐增加, 也给大体积混凝土温控带来了新的问题。例如, 近些年来的大坝混凝土施工时多采取通仓浇筑, 提高了新浇混凝土的受约束程度和温度应力, 加大了混凝土开裂风险和温控防裂难度。针对大体积混凝土施工中面临的温控防裂难题, 在总结已有工程实例的基础上, 国内坝工领域的科研人员提出了系统的大体积混凝土温控防裂理论和控制方法^[6]。2008 年, 朱伯芳^[7]提出了“数字监控”的概念, 通过结合仪器监测数据与数值仿真分析, 实现对大坝全过程监控。张国新^[8]提出了“九三一”温度控制模式, 即“早保护、慢冷却、小温差”九字方针, “一期、中期、二期冷却”以及“智能监控”, 为高混凝土坝温控防裂问题提出了解决思路。

目前, 对大体积混凝土温控防裂的研究主要是借助有限元仿真手段, 基于混凝土室内单项试验确定的材料参数开展三维有限元数值模拟, 确定大体积混凝土的温控历程。但工程实际表明, 上述手段没有完全解决大体积混凝土的开裂问题, 主要原因之一是对混凝土材料参数真实特性描述不准确。有限元模型计算输入数据的准确性对于确定开裂风险尤为重要, 由于大坝混凝土水胶比高, 早龄期拆模困难, 混凝土材料试验的测试起始龄期多为 7 d, 早龄期阶段数据通过拟合确定; 此外, 混凝土试件多采用恒温静载养护, 得到的混凝土材料参数与实际变温条件下材料参数的差异性也会直接影响大坝混凝土应力模拟精度。因此, 本课题组研发了混凝土开裂全过程仿真试验机^[9-11], 该设备将混凝土自浇筑至最终破坏的整个过程中的主要因素统一到一次试验中, 耦合温度历程、约束度、材料参数等因素, 实现在设定养护温度历程和约束条件下, 测量混凝土浇筑——开裂全过程的混凝土温度应力及相关热力学参数, 为优选最佳温控曲线提供基础。

随着中国经济社会的不断发展, 大型水电资源开发已逐渐向中国西北、西南地区转移, 高海拔、高寒地区的筑坝环境较平原地区有显著不同, 具有昼夜温差大、年平均气温低、冬季时间长、太阳辐射强、气候干燥等特点^[12]。为了保障高寒区混凝土结构的耐久性、降低混凝土材料的内部损伤, 势必需要对大体积混凝土在施工期采取更为严格的温控防裂监控措施, 以及智能化的手段保证大坝混凝土

施工质量。

为此, 本工作采用室内试验、理论推导、仿真分析以及人工智能等多种手段, 结合混凝土开裂全过程仿真试验以及温控防裂理论和控制方法形成了大体积混凝土温控防裂智能监控技术, 实现了温控历程的优化设计和现场精准调控, 最后结合杨房沟水电站工程的应用阐述了实施效果。

1 大体积混凝土温控防裂智能监控关键技术

1.1 混凝土开裂全过程仿真试验技术

针对约束圆环法和平板法在评价混凝土开裂风险方面无法控温的核心缺陷, Springenschmid^[13]设计出了混凝土温度应力试验机, 可以有效实现混凝土从浇筑到开裂全过程中任意龄期下的材料参数和温度应力测试, 特别是早龄期阶段。基于 Kovler^[14]的设计理念, 本课题组研发了混凝土开裂全过程仿真试验机, 借助独特的温度控制模板及系统, 可人工设定温度历程, 考察变温条件下混凝土温度应力的发展和开裂风险, 实现温控历程的优化。试验原理为: 试验前, 首先预设一个受约束试件的允许变形阈值和约束度(0~100%)。混凝土试件浇筑后在温度模板的控温下产生变形, 每次变形(膨胀或收缩)达到该阈值后, 端部的加载装置立即施加荷载以保证试件回到初始位置, 往复循环多次, 直至混凝土试件拉断。

图 1 为本项目采用的混凝土开裂全过程仿真试验机实物图, 主要特点如下:

1) 试验机温度模板为空腔结构, 内有 40% (质量分数) 乙二醇水溶液, 可通过温控设备实现 -20~80 °C 变温以及日降温 0.3 °C 的大体积混凝土降温要求。

2) 采用“预埋杆+定位工装”的方式, 将 LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) 安装于具有低线膨胀系数的石英管端部直接测量混凝土的真实变形, 较传统试验设备采用千分表测量金属夹头处变形的间接测量方法更合理。

3) 通过安装于试验机端部的伺服电机实现荷载的控制, 可实现拉压双向 200 kN 的加载要求, 最大拉应力可达 8.9 MPa。

4) 采用变约束控制系统, 根据自由试件的位移和设定约束度对约束试件的位移进行控制, 实现 0~100% 约束度可调, 满足不同约束程度下混凝土

温度应力测量的需求。



图1 混凝土开裂全过程仿真试验机
Fig. 1 Temperature-stress testing machine

1.2 混凝土智能温控信息感知技术

智能温控信息感知是指采用专门的硬件和系统自动测量与温度控制相关的各种物理量。智能监控系统感知的温控要素主要有：出机口温度、入仓温度、浇筑温度、大坝内部温度、大坝内部最高温度、仓内气温、基础温差、水管通水流量、通水水温、气温、气温骤降、太阳辐射热、温度梯度、降温速率、混凝土一期冷却目标温度、混凝土中期冷却目标温度、接缝灌浆温度、封拱温度、上下层温差以及内外温差等。

上述感知因素涵盖了混凝土拌合、运输、入仓、平仓、养护、通水冷却全过程，需要配套的现场硬件设备实现感知因素的自动采集^[15]。智能温控信息感知硬件主要包括数字式温度传感器、温度梯度仪、温度测量单元、仓面小气候仪、手持式混凝土出机口、入仓及浇筑温度采集硬件、骨料温度采集硬件等。

1.3 混凝土智能温控信息分析与控制技术

1) 智能拌合

智能拌和是通过分析不同季节的环境温度、拌和水温、骨料温度、水泥温度、出机口温度、配合比等因素，以出机口温度达标为目标，实现风冷时长和风冷温度的预警，通过控制原材料温度为拌和楼温度调控提供建议。

参考朱伯芳^[6]提出的基于热量平衡原理的计算方法，建立了出机口温度预测模型，实现混凝土温度的自动预测：

$$T_0 = (\sum \lambda_i T_i G_i c_i - 335 \eta G_c + Q) / \sum G_i c_i \quad (1)$$

式中： T_0 为预冷混凝土出机口温度； G_i 为每立方米混凝土中第*i*种材料的质量； c_i 为第*i*种材料的比热容； G_c 为每立方米混凝土的加冰量； η 为冰的冷量

利用率； Q 为每立方米混凝土拌和时产生的机械热； T_i 为第*i*种材料的温度； λ_i 为第*i*种材料(特大石和大石)的风冷有效系数，与风冷时长等因素相关。

2) 智能仓面

智能仓面是通过分析太阳辐射、仓面温度、仓面湿度、仓面风速、入仓温度、浇筑温度等因素，明确浇筑温度达标需要的仓面小气候，实现仓面小环境的智能调控。

3) 智能通水

智能通水是通过分析混凝土内部温度、浇筑温度、仓面温度等因素，自动预测分析未来温度，通过智能控制通水流量、通水水温、通水方向等参数，实现设定的温度历程。

针对混凝土的特点，综合考虑绝热温升、温度梯度及降温速率等多种因素，开发出混凝土智能通水冷却参数预测模型^[15]：

$$T_{x+1} = T_x + \Delta \theta_x + \alpha_1 \bar{T}_a + \alpha_2 \bar{T}_b + \frac{\alpha_3 (L, T_w, a)(q_x + q_{x+1})}{2} \quad (2)$$

式中： T_{x+1} 为预测时间 $x+1$ 时刻的温度； T_x 为当前温度； $\Delta \theta_x$ 为绝热温升增量； α_1 为表面散热系数； $\bar{T}_a$ 为表面温度； α_2 为相邻块表面散热系数； $\bar{T}_b$ 为相邻块温度； α_3 为通水散热系数； L 为管长； T_w 为水温； a 为管径； q_x 和 q_{x+1} 分别为 x 和 $x+1$ 时刻的流量。

基于上述模型，可根据目标温度实时动态调整通水参数，实现智能通水。

4) 智能保温

智能保温是通过分析混凝土内部温度、气温骤降、环境温度等因素，自动预测混凝土温度梯度变化，实现温度梯度的预警及保温部位、保温厚度、保温材料的保温建议。

2 工程应用

2.1 工程概况

杨房沟水电站位于四川省凉山彝族自治州木里县境内雅砻江中游河段上，工程规模为大型(I)型。挡水建筑物采用混凝土双曲拱坝，坝顶高程2 102.00 m，正常蓄水位2 094.00 m，最大坝高155.00 m。拱坝对整体性要求高，大坝全年施工，结构复杂，施工工期紧，施工条件复杂，且坝址气候条件复杂，极端气温温差大、昼夜温差大，气温骤降幅度较大且发生频率较高，这都对温控防裂提出了更高的要求。

2.2 温控曲线优化

大坝混凝土温控曲线的制定需在一定温控标准条件下, 考虑不同坝型特点和坝体不同分区, 按照温度应力最小的原则, 确定温分级、降温速率、空间梯度等参数。对于杨房沟水电站工程, 优化试验主要考虑在混凝土最高温度和目标温度一定的情况下(即温降幅度不变), 分析不同温降速率对混凝土开裂风险的影响。

杨房沟水电站大坝四级配混凝土设计指标为 C₁₈₀30, 采用花岗闪长岩骨料、嘉华 42.5 中热水泥、I 级粉煤灰和 JM-II 萘系缓凝高效减水剂制备。混凝土的水胶比为 0.5, 砂率为 25% (质量分数), 粉煤灰掺量为 35% (质量分数), 每立方米混凝土的水、水泥和粉煤灰用量分别为 85、110.5 kg 和 59.5 kg。

基于杨房沟水电站大坝混凝土配比在试验室内制备试件并开展混凝土温控曲线优化试验, 试验流程如下:

1) 将拌和好的混凝土湿筛成二级配后浇入试验机温度模板, 各组混凝土设定相同的入模温度。温度模板内提前铺设塑料薄膜降低混凝土与模板之间的摩擦力, 同时防止水分散失, 模拟大坝混凝土内部的湿度状态; 分两层浇筑混凝土并采用振动棒振捣密实直至表面无气泡, 最后抹平混凝土表面并覆盖塑料薄膜;

2) 在试件中心处插入铜管, 然后内部置入温度传感器监测混凝土温度变化, 采用定位工装固定位移传感器, 待混凝土达到初凝龄期后拆除定位工装, 以保证位移传感器和混凝土协同变形, 实时监测混凝土后续的位移变化;

3) 混凝土试件浇筑完成后立即启动温度控制系统, 本次温控曲线优化试验采用人工控温养护模式, 将设定好的温度历程数据导入混凝土开裂全过程仿真试验机后, 试验机的控温设备自动调控温度模板内的循环液, 使其在相应时刻达到设计温度;

4) 待混凝土试件龄期达到终凝时刻后, 启动约束控制系统, 约束度设定为 100%, 实时记录混凝土的温度、位移和荷载数据, 试验持续至混凝土开裂时停止。

混凝土的温降历程与混凝土最终应力和开裂风险密切相关, 因此混凝土温控曲线优化试验设计了 2 种温降历程, 如图 2 所示: 温度历程 1 和温度历程 2 的升温阶段一致, 降温阶段温度历程 1 前期降温速率慢, 后期降温速率快, 温度历程 2 采用线性温降, 目的是分析不同阶段温降速率对混凝土温度

应力发展和开裂风险的影响, 确定适合杨房沟水电站工程的混凝土温控曲线。

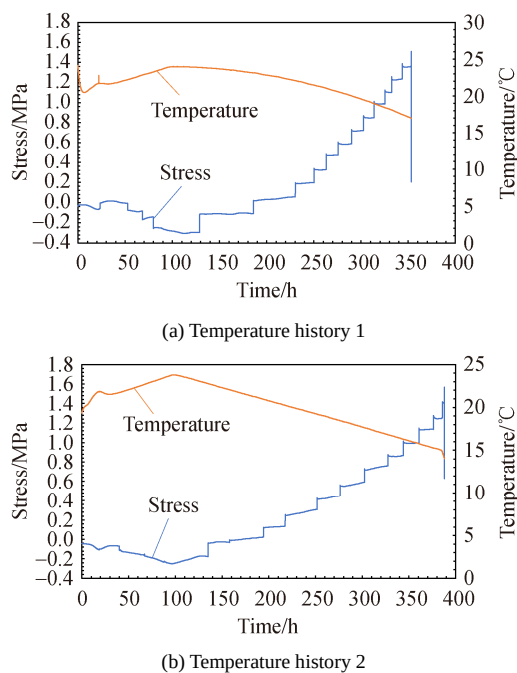


图 2 不同温度历程下混凝土温度应力发展曲线
Fig. 2 Thermal stress evolution of concrete under different temperature histories

试验获取的不同温降历程下混凝土温度应力曲线如图 2 所示。可以看出, 随着混凝土温度的升高, 混凝土压应力逐渐增长, 在温峰前达到最大值 0.3 MPa; 随后, 混凝土温度逐渐下降, 储备的压应力逐渐减小并转为拉应力, 拉应力随温度的持续下降逐渐增长, 应力曲线的突降标志混凝土裂缝的产生。由于 2 种温度历程混凝土的最高温度相同, 通过分析混凝土开裂时刻的温度即可确定 2 种温度历程的优劣, 开裂时刻的温度越低, 意味着混凝土能够承受的温降幅度越大, 温控曲线更为合理。温度历程 1 和温度历程 2 条件下, 混凝土开裂时刻的应力分别为 1.51 MPa 和 1.56 MPa, 开裂时刻的温度分别为 16.97 °C 和 14.01 °C, 温度历程 2 条件下混凝土能够承受的温降幅度较温度历程 1 提高了约 3 °C, 证明采用温度历程 2 进行杨房沟工程混凝土的早期降温对提高混凝土结构抗裂能力更为有利。

上述现象产生的原因是由于温度历程 2 的早期阶段温降速率更高, 使混凝土可以充分利用弹性模量低和徐变能力强的优势, 降低温降引发的温度应力, 试验开始 300 h 后, 温度历程 2 下的混凝土拉应力已低于温度历程 1 的拉应力, 早期快速降温的优势开始显现, 最终推迟了混凝土应力达到抗拉强

度的时间,提高了混凝土能够承受的温降幅度。

采用本工作提出的温控曲线优化方法的优势在于不需要预先获取混凝土的材料参数,特别是在早龄期参数不易测量的条件下,通过直接应力测量的方式评价不同温度历程对混凝土开裂风险的影响,确定适用于杨房沟水电站工程早龄期阶段混凝土的最优温降曲线,同时为后续采用智能监控系统实现温度历程的精准调控提供基础。

2.3 应用效果

基于 2.2 节获取的大坝混凝土温降速率优化曲线,采用智能监控系统进行了现场通水控温调控测试。图 3 为一典型浇筑仓的智能通水冷却参数调控图。通过从系统平台数据库获取实时采集的温控数据、水文气象数据以及混凝土热学参数等信息,对温度数据进行实时处理,实现对智能通水关键参数(即 q_{x-1})的准确预测,并自动计算出将要采用的通水方案,将通水指令由自动控制模块传递给相关硬件,实现自动化、智能化的通水冷却控制。从调控过程监控曲线中可以看出,实测温度曲线同理想温控曲线吻合的较好,表明智能通水预测模型预测的通水流量准确,验证了模型的准确性。

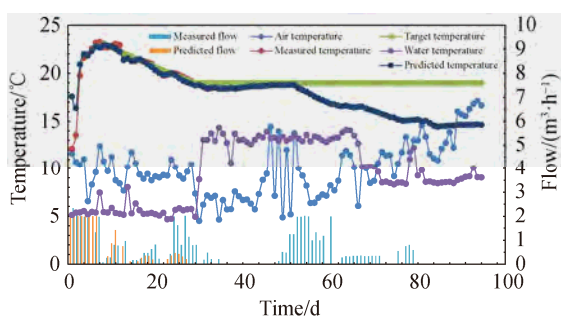
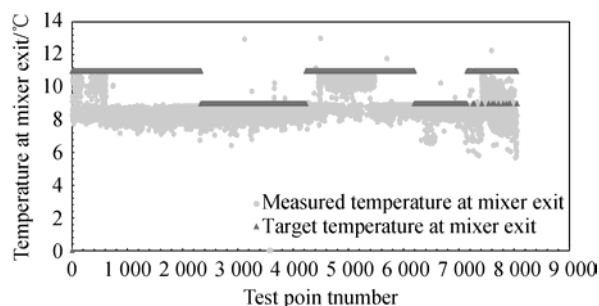


图 3 智能通水参数

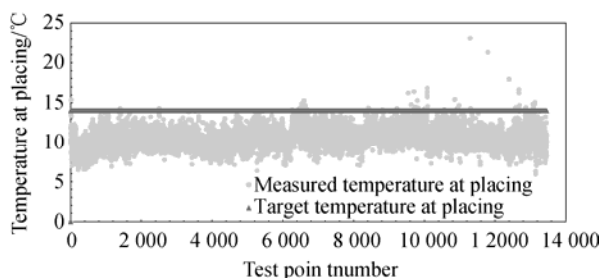
Fig. 3 Parameters of intelligent pipe cooling

图 4 和表 1 分别为杨房沟水电站大坝主体混凝土出机口、入仓和浇筑温度统计数据以及温度合格率统计结果。统计结果可知,杨房沟水电站大坝主体混凝土的出机口温度平均值为 8.67 °C,入仓温度平均值为 10.51 °C,浇筑温度平均值为 12.05 °C。出机口、入仓和浇筑温度控制整体上满足设计要求,合格率均超 99%,达到预期效果。

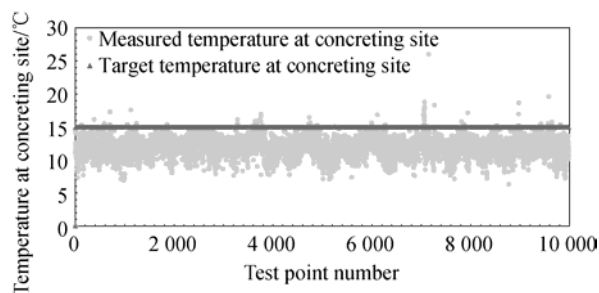
图 5 为杨房沟水电站大坝主体混凝土典型仓(10#-1948.50)温度过程线,代表该仓 3 支温度计监测的混凝土温度数据。可以看出,监测的混凝土最高温度低于设计要求值(图 5 中最高温度设计要求值为 29 °C),且降温过程满足缓慢降温、分期降温的设计要求。



(a) Temperature at mixer exit



(b) Temperature at placing



(c) Temperature at concreting site

图 4 出机口、入仓和浇筑温度统计图

Fig. 4 Statistical results of fresh concrete temperature control

表 1 出机口、入仓和浇筑温度合格率

Table 1 Fresh concrete temperature qualified coefficient

Temperature type	Qualified coefficient/%	Unqualified coefficient/%
Temperature at mixer exit	99.84	0.16
Temperature at placing	99.53	0.47
Temperature at concreting site	99.26	0.74

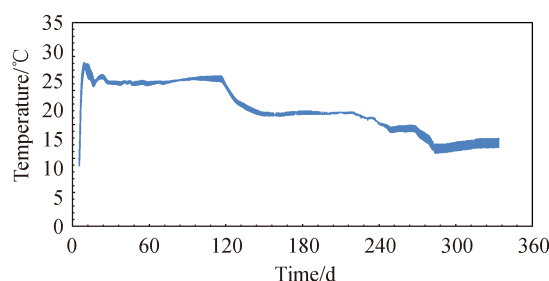


图 5 10#-1948.50 仓内部温度过程线图

Fig. 5 Internal temperature history of 10#-1948.50

图 6 为杨房沟水电站大坝主体混凝土典型仓的实际降温速率过程线。降温速率负值代表升温阶段,

正值代表降温阶段。可以看出, 该仓的混凝土降温速率低于设计要求的一期降温速率 $1\text{ }^{\circ}\text{C/d}$ 、中期降温速率 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C/d}$ 和二期降温速率 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C/d}$, 降温阶段混凝土的整体降温速率控制较好, 满足设计要求, 工程施工期降温速率合格率不低于 95%。

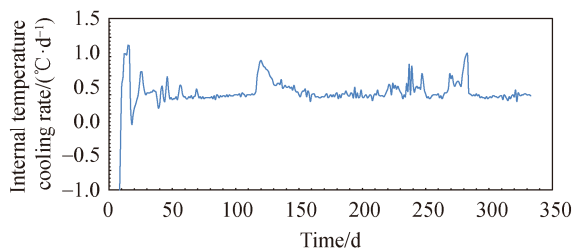


图 6 10#-1948.50 仓降温速率曲线

Fig. 6 Internal temperature cooling rate history of 10#-1948.50

借助大体积混凝土温控防裂智能监控技术, 有效保障了杨房沟工程混凝土的施工质量, 坯层间结合效果良好, 混凝土密实度高, 成功钻孔取出 28.15 m 的四级配混凝土芯样, 为当时世界最长的混凝土坝芯样(图 7)。

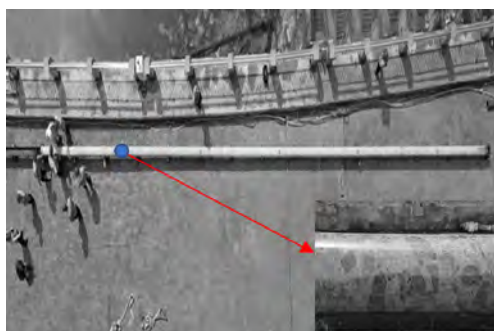


图 7 混凝土钻芯芯样

Fig. 7 Drilled concrete core sample

2021 年 7 月 9 日工程蓄水完成, 2021 年汛期大坝接受了设计工况检验, 大坝坝基及两岸帷幕洞渗水总量为 1.22 L/s , 坝体无渗水, 远小于设计预警建议值 40 L/s , 各项监测指标均好于设计值。

3 结论

随着中国筑坝逐渐转向高寒、高海拔地区, 对大体积混凝土防裂提出更高要求, 为了克服传统温度控制的缺陷, 提出了大体积混凝土温控防裂智能监控技术。结合混凝土开裂全过程仿真试验以及大体积混凝土智能温控理论方法, 实现大体积混凝土温度控制的智能化。工程应用表明采用本技术后可有效提升大体积混凝土温控水平, 实现温控过程的优化设计, 提高温控施工达标率; 混凝土浇筑、通水冷却等环节实现无人干预智能化, 保证混凝土质

量的同时节省人工成本, 大幅减小乃至避免温度裂缝的产生, 实现无缝大坝建设目标, 有效提高大体积混凝土施工建设质量, 可在同类工程中推广应用。

参考文献:

- [1] MEHTA P K, MONTEIRO P J M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, third ed[M]. McGraw-Hill, New York, 2006.
- [2] XIN J D, ZHANG G X, LIU Y, et al. Effect of temperature history and restraint degree on cracking behavior of early-age concrete[J]. Constr Build Mater, 2018, 192: 381–390.
- [3] 迟培云, 钱强, 高昆. 大体积混凝土开裂的起因及防裂措施[J]. 混凝土, 2001(12): 30–32.
CHI Peiyun, QIAN Qiang, GAO Kun. Concrete (in Chinese), 2001(12): 30–32.
- [4] 王晓玲, 王栋, 任炳昱, 等. 高拱坝混凝土振捣机器人系统研发及应用[J]. 水利学报, 2022, 53(6): 631–643.
WANG Xiaoling, WANG Dong, REN Bingyu, et al. J Hydraul Eng (in Chinese), 2022, 53(6): 631–643.
- [5] YANG J, HU Y, ZUO Z, et al. Thermal analysis of mass concrete embedded with double-layer staggered heterogeneous cooling water pipes[J]. Appl Therm Eng, 2012, 35: 145–156.
- [6] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [7] 朱伯芳. 混凝土坝的数字监控[J]. 水利水电技术, 2008, 39(2): 15–18.
ZHU Bofang. Water Resour Hydropower Eng (in Chinese), 2008, 39(2): 15–18.
- [8] 张国新, 刘毅, 李松辉, 等. “九三一”温度控制模式的研究与实践[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 179–184.
ZHANG Guoxin, LIU Yi, LI Songhui, et al. J Hydroelectr Eng (in Chinese), 2014, 33(2): 179–184.
- [9] 王振红, 张国新, 刘毅, 等. 基于试验和仿真的混凝土早龄期抗裂特性方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(1): 55–62.
WANG Zhenhong, ZHANG Guoxin, LIU Yi, et al. J China Inst Water Resour Hydropower Res (in Chinese), 2021, 19(1): 55–62.
- [10] XIN J D, ZHANG G X, LIU Y, et al. Evaluation of behavior and cracking potential of early-age cementitious systems using uniaxial restraint tests: a review[J]. Constr Build Mater, 2020, 231: 117146.
- [11] XIN J D, JIANG X M, CHEN Z Y, et al. Early age thermal cracking resistance of basalt fiber-reinforced concrete for mass concrete structures under restraint condition[J]. Structures, 2022, 45: 1189–1198.
- [12] 刘毅, 杜雷功, 钱文勋, 等. 高寒区高混凝土坝关键技术难题与解决途径[J]. 水利水电技术, 2020, 51(3): 45–52.
LIU Yi, DU Leigong, QIAN Wenxun, et al. Water Resour Hydropower Eng (in Chinese), 2020, 51(3): 45–52.
- [13] SPRINGENSCHMID R, BREITENBUCHER R, MANGOLD M. Development of the cracking frame and the temperature-stress testing machine[C]//Springenschmid R (Ed.). Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. London: E & FN Spon, 1994: 137–144.
- [14] KOVLER K. Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage[J]. Mater Struct, 1994, 27(6): 324–330.
- [15] 张国新, 李松辉, 刘毅, 等. 大体积混凝土防裂智能监控系统[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 83–88.
ZHANG Guoxin, LI Songhui, LIU Yi, et al. Adv Sci Technol Water Resour (in Chinese), 2015, 35(5): 83–88.