

## 基于通水冷却的碾压混凝土重力坝施工期温度应力控制技术研究

万强强

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]碾压混凝土重力坝浇筑过程中水化热引起的温升很大,温度过高会产生应力过大而造成裂缝。本论文以某碾压混凝土重力坝为例,开展了通水冷却降温法应用于施工期温度应力控制方面的应用研究。基于温度场及应力场原理对冷却管设置、水流温度设定值、通水时间和通水时长进行了设计优化,并建立了一个包含温度检测、数据分析以及动态调节的反馈体系。通过实验得出,合理的通水冷却系统设计方案配合全生命周期的温度监控及时调整可以很好地控制住坝体内的温度应力,避免出现裂缝的情况,该成果对类似工程有一定的借鉴作用。

[关键词]碾压混凝土重力坝;通水冷却;温度应力;参数优化;动态调控

DOI: 10.33142/ect.v4i3.19410

中图分类号: TV523

文献标识码: A

### Research on Temperature Stress Control Technology during the Construction Period of Roller Compacted Concrete Gravity Dam Based on Water Cooling

WAN Qiangqiang

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

**Abstract:** The temperature rise caused by hydration heat during the pouring process of roller compacted concrete gravity dam is significant, and excessive temperature can generate stress and cause cracks. This paper takes a roller compacted concrete gravity dam as an example to conduct research on the application of water cooling and cooling method in temperature stress control during construction. Based on the principles of temperature and stress fields, the design optimization of cooling pipe settings, water flow temperature settings, water flow time, and water flow duration was carried out, and a feedback system including temperature detection, data analysis, and dynamic adjustment was established. Through experiments, it has been found that a reasonable design scheme for the water cooling system, combined with temperature monitoring and timely adjustment throughout the entire life cycle, can effectively control the temperature stress inside the dam and avoid the occurrence of cracks. This achievement has certain reference value for similar projects.

**Keywords:** roller compacted concrete gravity dam; water cooling; temperature stress; parameter optimization; dynamic regulation

#### 引言

碾压混凝土重力坝利用干贫性混凝土分层碾压筑成,有速度快、造价低的特点,但是水泥水化热一次性集中放出造成坝体内部温度快速上升,在内外约束的影响下出现很大的温度拉伸应变,一旦温度拉应变大于混凝土的抗拉强度就会发生裂缝。温度裂缝主要是从坝体温度管理、施工处理以及结构设计等方面进行预防,而通水冷却降温 and 降低坝基温度是控制大坝温度的主要手段。该项目的大坝坐落于长江流域观音寺河中游河段,为国家 150 个重点水利工程之一,该大坝属于碾压混凝土重力坝,最高处为 109m,全长 306m,总库容达到 1.21 亿  $\text{m}^3$ ,电站装机容量 1.3 万 kW。该工程位于西南地区,气候的季节性温差很大,夏天炎热冬天寒冷的转换对于大坝降温控制有更高的挑战性,本文以该工程为基础,全面探讨了基于通水冷却的碾压混凝土重力坝施工期温度应力控制的相关技术。

#### 1 碾压混凝土温度场与应力场理论分析

碾压混凝土重力坝施工期温度应力来自水化热升温引起的温度变形受到内部及外部约束限制。当在坝体内高

热区域通水冷却时有利于改变坝内温度分布从而达到降温和平缓温度峰值的效果。温度场研究的关键在于热传导方程,该方程描述了混凝土内部传热情况以及温度扩散边界条件。施工期碾压混凝土温度场存在较强的非稳定性特点:随着混凝土连续浇筑层面增多,新浇混凝土水化热释放会使坝体内层逐层升温,造成非稳定温度场;采用三维有限元方法模拟施工期 RCC 重力坝温度场,充分考虑混凝土绝热温升随时间变化的性质、通水冷却以及混凝土分段浇筑过程中的气温环境等因素的影响。应力分析主要是温度场和约束作用的综合作用。大体积混凝土在温降时发生收缩,由于基岩或者已浇混凝土块体产生拉应力。高山地区对碾压混凝土筑坝而言,有低温期间浇筑混凝土上下坝面容易开裂及高温期间浇筑混凝土内部后期容易开裂的特点。温控防裂的主要控制参数包括最高温度、内外温差以及降温速度。当使用冷却水管通水冷却时,进水温度与混凝土间温差不大于  $20^{\circ}\text{C}$ ,通水冷却时混凝土的日下降幅度应不大于  $1^{\circ}\text{C}$ 。混凝土覆盖冷却水管之后就应开始通水冷却,通水冷却需要不定时切换流速方向,冷却流

速不低于 0.6m/s。

## 2 通水冷却系统设计与参数优化

### 2.1 冷却水管布置原则与设计方法

冷却水管布设是通水冷却系统设计的关键步骤,基本原则是在约束区域密集设置,在强约束区域也密排设置;按高度分层设置,每一层单独调控;冷却水管与上下游坝体以及横向施工缝的距离要满足一定的要求,避免出现表面裂缝问题。本文提出一种优化冷却水管布置的方法,先计算出混凝土浇筑仓冷却水管高度方向的基础布置间距、水平方向的基础布置间距、冷却水管相对缝面的基础距离以及相对上下游面的基础距离,再进行优化,形成水管布置图<sup>[1]</sup>。全面探讨冷却水管直径大小,冷却水流速快慢,材料选用种类以及布置形式等因素对温度控制的影响程度。该项目所使用的冷却水管布置方案的相关设计参数如表格所示。

表 1 冷却水管布置方案设计参数表

| 布置参数    | 取值/方案         | 说明                   |
|---------|---------------|----------------------|
| 水管布置形式  | 蛇形水平布置        | 适应碾压混凝土分层施工工艺        |
| 水平间距    | 1.0~1.5 m     | 基础约束区取较小值,脱离约束区可适当放宽 |
| 垂直间距    | 1.0~2.0 m     | 对应碾压层厚度,分层布置独立控制     |
| 水管材质与规格 | HDPE 管/Φ32 mm | 耐腐蚀、摩阻小、接头可靠         |
| 距坝体表面距离 | ≥0.8 m        | 防止表面裂缝               |
| 距横缝距离   | ≥0.5 m        | 避免缝面应力集中             |
| 单根水管长度  | ≤200 m        | 保证沿程水温均匀             |

### 2.2 冷却水流量与水温控制参数

冷却水流量与入水温度是影响冷却降温的重要因素,对于冷却水流速而言,流量过小不能及时带走水化热,流量过大又会增加沿程阻力并导致温差过大。根据施工规范要求,冷却水流速不应低于 0.6m/s,设计时应控制其为 0.8~1.2m/s 之间的速度;对于冷却水温度,则是在综合考虑大体积碾压混凝土温控防裂关键技术点后,提出了放宽基础温差、增加间歇式中期冷却、施工期水管冷却五参数控制、冷却结束标准确定四方面的内容,介绍了高碾压混凝土重力坝通水冷却设计的方法。在坝体两岸坡坝段施工过程中合理选定碾压混凝土大坝冷却水管铺设间距,可以得到良好的温控效果。夏季施工要设置制冷系统来制作冷开水,而冬天的时候可以使用大自然中的低温水,但是要调节好流速,否则会导致温度下降过快。

### 2.3 通水时机与持续时间优化

通水时间以及通水期间长短影响着温控的效果。如果通水时间过早,则会造成混凝土在未达到足够的强度时发生开裂;过晚就失去了控制混凝土内外温差的最佳时机,故混凝土覆盖水冷管以后就要开始进行通水降温。通水时间和通水的时期分为初期通水(约 7~15d)、中后期通水。以官地水电站为例,对水管冷却措施进行了调整,并通过跟

踪监测和数值计算的结果对设计参数进行及时地调节<sup>[2]</sup>。大古水电站为目前国内在建最高海拔碾压混凝土重力坝,通水冷却降温法是具有很好的大坝温度控制措施之一,在此工程建设过程中得到普遍应用。

### 2.4 冷却系统运行控制策略

冷却系统的运行控制方案要考虑施工进度及温控的要求。基础限制区域的通水量比较大,在解除限制以后可以适当减小一些通水量,在通水过程中要不断地改变水流的方向,避免温差过大。提出一种基于 BIM、数字孪生、人工智能相结合的智能温控系统体系结构。依据温度检测结果随时调节流量以及水温,形成“检测-分析-调节”的闭合回路控制系统。通过计算得出水管降温对于降低大坝整体温度是有一定作用的,在必要的情况下选择水管降温措施,在保证效果的前提下尽量扩大水管距离,提升通入水温来节省费用。对于冷却水系统来说,控制器会依据大坝混凝土以及冷却水的温度来即时计算出合适的流量,并向集成式的流水温控设备下达指令,进而由其内部双向智能调节阀来进行阀门的开启度调整进而达到流水量的调整的目的。

### 2.5 温控效果模拟与参数优化分析

温度控制模拟与参数的选择采用了三维有限元仿真分析的方法。运用有限元对工程溢流坝段进行稳定的温度场,非稳态的温度场与温度应力进行分析。针对自然入仓、通水冷却与控制浇筑温度三种不同的温度控制方案,在这三种方案中比较了坝体的温度场与温度应力的变化规律。通过构建重力坝三维有限元模型来模拟分析混凝土温度场以及应力场的变化情况,探究冷却水管各部分对坝体温度造成的影响,从而得出合理的冷却水管设置方式。参数优化分析结果显示,在保证工程的质量的前提下,为了节省施工时间和资金,在温度控制跟踪模拟中得出,在超出基础限制范围之后可以根据实际情况对原有的冷却管道之间的距离进行适当的扩大处理,但是上游附近变形区域以及压实防渗层面混凝土部位的冷却管间距不宜变动。

## 3 温度监测与反馈调控技术

### 3.1 温度监测系统构建

温度监测系统是温控判断信息依据,系统体系由感知层(温度传感器)、传输层(数据采集与通讯)、应用层(分析预警平台)。开发了智能出机口、仓面、通水、保护、温控等设备,做到全方位立体化实时精准控温,以低热胶凝材料体系设计改进、循环水管道内循环降温、多元场景复合层表面保温、分布式光纤智能远程测温反馈系统等技术组合,完成对混凝土温度场的全过程精确管理。此项目在建设期间,运用原材料存放喷淋装置、混凝土搅拌制冰设备、混凝土运输遮盖降温措施以及通水冷却降温系统等一系列全封闭式温控手段,在现场进行仓面验收“首件制”,浇筑过程“智能监控”,浇筑质量“回头看总结”的管理模式,提高大坝碾压混凝土浇筑工艺。

### 3.2 测温点布设与数据采集方法

测温点布置体现的是代表性和系统性以及可行性。在空间上是根据层次进行布置,在横向则是在中心部位及接缝附近增加测量密度,使用分布式光纤测温法对全坝段进行整个生命周期内温度场的变化实时观测,其中传感器有电阻式点温计和分布式光纤,采集的时间间隔在升温阶段加强到每半小时或一小时一次<sup>[3]</sup>。坝体内各层次布置足够数量的测温点,在基岩限制范围内和高温条件下施工区加强测点,保证可以完整地记录下坝体温度场的发展趋势;另外还应在冷却水管入口和出口设置测温仪器以跟踪冷却水温的变化情况,从而为通水参数调节提供依据。

### 3.3 温度数据分析与预警机制

对温度数据处理分为实时数据分析、温度场重建及应力测算。预警级别设定为黄色、橙色以及红色三个等级分别应对不同应急措施。这个系统对混凝土由原料预冷到入仓、浇筑、通水冷凝,到养护等一系列过程进行自动化监控、通讯、检测和调节功能,达到混凝土坝施工期间“可测”,“可控”的工作性能,极大程度上减少了裂缝出现概率,一旦温度高于预警限值,将会自动报警并提示工作人员改变通水参数;通过温度观测数据使用数值模拟方式及时对坝体应力恢复,判断目前温控方案是否合理。

### 3.4 基于监测数据的动态调控方法

动态调节机制就是“检测-预测-决策-实施”的闭环控制,在线采集实际观测温度对模拟模型参数进行校正,预测温度变化趋势,根据预报结果实时变化通水量大小、水温和时间段。以乌东德水电站低热混凝土二道坝温度控制防止裂缝为例,结合整个大坝的温度场、应力场分析得出全坝各部分区域温度的变化过程以及温度应力情况,并应用智能通水 2.0 系统,实现精确化分区通水方式,同时注重后期升温过程把控。此系统可满足强度、连续浇筑条件下的坝体中心温升最大值被有效限制为小于等于 47℃,最大内外温差一直在设计允许的范围内即小于等于 25℃之内。混凝土内部没有产生有害的贯穿性裂缝。

### 3.5 信息化技术在温控中的应用

信息化技术提高温控系统智能化程度。BIM 技术完成施工过程三维可视化模拟,数字孪生技术创建与实体工程相应演化的虚拟模型。集成革新了远程数据收集及处理手段,以云端实时监测和仿真预测数据辅助智能化高效质量管理决策;物联网技术使传感器数据自动采集并通过无线传输至智能温控 APP 在手机端实时显示警告提示等功能;针对现有技术不能根据大坝混凝土因季节、浇筑强度、温控过程等因素变化而需要随之改变的水温及流量进行实时监测进而实施动态调节这一问题而研制出冷却水站在在线协同控制系统。

## 4 经济性与施工管理分析

通水冷却系统的经济效益包含原材料费用、设备运行

费用及人工保养费用。HDPE 管售价约为 5~8 元/m,整个管道的长度大约有 3~5 万 m,则原材料费大概有 15~40 万元。冷却系统的耗电费用占总的控温费用的 30%~50%。通过对相关参数进行调整节省了 10%~15%的电费,可以通过扩大通水管之间的距离并且提升通水水温来降低能耗,施工环节中,基于 DG 水电站碾压混凝土重力坝的研究,为了保证工程质量以及减少工程延期、缩减投资,根据温控跟踪仿真的结果分析得知,在解除基础限制区域之后可以让原来的通水管间距稍微增大一些。截至目前此大坝已经浇筑至 93m,浇筑的混凝土总量超过 45 万 m<sup>3</sup>,最高月浇筑强度达 4.5 万 m<sup>3</sup>,整个工程的安全及质量管理都处于受控状态<sup>[4]</sup>。本工程在建设过程中,每天投入劳动力 700 余人次、塔吊、挖掘机、推土机、压路机等各种设备 100 余台班加快施工进度,保障早日完成下闸蓄水任务。

## 5 结语

本文以某一碾压混凝土重力坝工程为依托,进行系统性探讨有关通水冷却的施工温度应力控制技术的研究问题。围绕着温度场与应力场相关理论解析了通水冷却水管设置、水流温度调节及通水时间等问题的关键设计思路,建立了一个包括温度实时测量、统计处理以及灵活调节的相关反馈体系;研究结果显示,合理有效的通水冷却系统设计配合全过程温度监控及时调整可以很好地对坝体进行温度应力控制,从而避免出现裂缝的情况;精细分区化的通水方式并且重视后半段温度回升的控制,传统的手动通水冷却方案很难做到对混凝土的实时温控,容易造成温度应力集中问题,智能化通水系统的使用有效地克服这个问题。利用文中提出的大坝温控防裂策略,在外保温和内通水降温的双重作用之下,坝体上下游面以及仓面温度变化范围大大缩小。官地水电站大坝混凝土的温控效果较好,各应力指标达到了蓄水的安全标准,同时在整个施工阶段到投入使用的初期均无对工程有害的裂缝产生。今后还应该加强对智能温控系统以及 BIM、数字孪生技术的研究,使碾压混凝土重力坝温控防裂能够实行智能化、精细化管理。

### 【参考文献】

- [1]闫博,杨军严,李虎城.碾压混凝土坝溢流段温控仿真分析[J].水资源与水工程学报,2025,36(3):135-141.
- [2]罗黄辉.碾压混凝土重力坝通水冷却施工优化[J].水上安全,2024(19):176-178.
- [3]王春娟.碾压混凝土重力坝施工温控措施分析[J].绿色环保建材,2019(3):135-136.
- [4]李金磊.碾压混凝土重力坝施工期温度和应力场分析研究[D].河南:华北水利水电大学,2022.

作者简介:万强强(1999.7—),男,毕业院校:华北水利水电大学,所学专业:水利水电工程,当前就业单位:中国水利水电第十二工程局有限公司,职务:项目安全环保科副科长,职称级别:助理工程师。