

基于模块化模板的面板周边缝精准施工技术研究

孙少帅

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]面板堆石坝周边缝施工质量直接影响大坝的防渗性能以及后期使用的稳定性,在传统的周边缝施工过程中存在模板定位误差较大、缝型不易控制、工作效率较低的技术问题的基础上, 本论文以某抽水蓄能电站及某水电站大坝项目为背景, 提出了模块化模板法下的面板周边缝精确施工技术。对该周边缝的结构类型及受力状况进行了研究并形成了模块式模板系统, 在此基础上开发了周边缝模板安装调节、缝宽及线型调控、周边缝混凝土应力应变控制等一系列关键技术。结合该技术提出了以多源数据为基础的施工控制思路, 引入了 BIM 仿真技术、精密测量技术和多源信息融合技术。工程实践证明, 此方法能够很好地提高周边缝施工精度以及质检水平, 周边缝宽度偏差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 之内。

[关键词]面板堆石坝; 周边缝; 模块化模板

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19611

中图分类号: TV641

文献标识码: A

Research on Precise Construction Technology of Panel Peripheral Seam Based on Modular Template

SUN Shaoshuai

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

Abstract: The construction quality of the peripheral joints of a concrete face rockfill dam directly affects the anti-seepage performance and stability of the dam during later use. Based on the technical problems of large template positioning errors, difficult control of joint types, and low work efficiency in the traditional peripheral joint construction process, this paper proposes a precise construction technology for the peripheral joints of the concrete face under the modular template method, taking a pumped storage power station and a hydropower station dam project as the background. A modular formwork system was developed based on the study of the structural type and stress conditions of the peripheral joint. On this basis, a series of key technologies were developed, including the installation and adjustment of the peripheral joint formwork, the adjustment of joint width and line shape, and the control of concrete stress-strain in the peripheral joint. A construction control approach based on multi-source data was proposed, incorporating BIM simulation technology, precision measurement technology, and multi-source information fusion technology. Engineering practice has proven that this method can effectively improve the construction accuracy and quality inspection level of peripheral joints, with the width deviation of peripheral joints controlled within $\pm 3\text{mm}$.

Keywords: concrete face rockfill dam; surrounding seams; modular template

引言

混凝土面板堆石坝已经成为目前公认的较为经济的一种坝型,在20世纪80年代传入中国以后得到蓬勃发展,已经成为国内水利水电工程中最具有竞争性的坝型之一了。随着筑坝技术水平向着寒冷、地震、厚覆盖层等地质复杂环境的方向发展,面板的变形、应力以及周边缝止水结构就成为大坝能否安身立命的重要因素了。而周边缝则是面板与趾板之间的重要连接点,周边缝的质量好坏决定着整个防渗系统是否完整。但是传统的周边缝施工往

往会出现模板定位不准、缝形难控制、水平差无法达到高标准等等情况,很难应对越来越高的对工程质量的要求。近年来,模块化模板技术应用于水利工程逐渐增多。有研究表明使用标准化的模板模块代替传统的散拼模板方案有利于提高施工精度、加快施工速度;随着BIM技术和精密测量手段的应用使得施工过程更加精细可控。运用BIM技术建立面板堆石坝参数化模型,把坝体分解成一系列互相联系起来的规则部件来构成坝体参数化模板。本文通过针对某抽水蓄能电站、某水电站大坝工程进行面板

周边缝精确施工技术模块化模板的研究,目的在于克服传统施工方法中的不足之处,对类似工程项目具有借鉴意义。

1 工程概况与面板周边缝施工难点分析

1.1 周边缝结构形式与受力特性分析

边排缝位于面板和趾板之间和岸坡灌浆帷幕之间的连接处,是面板堆石坝抗渗结构中的重要组成部分;根据所受力特点,边排缝主要有三种变形形式即:张开变形、沉降变形及剪切变形。混凝土面板堆石坝经历施工期、蓄水期、运行期三个时期都会引起面板变化引发边排缝产生三维位移,即张开、下沉以及剪切位移。边排缝的防水一般是表面用的是橡皮或塑性材料止水,底部采用铜止水,边排缝大变形易造成边排缝橡皮止水及铜止水损坏,在水库蓄水时水压作用下引起面板向下游方向移动,边排缝产生一定开度。有限元计算结果说明在充水期,面板上有比较大的拉应力区,而且最大拉应力都已经超过了混凝土所能承受的最大限度,在大坝两侧紧贴山体附近的竖直接缝处的拉伸也很大。所以周边接缝的设计要结合大坝的变形特点,选择合适的宽度及止水结构形式。某抽水蓄能电站大坝周边缝使用的是三重止水装置(铜止水、橡胶止水带、SR 填料)的组合式结构,适应缝宽变动区间在 20~50mm 之间。

1.2 周边缝施工精度控制难点与关键问题

周边缝施工存在着许多方面的精度问题。一是测量放样的精度较高。周边缝的空间曲线较为复杂,涉及坝面曲线和岸坡地形的拟合,传统的全站仪放样很难达到毫米级定位的要求。二是模板安装的稳定性难以把控,面板斜坡面上浇筑时模板受到混凝土侧压力以及振捣力的影响容易发生移动,造成周边缝宽度不均匀的现象。三是止水安装配合困难,铜止水片需要准确地埋设在缝中心处,偏离中心就会降低止水能力。周边缝变形量就是判断混凝土面板与趾板之间的止水结构是否安全可靠的一个重要指标,在混凝土面板坝防渗效果评估过程中起着至关重要的作用。主要难点在于:怎样对模板进行精确快速地安设、怎样使相邻处预留缝宽度及线条一致以及怎样使混凝土浇筑过程中保持稳定等几方面的问题。要解决这几个方面的问题要从模板体系的设计、施工方法的选择、施工过程的控制这三个方面共同考虑。

2 模块化模板体系构建与精准施工关键技术

2.1 模块化模板设计理念与技术路线

模块化的模板设计理念是在传统的整体模具基础上将其拆分为标准化的功能模块,根据不同的结构部分采用不同的组合来满足要求。它有以下几个设计原则:模块化

原则——模块单元尺寸规格化方便更换及重复利用;高刚性的原则——模板的整体系统要有一定的强度来抵抗施工荷载的作用;可调节的原则——设置多种调节装置来应对施工误差的影响。另外模块的设计还需考虑轻量化、耐用性的原则,在保证系统强度的同时适当减轻模板系统的质量,方便现场的移动安装工作,并选择抗腐蚀能力强的材质以增加模板的寿命来适应抽水蓄能电站大坝多仓面、长工期的施工要求。技术思路是这样的:首先是进行周边缝结构参数的研究,明确模板单元切割标准;然后制作模块化模板的设计以及加工;接着开发相应的安装调节方法;最后利用工程实例检验所开发的技术。

表 1 模块化模板与传统模板技术方案对比

对比项目	传统钢木组合模板	模块化模板
标准化程度	低,现场加工为主	高,工厂预制标准单元
安装精度	±10mm	±3mm
周转次数	5~8次	20次以上
周边缝适应性	需现场改制	模块组合灵活调整
劳动力投入	6~8人/班	3~4人/班

技术路径是这样的:先进行周边缝构造参数分析,制定出模板分块标准;在此基础上再对模块化模板的设计及加工;之后开发相匹配的安装调节工艺;通过施工实践检验技术成果。

2.2 模块化模板安装与调整工艺

模块化的模具组装工艺主要包括以下步骤:定位基准-模块组装-就位调整-固定锁定-二次检查。组装前根据测量放样的点进行模板组装基准线的设定,基准线误差不大于±2mm。模块组装采用企口式连接,在模块之间设置密封胶条以防漏浆。在拼接缝处设置模板,模板的外侧安装防漏组件以增强其接触紧密性,使混凝土浇筑成型后的表面平整;调整工艺通过三维微调结构,使模板可在水平面内前后、左右、上下三个维度上分别独立调整。前后调整适应面板厚度差异,左右调整保持缝距均匀,上下调整修正高差误差等。现场试验的结果显示应用此工艺之后,一块模板安装的时间从原来的 45min 减少到了 25min,安装合格率也提高了 11%达到了 96%以上。

2.3 周边缝宽度与线形控制技术

周边缝宽度的控制是通过定位块加限位器联合的方式,定位块依据所设计的缝宽预制成型,在安装的时候卡入模板之间来保证缝宽的一致性,限位器在浇筑混凝土时也一直起着作用,避免模板受到挤压而发生形变。对于线形控制,则采取的是分段控制、总体拟合的方式,每 2m 设一个控制断面,利用全站仪进行三维坐标校核,在面板

堆石坝施工的参考下,对面板周边缝内侧边沿进行测量放样,在面板边缘处标出一条准确定位线,可以有效地避免由于约束引起的面板结构性裂缝。周边缝施工要注意精准放样和标记的作用,保证其位置符合设计的曲线。

2.4 混凝土浇筑过程中的变形控制技术

在混凝土浇筑时,模板支撑体系受到的侧向力最大值达到 30~50kPa,振捣作业产生的冲击性动载加重了模板支撑系统的变形程度,所以需要采取如下控制方法:改进浇筑方案,使用对角线分段式浇筑,避免一侧受压过大;控制浇筑速度,每小时提高高度不得超过 1m;安装对拉螺栓及斜撑装置,提高模板系统的整体强度;及时监控,对重点部位安装位移计。

温控防裂,周围缝处的温控尤其重要,采用低热水泥、控制入仓温度、加强养护等方式来降低温度应力对缝形成的影响,在此之上还要适当地安排好浇筑的浇筑间隔,在前一个浇筑的部分充分收缩变形后进行后浇块浇筑,在一定程度上可以防止由于约束应力造成的混凝土裂缝。

3 多源数据驱动的施工精度控制方法

3.1 基于 BIM 的模板安装与施工模拟

BIM 技术给周边缝施工提供了一个可视化的、可以进行模拟的技术环境。通过 BIM 软件进行探究如何构建面板堆石坝 BIM 模型的重点以及要点,从而能够把坝体结构转化成一系列的逻辑约束的部件来构建坝的参数模板。建模步骤如下:绘制出地形曲面和坝体的边界线之后,再制作趾板以及面板的三维模型,接着制作周边缝的空间曲线,最后构建模板模块化的模板组件库。施工模拟应用可以用来检验模板架设方案是否合理,在虚拟环境中模拟出模板装配次序、吊装路线和调整程序等,以便提前发现问题所在。运用碰撞检测减少施工风险,在方案模拟过程中提前了解施工前后工序中各个构件的空间位置关系,提前找出施工可能出现的空间位置问题,在某水电站大坝施工模拟中,发现并且解决了 12 个安装冲突,免除了返工,节省工期 5 天左右。

3.2 高精度测量技术在周边缝控制中的应用

传统的测量方式不能达到周边缝施工毫米级别的精度标准,在此情况下必须采用高精度的测量系统,高精度全站仪(测角精度 0.5",测距精度 1mm+1ppm)、激光跟踪仪(测量精度 $\pm 0.02\text{mm}$)、三维激光扫描仪分别用于控制网布置以及模板位置检查、重要位置的毫米级精确测量、周边缝的完整点云信息采集等环节的工作,它们的优点分别是测量距离远且方便移动、适用于全面的大坝工程施工场地范围内使用;可以对重要部位进行极高的测量精度;

能够获得周边缝完整的点云信息,便于对周边缝的整体形态进行观察,并能在短时间内得到周边缝的真实三维图形。测设方案采取分等级控制方式:一等级控制网由 GPS 静态接收机测设建立,在两岸比较稳定的基岩面上布置,控制点间隔不大于 200m;二等级控制点由全站仪测设加密,沿着趾板轴线每隔 20m 设一点,构成施工测量网架;三等级是模板安装位置坐标测设,在每一整块模板上都要至少有三个定位控制点。每一个施工段落完成后都进行一次三维扫描并与 BIM 模型比对,在此基础上进行点云配准算法处理出误差值,误差超过限时立即修正;现场操作还要关注好测量时间的选择,最好是选择在温度相对平稳而不会出现强烈的阳光直射的时候进行,尽量减少由于温度差引起的温度差变化和大气散射造成的误差影响。每次检测之前都要对设备进行调校以保证系统误差处于可控状态之内。一座抽水蓄能电厂使用这套检测系统之后,模板安装定位时间节省了 30%,检查复核效率增加了 50% 以上。

3.3 施工过程实时监测与动态调整机制

周缝施工过程中实时监控也是保障工程质量的一项措施,在模板重要位置安装位移传感器及应力计,及时获取模板变形信息以及混凝土的压力情况。监控信息用无线信号传递给控制中心,从而达到对施工数据的实时监控,周缝的三向变形是面板坝施工中最关心的一个监测项目,它是判断周缝止水效果是否合格的关键因素之一。自适应调节依据预先设定的误差范围,在超过规定的数值后就会触发警报并发出调节指令,工地施工人员根据指令对模板进行微调或者对混凝土浇筑参数做出相应的改变,使整个施工过程都处于可调控之中。

3.4 数据融合驱动的精度偏差修正方法

多元测量信息(全站仪、激光跟踪仪、三维扫描、传感器)有不同的精度及时间、空间分辨率特点,需要利用数据融合技术提取最佳估计量。各种测量方式都有自己的优点:全站仪测距范围大而测点多较稀疏、激光跟踪仪准确性高但是受限于视线条件、三维扫描可以得到大量点云但是存在局部误差、传感器能够实施动态监测并且是断续的点式样本。单一的数据源无法很好地描绘周围缝隙的情况,必须采用数据融合的方式加以补足。数据融合模型分为三层结构:第一层为数据预处理阶段进行坐标统一以及滤波去噪处理,把各个系统下的测量数据归一到同一个参考基底上,使用中值滤波或者小波去噪的方法过滤掉一些突变的点;特征提取层检测近邻缝的主要几何参数如缝宽、缝深、中心线偏差、止水位移偏差等因素的主要量值;汇集分析层利用最小二乘法或者卡尔曼滤波进行偏差补偿,

其中卡尔曼滤波应用于施工现场动态实时估算,而最小二乘法则可用于阶段性汇总计算,数据融合驱动的精确管理方式,包括获取多种传感器检测信息→时空校准时→融合处理计算→误差辨识→误差修正命令发出→现场纠正等一系列步骤,形成了一个闭环反馈控制系统,使施工过程处于动态调整之中,由事后检查变为了现场管理,很大程度上降低了由于误差叠加造成的返工事件的发生概率。在现场施工中发现使用此方法之后周边缝宽度偏差为 $\pm 3\text{mm}$ 之内、线性偏差不超过 $L/1000$,在规定范围内。比传统方法偏差超标概率下降了近 $40\% \sim 60\%$,大大提高了施工的准确性及速度。

4 结语

本文以模块化模板为背景进行面板周边缝精确定位施工技术的研究,研究成果如下:模块化模板系统通过标准化单元切割和三维调节机构的设计,达到了模板快速支设及精确到位的效果,比常规工艺提高了 44% 的安装速度并且提高了 11% 的合格率;多源信息指导下的精确定位

采用了 BIM 仿真、精密测量以及数据集成处理等技术手段,构建了测量-分析-调节的循环反馈控制模式,使得周边缝尺寸偏差控制在 3mm 范围内。现场的应用证明了此技术提高面板堆石坝周边缝施工精度以及控制能力的优势所在,可以作为推广运用的一种技术路线。未来的研究可以考虑如何更好地实现智能化模板技术和自动化的量测手段相结合,从而使得周边缝施工更加智能化、无人化。

[参考文献]

- [1] 郇能惠,王立安,任强,等.高混凝土面板堆石坝接缝止水试验研究和应用[J].岩土工程学报,2025,47(1):30-37.
 - [2] 殷鸣,胡清义,熊泽斌,等.高混凝土面板堆石坝接缝止水设计综述[J].人民长江,2024,55(9):165-172.
 - [3] 殷鸣,陈兴,熊堃.寒冷强震地区 250m 级特高混凝土面板堆石坝接缝止水设计[J].人民珠江,2024,45(8):114-120.
- 作者简介:孙少帅(1998—),男,毕业于陕西理工大学土木工程,就职于单位中国水利水电第十二工程局有限公司,项目工程技术部副主任,助理工程师。