

沥青混凝土心墙坝监测与实施分析研究

曾智斌

新疆华瑞工程管理咨询有限公司 新疆 北屯 836099

摘要: 沥青混凝土心墙坝作为重要坝型,其安全运行依赖于心墙防渗性能与力学稳定性,而系统有效的监测体系是掌握心墙工作性态的关键。本文针对沥青混凝土心墙坝监测需求与技术挑战,系统构建了涵盖变形、应力应变及渗流等多维度的监测指标体系,提出基于物联网的自动化监测系统设计方案。在此基础上,引入多源数据融合方法,建立了数字孪生模型与风险评估预警机制。研究表明,通过施工期监测数据反馈指导施工过程,可有效提升心墙填筑质量,为同类工程安全监控提供理论依据与技术参考。

关键词: 沥青混凝土心墙坝;监测技术;实施分析

引言: 沥青混凝土心墙坝凭借其优异的防渗性能和良好的变形适应性,在复杂地质条件和高坝建设中得到了广泛应用。心墙作为坝体的核心防渗结构,其工作性态直接影响大坝的整体安全。因此,建立科学完善的监测体系,对心墙施工期和运行期的变形、应力、渗流等关键参数进行实时感知与精准分析,成为保障大坝安全的重要手段。本文立足当前监测技术发展前沿,探讨沥青混凝土心墙坝监测体系构建与实施分析方法,以期为工程实践提供指导。

1 沥青混凝土心墙坝监测需求与挑战分析

1.1 监测需求

沥青混凝土心墙坝的安全监测需求源于其结构特点和服役环境的多重复杂性。首先,心墙作为防渗主体,长期承受上下游水位差形成的水力梯度,一旦发生渗漏或破坏,将直接威胁大坝安全,因此对渗流压力、渗流量等参数的连续监测至关重要。其次,心墙由沥青混凝土材料填筑而成,其力学行为具有明显的温度敏感性和时间依赖性,在坝体填筑加载和库水位变动过程中,心墙内部应力分布不断调整,可能产生应力集中甚至拉应力区,需要对应力应变状态进行跟踪监测。再者,心墙与两侧过渡层的材料性质差异较大,变形协调性问题突出,不均匀沉降可能导致心墙开裂,必须通过变形监测掌握心墙及坝体的沉降与水平位移规律。此外,施工期是心墙质量形成的关键阶段,实时监测沥青混合料温度、压实度等参数,可为施工工艺调整提供直接依据,实现质量控制的前移。综上所述,沥青混凝土心墙坝监测需求贯穿施工与运行全生命周期,涵盖力学、水力、热力学等多物理场参数^[1]。

1.2 现有监测技术的局限性

尽管当前监测技术已取得长足进步,但在沥青混凝土

心墙坝应用中仍存在若干局限性。其一,传统点式监测仪器如沉降仪、渗压计等,只能获取离散测点的数据,难以全面反映心墙整体的空间分布状态,尤其对于心墙这种薄壁结构,局部异常可能被遗漏。其二,埋入式仪器的存活率问题突出,心墙施工过程中重型机械碾压、高温沥青混合料摊铺等恶劣工况,常导致传感器损坏或电缆断裂,造成监测断面数据缺失。其三,现有监测技术对心墙内部状态的感知能力有限,例如对心墙可能产生的细微裂缝,常规渗压计难以在初期及时发现,而温度监测也只能反映大致热场分布。其四,多源监测数据缺乏有效融合手段,变形、渗流、应力等数据往往独立分析,未能揭示各物理量之间的内在关联,制约了对心墙整体性态的准确判断。其五,自动化监测系统的稳定性和抗干扰能力仍有待提升,野外复杂环境下长期运行的可靠性面临挑战。这些局限性要求我们突破传统监测思维,引入新技术、新方法,构建更为完善的监测体系。

2 沥青混凝土心墙坝监测体系构建

2.1 监测内容与指标体系

沥青混凝土心墙坝监测体系的构建首先需要明确监测内容与指标体系。从大坝安全控制的本质需求出发,监测内容应涵盖变形、渗流、应力应变及温度四大类。变形监测指标包括坝体表面位移(水平位移和垂直位移)、心墙内部沉降、心墙水平位移以及心墙与过渡层之间的相对位移,这些指标反映坝体的整体稳定性和心墙的变形协调能力。渗流监测指标主要包括心墙基础渗透压力、心墙后渗压水位、通过心墙的渗流量以及绕坝渗流情况,直接表征心墙的防渗效果。应力应变监测指标涵盖心墙垂直土压力、水平土压力、沥青混凝土应变以及心墙与基座接触面的界面压力,用于评价心墙的受力状态和拱效应程度。温度监测指标包括沥青混合料施工温度、坝

体内部温度场分布以及季节性温度变化,因为温度不仅影响施工质量,也通过热应力影响心墙的力学行为^[2]。另外,还应将库水位、降雨量、气温等环境量纳入监测体系,作为各效应量分析的基础因子。这些指标相互关联、互为印证,共同构成心墙安全评价的完整指标体系。

2.2 监测技术选型与传感器布局

2.2.1 变形监测

变形监测是评价心墙坝结构性态的核心内容。表面变形通常采用高精度全站仪或GNSS自动化监测系统,在坝体关键点布设测墩或棱镜,实现全天候实时监测。内部变形主要依靠水管式沉降仪和引张线式水平位移计,前者基于连通管原理测量垂直沉降,精度可达0.1mm,后者通过不锈钢丝传递位移监测水平变形。传感器布局应选择最大坝高断面、地质复杂断面及岸坡陡峭段作为重点监测断面,沿不同高程分层布设测点,覆盖心墙底部、中部及顶部。心墙与基岩接触带、基座连接处需加密布设,监测差异变形。近年来,光纤传感技术逐渐应用于心墙变形监测,分布式光纤可沿心墙纵向连续布设,实现变形场的准分布式感知,是未来发展的重要方向。

2.2.2 应力应变监测

应力应变监测旨在掌握心墙内部受力状态,判断是否存在拉应力或过大压应力。主要仪器包括土压力计和应变计,前者采用振弦式或差阻式传感器测量垂直和水平土压力,具有长期稳定性好的优点;后者监测沥青混凝土应变,需与无应力计配套使用以分离非受力应变。布局策略上,土压力计应成组埋设,同一测点同时布设垂直向和水平向传感器以计算侧压力系数。应变计沿心墙高度分层布置,在心墙顶部、与基座连接处等可能产生拉应力的部位适当加密。界面附近可布设界面土压力计监测心墙与过渡层相互作用。应力监测仪器埋设工艺要求极高,必须保证传感器与周围介质紧密接触,采用专用定位支架并在仪器周围人工夯实,确保测量结果真实性。

2.2.3 渗流监测

渗流监测是判断心墙防渗性能的直接手段。主要仪器为渗压计和量水堰,前者采用振弦式孔隙水压力计埋设于心墙下游侧过渡层、坝壳及基座岩体内,测量渗透压力;后者设置在坝下游排水沟内,量测总渗流量。测点布置应沿坝轴线选择多个监测断面,分层布设渗压计,重点监测心墙底部基础面扬压力变化,并在不同高程设置测点获取浸润线分布。心墙与两岸山体连接处应布设绕坝渗流监测孔。渗压计埋设后需进行初始值标定,运行期重点关注渗压水位对库水位变化的响应时滞和幅度;若心墙后渗压随库水位同步快速变化,可能预示存在渗漏

通道;反之则防渗良好。渗流量监测应同步记录库水位、降雨量等数据,通过相关分析识别异常变化。

2.3 物联网与自动化监测系统设计

随着信息技术的发展,基于物联网的自动化监测系统已成为提升监测效能的重要途径。该系统总体架构分为感知层、传输层、平台层和应用层四个层次。感知层由各类智能传感器组成,除传统振弦式仪器外,逐步引入MEMS传感器、光纤光栅传感器等新型感知元件,实现多物理场信息的实时采集。传输层采用有线和无线相结合的方式,核心监测断面敷设专用电缆保证传输稳定性,偏远测点可采用4G/5G或LoRa无线传输模块,构建覆盖全坝区的混合组网。平台层是监测数据的汇聚与处理中心,部署于云端或工地数据中心,具备数据接收、解析、存储、预处理等功能,采用时序数据库对海量监测数据进行高效管理。应用层面向最终用户,提供数据可视化、报警推送、报表生成等业务功能。自动化监测系统的设计需重点关注电源保障和防雷接地问题,野外环境宜采用太阳能供电与蓄电池互补方式,确保系统全天候运行^[3]。数据采集频次可根据工况动态调整,施工期和库水位骤变期间加密采集,正常运行期适当降低频次以延长设备寿命。系统还应具备自诊断功能,实时监测传感器状态、通讯链路质量和电源电量,发现异常及时报警。

3 基于多源数据融合的实施分析方法

3.1 数据预处理与特征提取

监测数据是心墙性态分析的基础,原始数据含噪声、粗差和缺失值,需经严格预处理方可使用。预处理主要包括三环节:一是数据清洗,采用 3σ 准则、物理判别法识别并剔除仪器故障或外界干扰产生的异常值;二是缺失值处理,短期缺失用线性、样条插值补全,长期缺失标记为无效数据;三是平滑去噪,通过移动平均法、小波变换滤除高频噪声,凸显数据变化趋势。预处理后进行特征提取,从时间序列中挖掘关键特征:时域特征(均值、变化速率等)反映物理量总体水平与变化剧烈程度;频域特征通过傅里叶、小波分析提取,识别周期性成分;统计特征(方差、自相关系数等)表征数据波动性与相关性,同时提取环境量与效应量的关联特征,为后续建模提供支撑。

3.2 数字孪生模型构建

数字孪生模型是心墙性态精准分析的核心,通过虚拟高保真模型映射物理大坝实时状态,构建分为几何、物理、数据三个层次。几何模型基于BIM技术,精确还原心墙、过渡层等空间形态,提供空间框架;物理模型采用有限元方法,依据设计资料和室内试验建立初始本构

关系,模拟心墙在各类荷载下的响应;数据模型通过卡尔曼滤波、粒子滤波等同化技术,将实时监测数据融入物理模型,动态反演材料参数,使仿真结果逼近实测值。模型可推演心墙全时空状态,动态展示位移场、应力场等演变,还具备情景模拟功能,可预演极端工况下心墙响应,为应急预案制定提供科学依据。

3.3 风险评估与预警模型

基于多源监测数据和数字孪生模型,建立心墙坝风险评估与预警模型,采用黄、橙、红三级分级预警及对应响应机制。预警指标结合历史监测数据统计与数值模拟结果,确定各效应量安全阈值,如沉降速率、渗压水位异常分别触发对应等级预警。预警模型采用D-S证据理论、贝叶斯网络等多源数据融合算法,综合评判多监测量异常程度,避免单一指标误报;结合LSTM网络预测监测时序,通过预测值与实测值对比实现提前预警。引入时间维度,采用GM(1,1)模型外推监测序列趋势,预判效应量是否超标。预警发布后,自动关联应急预案并推送处置建议,形成监测-预警-响应闭环管理。

4 施工期监测与施工质量反馈

4.1 施工期监测特点

施工期是心墙质量形成的关键阶段,其监测工作具有显著的阶段性特征,与运行期监测存在本质区别。首先,施工期监测具有动态跟进性,监测仪器需随坝体填筑同步埋设,测点高程不断抬升,监测系统处于边建设边运行的状态。这要求监测实施必须与施工进度紧密协调,预留足够的仪器埋设时间,避免因赶工而影响埋设质量。其次,施工期监测环境极为恶劣,心墙施工区域重型机械往来频繁,振动碾压对已埋仪器构成潜在威胁;沥青混合料摊铺时160°C以上的高温对传感器耐温性能提出考验;施工车辆误触电缆可能导致信号中断。因此,仪器埋设时需采取专门的保护措施,如加装钢套管、设置警示标志等^[4]。再次,施工期监测频次显著高于运行期,尤其是在心墙填筑高峰期,每日填筑一层甚至多层,需实时监测变形响应,掌握心坝随填筑荷载增加的即时变形,为控制填筑速率提供依据。施工期监测数据受施工干扰大,数据序列常出现台阶式跳跃,分析时必须区分真实

变形和施工干扰,剔除伪变化,保留有效信息。

4.2 监测数据对施工过程的反馈

施工期监测的核心价值的是通过数据反馈指导施工,实现动态设计与信息化施工,具体反馈体现在五个方面:一是通过心墙沉降监测控制填筑速率,若沉降速率突增或累计沉降超预期,需放缓心墙上升速度,避免加载过快导致孔隙压力升高或变形不协调;二是通过温度监测调整施工工艺,心墙碾压温度直接影响压实度,若摊铺温度损失过快,需缩短运输距离、加强保温或调整碾压时机;三是通过压实度监测优化碾压参数,试验段通过核子密度仪、钻芯取样检测压实度,结合碾压遍数、振动频率建立关系,确定正式施工工艺;四是通过应力监测验证设计假设,对比心墙底部土压力实测值与理论值,若实测值偏小,需重新评估拱效应及受力状态,必要时调整心墙断面设计;五是监测发现局部异常时,及时开展专项分析处置。监测反馈机制实现从“按图施工”到“按数据施工”的转变,有效提升心墙填筑质量。

结束语

沥青混凝土心墙坝监测与实施分析是保障大坝安全的重要手段。本文系统分析了心墙坝的监测需求及现有技术局限,构建了涵盖变形、应力应变、渗流等多维指标的监测体系,设计了基于物联网的自动化监测系统。未来研究应进一步探索分布式光纤传感、微机电系统等新型监测技术的应用,深化人工智能在监测数据分析中的融合,推动心墙坝安全监控向智能化、精准化方向发展。

参考文献

- [1]任桂香.沥青混凝土心墙砂砾石坝安全监测设计研究[J].湖南水利水电,2025(4):41-44.
- [2]苏佩珍,王虹.驮英水库沥青混凝土心墙堆石坝安全监测设计[J].广西水利水电,2025(3):64-67.
- [3]王晨浩,刘柳,李骏.高沥青混凝土心墙坝坝体安全监测分析[J].四川水利,2025,46(3):30-36.
- [4]梅华,何建新,刘亮.沥青混凝土心墙坝渗流监测分析及处理研究[J].水利建设与管理,2025,45(3):49-57.