

水库建设中的大坝安全监测技术及其应用

刘金伟

新疆维吾尔自治区金沟河流域水利管理中心 新疆 沙湾 832100

摘要: 水库大坝作为水利工程的核心,其安全直接关系到下游地区人民生命财产安全和生态环境稳定。本文聚焦水库建设中的大坝安全监测技术,系统阐述水准测量、全站仪测量等传统监测技术与光纤传感、GNSS等智能监测技术的原理与特点。以红山水库为例,探讨施工期与运行期监测技术的具体应用,涵盖坝体填筑、混凝土温控、变形监测等多个方面。多种监测技术的综合运用,能有效保障大坝安全稳定运行,为水库大坝安全监测提供了可借鉴的实践经验,对提升水库建设与运营安全水平具有重要意义。

关键词: 水库建设;大坝安全监测技术;具体应用

引言: 随着全球气候变化及极端灾害频发,大坝面临更复杂的安全挑战,传统监测手段已难以满足精准化、实时化需求。智能监测技术的发展,为大坝安全管理带来新契机。本文通过梳理大坝安全监测关键技术,结合典型工程案例,深入分析技术应用策略,旨在为提升水库大坝安全监测能力、完善风险防控体系提供理论与实践参考。

1 大坝安全监测的关键技术

1.1 传统监测技术

1.1.1 水准测量技术

水准测量是大坝垂直位移监测的经典方法,基于水准测量原理,通过水准仪和水准尺,沿大坝布置的水准点进行高程测量。该技术通过多次测量同一水准点,对比高程变化来判断大坝垂直位移情况。其优点是测量精度较高,适用于监测大坝沉降,但受地形、天气影响大,且需人工操作,测量效率较低,难以实现实时监测。实际应用中,需定期对水准路线校准,避免因仪器误差或点位变动影响结果。在坝体关键区域,常加密水准点布设,以捕捉细微沉降。尽管存在局限,但因其成熟可靠,仍是大坝安全监测的基础手段,与其他技术配合可提升监测完整性^[1]。

1.1.2 全站仪测量技术

全站仪集成了光电测距、电子测角等功能,能够在一个测站上同时完成水平角、垂直角、距离等测量工作。在大坝安全监测中,可通过在大坝关键部位设置监测点,利用全站仪进行角度和距离测量,进而计算出监测点的三维坐标,以此监测大坝的水平位移和垂直位移。虽然全站仪测量精度较高,但测量范围有限,且受通视条件限制,同时自动化程度较低,人工观测工作量大。为提升效率,常采用多测站联测方式扩大覆盖范

围。在复杂坝段,需提前清理遮挡物保障通视。其数据可与其他技术交叉验证,在中小型大坝监测中仍具实用价值。

1.1.3 压力传感器监测技术

压力传感器用于监测大坝的渗流压力和土压力。渗流压力监测中,通过在大坝坝体和坝基内埋设渗压计,感知孔隙水压力变化,进而掌握渗流场分布及变化规律。土压力监测则利用土压力计,将其埋设在坝体与基础接触面或坝体内部,测量土体对结构的压力。这类传感器测量结果直观,但需合理布置传感器位置,且长期使用存在零点漂移、老化等问题。

1.2 智能监测技术

1.2.1 光纤传感技术

分布式光纤传感技术(如BOTDR、BOTDA):基于光纤的后向喇曼散射或布里渊散射原理,分布式光纤可实现对大坝沿线数公里范围内应变、温度的连续监测。当大坝坝体发生变形时,会引起光纤应变变化,通过检测光信号的变化,可获取大坝各位置的变形信息,具有分布式测量、抗电磁干扰、长距离监测等优势。光纤布拉格光栅(FBG)传感技术:FBG传感器利用光纤光栅的波长-应变、波长-温度敏感特性,将被测量转换为光波长的变化。

1.2.2 全球导航卫星系统(GNSS)技术

GNSS包括GPS、北斗等卫星导航系统,通过在大坝上设置多个基准站和监测站,接收卫星信号,利用差分定位原理,可精确计算出监测站的三维坐标。该技术能够实现大坝全天候、实时、高精度的位移监测,不受通视条件限制,且自动化程度高,可远程传输数据,广泛应用于大坝的水平位移和垂直位移监测。

1.2.3 物联网(IoT)与无线传感器网络(WSN)技术

物联网技术将大坝上的各类传感器（如位移传感器、渗流传感器、应力传感器等）通过网络连接起来，实现数据的实时采集、传输和处理。无线传感器网络则由大量低成本、低功耗的传感器节点组成，节点间通过无线通信方式进行数据传输，无需复杂的布线，便于在大坝复杂环境中部署，可实现对大坝多参数、多节点的实时监测，提高监测系统的灵活性和扩展性^[2]。

2 大坝安全监测技术在水库建设中的具体应用

2.1 施工期监测技术的应用

2.1.1 坝体填筑过程监测

土石坝填筑质量直接影响大坝稳定性，需对高程控制、压实度和均匀性进行同步监测。在土石坝填筑施工中，全球导航卫星系统（GNSS）技术发挥重要作用。通过在坝体关键断面和坡顶、坡脚等部位设置监测点，实时获取三维坐标数据，精确控制每层填筑的高程和坡度。这些监测点按设计网格均匀分布，确保数据能全面反映坝体填筑形态。光纤布拉格光栅（FBG）传感器则埋设在填筑层间，利用其波长-应变敏感特性，连续监测土体压实过程中的应力应变变化。传感器埋设时需确保与土体紧密接触，通过波长偏移量换算应力值，为压实机械的参数调整提供依据，确保压实度符合设计要求。分布式光纤传感技术可沿坝体纵向铺设，基于布里渊散射原理，对千米级范围进行连续监测，实时捕捉填筑过程中是否存在不均匀沉降或局部变形，一旦发现异常，施工人员可及时调整填筑速度与材料配比。

2.1.2 混凝土坝施工温控监测

温控监测需实现对混凝土内部温度场的三维动态感知，结合冷却水管调控，将温度梯度控制在安全范围内。分布式光纤传感技术凭借其连续测温特性，沿坝体浇筑层布置测温光缆，采用螺旋或网格状布线方式，确保覆盖整个浇筑区域。通过监测不同位置的温度变化，实时绘制混凝土内部温度场分布云图。在预埋冷却水管的区域，通过监测进出水温度和混凝土内部温度，建立热传导模型，计算所需的冷却水流量和通水时间。FBG温度传感器与应变传感器组合埋设，前者精确测量混凝土温度变化，后者同步监测因温度变化产生的收缩应变。

2.1.3 基础处理监测

基础处理阶段需对防渗效果、桩基受力和边坡稳定性进行监测，确保基础达到设计承载能力。在大坝基础处理阶段，压力传感器和渗压计被广泛应用。对于帷幕灌浆工程，在灌浆孔附近按梅花形布置渗压计，实时监测灌浆前后的渗透压力变化。通过对比不同位置渗压计数据，绘制渗流压力等值线，直观判断帷幕的防渗效

果。在桩基础施工中，将钢筋计、土压力计埋设在桩身和桩周土体中。钢筋计通过焊接或绑扎方式固定在主筋上，监测桩基受力时的钢筋应力；土压力计则需与土体紧密贴合，监测土体反力变化。这些数据与设计计算值对比，可验证基础承载力是否满足要求。全站仪和水准测量技术则用于监测基础开挖和回填过程中的边坡位移和沉降，通过在边坡顶部和中部设置监测点，定期测量坐标和高程，利用位移-时间曲线评估边坡稳定性，保障施工安全^[3]。

2.2 运行期监测技术的应用

2.2.1 变形监测

大通过空间定位技术与传统测量手段结合，实现对水平位移和垂直位移的多尺度监测，为结构稳定性分析提供基础数据。GNSS技术通过在坝顶、坝坡及坝基设置多个监测站，结合基准站数据，采用差分定位算法，实现毫米级精度的实时位移监测。监测站布局遵循“关键部位加密、整体区域覆盖”原则，能及时发现坝体整体变形趋势。全站仪则用于局部变形监测，在易发生变形的区域，如坝肩、廊道进出口等设置监测点，通过极坐标测量方式，定期测量角度和距离，获取详细的位移数据。

2.2.2 渗流监测

渗流异常是大坝安全的主要隐患之一，需对渗流场分布、渗流量和渗流通道进行系统监测。通过压力-流量联合监测与空间定位技术，实现对渗流状态的全面评估。渗压计在坝体和坝基内按三维网格状布置，深度覆盖不同土层和防渗结构。通过实时监测孔隙水压力变化，利用有限元软件绘制渗流等势线，分析渗流场分布特征。在下游坝坡设置测压管，采用人工或自动测读方式，结合渗压计数据，判断渗流是否异常。流量监测仪安装在坝基排水孔、集水沟等位置，采用电磁流量计或超声波流量计，精确计量渗流量。

2.2.3 应力应变监测

应力应变监测通过在关键部位埋设传感器，获取混凝土、钢筋和土体的应力分布，结合力学模型验证结构安全性。在混凝土坝的坝体内部和关键部位，如坝踵、坝趾、廊道周边等，按照设计要求埋设应变计、钢筋计和无应力计。应变计采用振弦式或光纤式，监测混凝土应力变化；钢筋计与主筋串联，测量钢筋应力；无应力计则用于消除温度对应变测量的影响。在土石坝中，土压力计埋设在坝体与基础接触面、防渗体与坝体结合部等位置，传感器需进行预压处理，确保与土体充分接触。这些传感器数据通过无线传感器网络或有线传输方式，实时上传至监测中心，结合有限元分析模型，将实

测数据与理论计算值对比,评估大坝结构安全性。

2.2.4 环境量监测

环境因素对大坝安全的影响具有长期性和复杂性,需对气象、水位和地震等因素进行实时监测,建立环境-大坝响应关系模型。气象站设置在坝区附近,配备气温、降水、风速风向等传感器,采用自动采集和无线传输方式,实时获取气象数据。通过分析历史气象数据与大坝监测数据的相关性,建立环境因素对大坝渗流和变形的影响模型。水位监测设备安装在水库上下游,采用雷达水位计或压力式水位计,实现毫米级精度测量。结合渗流和变形数据,研究水位升降对大坝安全的影响规律,为水库调度提供依据。地震监测仪则部署在坝区及周边,采用强震仪和微震仪组合,实时监测地震波信号,通过地震动参数评估地震对大坝结构的影响,为抗震设计和应急响应提供数据支持^[4]。

3 冰川融雪区中型水库大坝安全监测技术实践——以红山水库为例

红山水库作为冰川融雪区中型水库,其大坝安全监测工作具有重要实践意义。监测涵盖粘土心墙主副坝、溢洪道等关键部位,为工程安全运行提供了有力支撑。

(1)主副坝监测包含坝体表面与内部变形、土体压力、渗流渗压等多项内容。渗流监测中,主坝0+090.21m坝基、0+128m断面心墙混凝土基座与基岩接触部位,帷幕后渗透水压力偏高,即便在主坝0+070m~0+141m段采取加强灌浆措施,这两处断面帷幕后渗压水位仍无明显下降。不过,0+093.724m、0+128m断面粘土心墙下游反滤料内渗压水位处于822.12~823.07m,与心墙上游水位相关性不明显,说明此区域心墙后产生的渗流有限。蓄水后,需密切关注这些测点渗压水位变化,若有突变需及时处理。其他部位坝基、坝体渗压水位正常,防渗体发挥了一定作用,其防渗效果有待高水位运行时进一步验证。(2)左右岸坡土体位移监测显示,岸坡与粘土心墙结合面变形较小,最大张开变形4.77mm,最大闭合变形3.13mm,目前测值在-2.93~1.41mm间,相对稳定。(3)土压力监测方面,粘土心墙内部各方向土压力计的压应

力随填土厚度增加而增大,同时受坝体内部不均匀沉降影响,各部位压应力有不同程度变化。溢洪道两侧与坝体接触部位,左侧882.0m高程处EFB1的最大接触土压力为148.79kPa,小于理论计算值,右侧最大接触土压力相对较小。(4)坝体内部变形符合土石坝规律,沉降量较大的坝0+128m断面、848.87高程处ES1-8,最大沉降量309.5mm,与填土厚度之比0.45%,施工期沉降不大。内部水平变形最大59.89mm,左、右岸方向位移呈向主河床趋势。(5)溢洪道观测包括变形、应力应变等项目,各部位渗压水位、钢筋应力等变化正常,且与温度相关。但控制段锚杆应力计在浇筑完成后压应力持续增大,泄槽段陡坡1段0+080.00m断面基础以下10m处测点MY1-1变形量有增大趋势,需密切关注。截至2024年12月6日,水库共埋设各类监测仪器365支,完好率98.36%,数据准确可靠,满足蓄水条件。此外在坝顶、下游坝坡及右岸山体新增11个GNSS监测站,结合2个基准站实现毫米级实时位移监测,进一步保障水库安全。

结束语:大坝安全监测技术在水库建设中发挥着不可或缺的作用。从传统监测技术到智能监测技术的发展,实现了对大坝安全风险的更精准把控。红山水库的实践表明,根据水库特点和不同建设运行阶段,合理组合应用各类监测技术,能够有效监测大坝安全状况。但随着环境变化和技术进步,大坝安全监测仍面临新挑战。未来需持续创新监测技术,加强多技术融合,完善监测体系,以更好地保障水库大坝安全,推动水利工程建设高质量发展。

参考文献

- [1]陈声震.水库大坝安全监测技术及其应用[J].水上安全,2024(20):10-12.
- [2]姜新元.大坝坝体变形监测技术及其应用分析[J].中国科技纵横,2019(5):144-145.
- [3]白凤玲,陈域,吴建森.无线自组网在大坝安全监测系统中的应用[J].四川水利,2023,44(5):53-55.
- [4]邓鹏.物联网技术在小水库大坝安全监测中的应用现状[J].中国宽带,2025,21(4):95-97.