

水库诱发地震工程地质研究

王 强

湖北省人才发展集团有限公司 湖北 武汉 430000

摘要: 随着全球水利工程建设规模扩大, 水库诱发地震对工程安全及区域地质稳定性的影响日益凸显。本文聚焦水库诱发地震工程地质研究, 系统剖析其地质环境基础、成因机理、勘察监测技术及风险评估方法。研究表明, 区域地质构造、地层岩性、水文地质条件及新构造运动共同构成地震孕育的地质背景, 孔隙水压力驱动、构造应力调整和岩体结构失稳是核心诱发机制。通过区域地质调查、地球物理勘探、钻探等勘察技术, 结合地震、水文及形变监测手段, 可获取地质体动态信息。综合运用定性、定量及多源数据融合的综合评估方法, 能有效量化地震风险。

关键词: 水库诱发地震工程; 成因机理; 勘察与监测技术

引言

水库诱发地震因水库蓄水改变地质体应力状态与水文条件而触发, 具有成因复杂、预测难度大等特点。现有研究虽在机理分析与技术应用上取得进展, 但多因素耦合作用下的地震孕育过程仍需深入探索。本文从地质环境基础出发, 系统梳理成因机制, 整合工程地质勘察与监测技术, 并优化风险评估方法, 旨在完善水库诱发地震研究体系, 提升灾害防控的科学性与精准性。

1 水库诱发地震的地质环境基础

水库诱发地震的发生与特定地质环境紧密相关, 其地质环境基础主要涵盖以下区域地质构造、地层岩性、水文地质条件及新构造运动等方面。(1) 区域地质构造背景。活动断裂带的分布与性质直接影响地震发生的可能性。处于板块交界区或活动断裂带附近的水库, 蓄水后库水压力变化易触发断层活动。区域地壳应力场特征决定了岩体初始应力状态, 应力集中区域在蓄水后更易发生应力调整, 增加地震风险。(2) 库区地层岩性组合。可溶性碳酸盐岩分布区, 库水易沿裂隙渗透形成溶蚀通道, 导致岩体结构失稳, 引发岩溶塌陷型地震; 而脆性火成岩、变质岩等岩体, 在库水压力作用下, 岩石内部微裂隙易扩展贯通, 增加岩体破裂风险。不同岩性的力学性质差异, 决定了其在蓄水荷载下的变形与破坏模式, 从而影响地震诱发机制。(3) 水文地质条件。含水层的分布、渗透性及地下水径流模式, 决定了库水渗透的速度与范围。当库区存在强透水层时, 库水快速渗入深部岩体, 导致孔隙水压力升高, 有效应力降低, 断层抗剪强度减小。地下水与库水的水力联系改变, 会引发地下水场调整, 促使岩体应力重分布, 增加地震发生概率。(4) 新构造运动特征。新构造运动强烈的地区, 地壳处于不稳定状态, 本身就具备较高的地震背景

[1]。水库蓄水作为外部荷载, 会进一步打破地壳应力平衡, 使潜在的地震危险被激发。

2 水库诱发地震的成因机理

水库诱发地震的发生源于地质体在蓄水影响下应力-应变状态的改变, 其成因机理主要可归纳为孔隙水压力驱动、构造应力调整及岩体结构失稳三大类, 各机制相互作用, 共同影响地震的孕育与发生。(1) 孔隙水压力驱动机制。水库蓄水后, 库水通过岩体裂隙、断层破碎带等通道向深部渗透, 导致地下水位上升, 岩体孔隙水压力显著增加。根据有效应力原理, 孔隙水压力的升高会降低岩石颗粒间的有效应力, 进而减小断层的摩擦阻力。当孔隙水压力达到临界值时, 原本处于稳定状态的断层失去抗剪强度, 在构造应力或自重应力作用下发生滑动, 释放能量形成地震。该机制尤其适用于孔隙率较高、渗透性较好的岩体或断层带区域, 库水的快速渗透和孔隙水压力的快速累积, 是触发地震的直接动力。(2) 构造应力调整机制。区域构造应力场的存在使地壳岩体处于应力平衡状态, 水库蓄水后, 巨大的水体荷载如同外部应力施加于地壳表面, 打破了原有的应力平衡。水体荷载通过垂直传递使地壳产生向下的附加应力; 库水渗透导致岩体力学性质改变, 引发应力重分布。这种应力调整在活动断裂带或应力集中区域尤为显著, 当应力积累超过岩石的极限强度时, 岩体发生破裂或断层错动, 从而诱发地震。构造应力调整机制与区域地质构造背景密切相关, 断裂带的活动性和应力状态决定了地震发生的可能性与强度。(3) 岩体结构失稳机制。不同类型的岩体结构在库水作用下呈现不同的失稳模式。在可溶性碳酸盐岩分布区, 库水沿裂隙溶蚀形成溶洞, 随着溶洞不断扩大, 上覆岩体因重力作用发生塌陷, 引发塌陷型地震; 在松散堆积体或破碎岩体区域,

库水浸泡使岩体强度降低,加之水位波动产生的动水压力,易导致滑坡、崩塌等地质灾害,这些地质体的快速运动激发地震波,形成地震。岩体中的软弱夹层在库水作用下抗剪强度下降,也可能引发岩体滑动失稳,进而诱发地震^[2]。岩体结构失稳机制往往与特定的岩性和地质结构相关,其地震特征与构造地震存在明显差异。

3 工程地质勘察与监测技术

3.1 工程地质勘察技术

3.1.1 区域地质调查与遥感解译

区域地质调查是勘察的基础工作,需系统收集并分析区域地质图、地质资料,结合实地踏勘,全面梳理地层岩性、地质构造、新构造运动等信息。在调查过程中,运用地质填图技术,重点识别活动断裂带分布、褶皱形态及地层接触关系,以此明确库区地质环境的宏观特征。遥感解译借助卫星遥感影像,如Landsat系列卫星提供的多光谱数据,以及Sentinel系列卫星的高分辨率光学与雷达影像,同时结合航空遥感数据,通过光谱分析、图像增强、波段融合等技术,提取线性构造(断裂带)、环形构造(岩溶塌陷区)等地貌信息。高分辨率无人机遥感(UAV)则通过搭载光学相机、LiDAR设备,对重点区域进行精细化三维建模,基于点云数据与正射影像,识别潜在地质灾害隐患点,为后续勘察提供目标导向。利用InSAR(合成孔径雷达干涉测量)技术,还可对区域地表形变进行长时间序列监测,辅助判断构造活动性。

3.1.2 地球物理勘探技术

地震勘探包含反射波法与折射波法。反射波法利用人工震源,如炸药震源、可控震源激发地震波,地震波在地下传播过程中遇到波阻抗差异界面时发生反射,通过检波器接收反射波信号,经数据处理与成像技术,推断地层结构、岩性变化及断裂带位置。折射波法则基于地震波在不同介质中的折射现象,适用于探测浅层地层,通过分析折射波的到时与路径,获取基岩埋深、风化层厚度等信息。电磁法勘探中,大地电磁测深(MT)基于天然电磁场,通过测量不同频率的电磁场响应,利用反演算法获得地下电阻率分布,能够有效识别含水构造、岩溶洞穴及断层破碎带。可控源音频大地电磁法(CSAMT)则通过人工发射特定频率的电磁场,相比MT法可提高深部地质体探测精度,特别适用于复杂地形条件下的地质结构研究,能够清晰分辨深部地层的电性差异。重力与磁力勘探利用地球物理场的异常特征开展工作。重力勘探通过高精度重力仪测量地表重力异常,分析地下密度差异,从而识别隐伏构造、岩溶空洞、盐

丘等地质体。磁力勘探则利用岩石磁性差异,通过磁力仪探测地磁场异常,进而确定岩浆岩分布、断裂带走向,为区域地质构造研究提供辅助信息,在圈定火成岩侵入体、断层带位置等方面具有独特优势。

3.1.3 钻探与原位测试

钻探是获取地下岩芯样本的直接手段,依据勘察目的设计不同类型的钻孔,如取芯孔用于获取完整岩芯,开展岩性鉴定、岩石矿物成分分析;水文孔则用于研究地下水赋存状态。获取岩芯后,开展岩石力学试验,包括单轴抗压强度试验、三轴压缩试验、抗剪强度试验等,测定岩石物理力学参数。利用钻孔摄像技术,以高清图像观察孔壁裂隙发育情况、填充物特征等,结合电阻率测井、声波测井、自然伽马测井等测井数据,建立高精度的地层岩性和结构模型。原位测试技术包括静力触探(CPT)、标准贯入试验(SPT)、旁压试验(PMT)等。静力触探通过液压系统将探头匀速贯入土体,根据探头所受阻力测试土体力学性质,可快速获取土体的比贯入阻力、锥尖阻力等参数,用于划分土层、估算地基承载力。标准贯入试验利用重锤打击次数评估砂土密实度、粘性土稠度等,操作简便且具有广泛的工程应用基础。旁压试验则通过向旁压器充水膨胀,测试岩体或土体的应力-应变特性,能够获取原位条件下的变形模量、强度参数等。

3.2 工程地质监测技术

3.2.1 地震监测系统

微震监测网络通过布设高灵敏度地震仪,如宽频带地震计、短周期地震计,构建密集的台站网络,实时监测库区微震活动。采用网格搜索法、波形反演法等震源定位算法,结合地震波到时差与速度模型,精确确定震源位置。通过对微震活动的时空分布、震级-频度关系进行分析,捕捉地震活动增强趋势,判断库区地震活动性变化。强震监测系统在大坝、重要建筑物及潜在震源区安装强震仪,可记录强震发生时的加速度、速度和位移响应。强震仪具备高动态范围、宽频带响应特性,能够准确捕捉强震过程中的地震动参数,为抗震设计、地震危险性评估以及地震动衰减关系研究提供实测数据。

3.2.2 水文地质与地质力学监测

孔隙水压力监测在库岸、断层带及深部岩体中埋设振弦式、压阻式孔隙水压力计,实时监测库水渗透过程中孔隙水压力变化。通过长期连续监测,分析孔隙水压力与地震活动的相关性,当孔隙水压力达到临界值时,可预警孔隙水压力驱动型地震。地应力监测采用应力解除法、水压致裂法进行地应力原位测量,获取初始地应

力大小与方向。结合长期应力监测仪,如空心包体应力计、压磁应力计,跟踪蓄水过程中地应力场的动态变化,分析构造应力调整对地震诱发的影响,判断岩体应力状态的改变趋势。地下水位与渗流监测通过地下水监测井和渗压计,实时监测地下水位升降和渗流场变化。借助分布式光纤测温技术,还可监测地下水渗流路径。

3.2.3 形变监测技术

GPS与InSAR监测利用全球定位系统(GPS)基准站和流动站,通过载波相位差分技术,实时监测地表三维位移,监测精度可达毫米级。合成孔径雷达干涉测量(InSAR)通过卫星雷达数据获取大范围地表形变场,基于时序InSAR技术,如PS-InSAR、SBAS-InSAR,可实现对库岸滑坡、地面沉降等形变区域的长时间序列监测,获取毫米级至厘米级的形变量。光纤传感技术中的分布式光纤传感(DFOS)利用光纤中光信号的散射特性,实现对沿光纤路径的温度、应变变化的分布式监测。通过布里渊散射、拉曼散射等原理,可用于监测岩体裂隙扩展、管道渗漏等微小形变,具有监测距离长、抗电磁干扰、分布式测量等优势。倾斜仪与裂缝计在库岸、大坝及重要地质体表面安装高精度倾斜仪和裂缝计,实时监测局部倾斜和裂缝宽度变化。倾斜仪采用MEMS传感器或伺服加速度计,能够灵敏捕捉微小倾斜角度变化;裂缝计则通过电子位移计或光纤光栅传感器,精确测量裂缝宽度,及时捕捉潜在失稳体的变形趋势。

3.2.4 数据采集与分析平台

构建集成化数据采集与分析系统,通过物联网技术,采用5G、LoRa等通信方式,实现地震、水文、形变等多源数据的实时传输与存储。利用Oracle、SQLServer等数据库管理系统进行数据管理,建立标准化的数据存储结构与元数据标准。结合地理信息系统(GIS)技术,将监测数据与空间信息相结合,实现数据可视化与空间分析,直观展示监测数据的时空分布特征^[3]。采用机器学习算法,如支持向量机、神经网络、随机森林等,对监测数据进行特征提取和异常识别。

4 水库诱发地震的风险评估方法

水库诱发地震风险评估通过整合地质、工程与监测数据,量化地震发生可能性及危害程度,评估方法主要有以下三种:(1)定性评估基于地质环境条件,采用专家打分法或层次分析法(AHP),对区域断裂带活动性、岩性敏感性、水文地质脆弱性等要素分级,划分风险等级。(2)定量评估包含统计分析与数值模拟两类:前者利用历史地震与蓄水参数建立回归模型,预测未来地震概率;后者借助有限元、离散元等方法,模拟库水荷载下岩体应力-应变演化,评估断层失稳临界条件。(3)综合评估则融合多源数据,构建“孕震环境-诱发因素-监测响应”指标体系,结合模糊综合评价、贝叶斯网络等算法,实现风险动态评估。基于GIS平台集成空间分析功能,可直观呈现库区地震危险性分区,为工程规划与灾害防治提供决策支持^[4]。

结束语

本研究系统构建了水库诱发地震工程地质研究框架,明确了地质环境各要素对地震诱发的控制作用,揭示了多机制协同的诱发规律,创新集成了多尺度勘察监测技术与风险评估方法。但复杂地质条件下多因素耦合的定量关系、地震前兆信息的精准捕捉等问题仍需突破。未来研究可深化多场耦合数值模拟,探索人工智能与大数据在地震预测中的应用,加强长期监测数据积累与共享,为水利工程安全运行与区域地质灾害防治提供更坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]李建强,杨海燕.水库诱发地震的成因及评价方法[J].水利水电工程设计,2022,41(3):40-43.
- [2]孙翊博,李承中.地质灾害强发育区某水库成库条件分析[J].科技创新与应用,2025,15(6):77-80.
- [3]栗梓豪.水库诱发地震多方法研究——以紫坪铺水库为例[J].华北自然资源,2025(2):68-73.
- [4]夏金梧.三峡工程水库诱发地震研究概况[J].水利水电快报,2020,41(1):28-35.