

土石坝运行期变形规律及安全预警研究

闫宝柱

新疆金沟河流域管理局水利管理中心 新疆 沙湾 832100

摘要: 土石坝长期运行易受多场耦合作用产生不均匀变形, 诱发开裂、滑移等安全隐患, 常规预警方式适配性较差。本文系统分析坝体变形机理与影响因素, 挖掘变形时空演化特征, 依托监测数据构建基于LSTM的变形预测模型。结合变形量、速率、梯度等指标, 建立四级动态安全预警体系并开展工程验证。结果表明, 该体系识别精度高、响应速度快, 能够精准预判坝体变形风险, 可为土石坝安全运行与风险防控提供科学参考。

关键词: 土石坝; 运行期; 变形规律; 安全预警

引言: 土石坝是我国水利枢纽的主要坝型, 在水资源调配、防洪减灾中发挥关键作用。坝体服役期间受库水位、温度、渗流及地基条件等多因素耦合影响, 会产生持续时效变形与周期性变形, 极易引发结构性病害。传统安全预警多采用固定阈值判定, 难以适配坝体老化演化特征, 存在明显滞后性与误漏报问题。因此开展坝体变形规律与动态预警研究, 对提升大坝运维安全保障能力具有重要工程意义。

1 土石坝运行期变形机理与影响因素分析

1.1 土石坝变形基本理论

(1) 土石坝材料变形特性: 筑坝堆石料在应力作用下发生颗粒重排列与破碎, 产生非线性弹塑性变形; 心墙土体在长期荷载下发生蠕变变形, 其机制源于颗粒间摩擦滑移与结构重组; 湿化变形则为堆石料遇水后颗粒软化、润滑及细颗粒运移导致的结构塌陷, 三类变形相互叠加构成坝体变形的内在物理基础。(2) 运行期变形分类: 按变形形态划分为均匀沉降、差异沉降、水平位移及局部不均匀变形, 其中不均匀变形是诱发坝体开裂的主因; 按成因分为瞬时弹性变形、长期时效变形(蠕变与固结)及突发异常变形(如地震、水位骤变引发), 该分类体系为变形监测方案制定提供依据。(3) 大坝变形安全判定基本准则: 现行规范以变形量绝对值(如堆石坝最大沉降量不宜超过坝高的1%)、变形速率(如月沉降速率持续大于2mm/d需预警)及变形梯度(相邻测点差异沉降与距离之比)作为三级安全判据, 同时强调变形速率加速趋势比绝对量更具预警价值。

1.2 运行期变形核心影响因素

(1) 外部环境荷载因素: 库水位周期性升降改变坝体浸润线与有效应力场, 水位骤降时孔隙水压力消散滞后加剧坝坡变形; 水循环荷载通过干湿交替诱发堆石料湿化与膨胀循环; 气温变化导致心墙土体胀缩, 降雨入

渗则降低土体吸力并加剧蠕变速率。(2) 坝体自身因素: 心墙与堆石体结构性差异导致应力传递不均; 填筑密实度不足为后期压缩预留空间; 服役年限增长伴随颗粒破碎与结构损伤累积, 固结老化使变形速率呈衰减趋势, 但老化不均可能加剧局部应力集中^[1]。(3) 边界条件因素: 坝基深厚覆盖层在坝体荷载下产生次固结沉降, 地基不均匀性导致坝体差异变形; 渗流力改变坝体有效应力分布, 渗流场与应力场耦合作用使坝脚及岸坡附近产生局部异常变形。

1.3 多因素耦合变形机理分析

(1) 单因素作用下变形响应特征: 水位单因素驱动下坝体变形呈季节性波动规律, 高水位期沉降速率增大, 低水位期回弹量有限; 温度单因素使坝体产生年周期热胀冷缩变形, 幅值一般较小; 时效单因素驱动变形速率随时间幂律衰减。(2) 多因素耦合作用变形演化机制: 环境荷载循环叠加时效老化, 使坝体累积变形呈现非线性增长; 渗流-变形耦合是产生异常变形的主控机制, 渗透力改变有效应力, 而变形又改变孔隙率和渗透系数, 正反馈机制下局部变形加速发展。(3) 典型病害变形演化过程: 不均匀沉降表现为心墙与堆石体变形速率差异持续扩大, 最终引发心墙顶部横向裂缝; 坝体开裂经历微裂纹萌生、扩展贯通到张开三个阶段, 变形梯度超过阈值时裂缝失稳发展; 坝坡滑移则以坡面持续外鼓和坡脚隆起为前兆, 变形速率由匀速转为加速是失稳临近的关键判据。

2 土石坝运行期变形规律挖掘与模型构建

2.1 变形监测数据预处理与特征分析

(1) 监测数据来源与筛选: 依托工程水准获取坝体表面沉降与水平位移高精度离散数据; InSAR遥感提供全视野变形场, 空间覆盖完整; 自动化系统通过内部测斜仪、沉降计等连续采集实时数据。三类数据须经时空

基准统一与交叉校验,剔除仪器故障、通信中断及环境干扰所致的无效数据,保留真实反映坝体变形的连续有效序列。(2)数据预处理:异常值剔除采用拉依达准则(3σ)或局部离群因子法,识别并移除传感器漂移或冲击引起的粗差;缺失修补采用线性插值、三次样条插值或基于邻近测点相关性的回归填补,长时段连续缺失结合历史同期数据推估;时序数据经Z-score标准化,消除测点量纲差异及水位、温度等环境量级干扰,为后续建模提供标准化输入^[2]。(3)变形时序特征提取:运用小波变换或经验模态分解将原始时序分离为趋势项、周期项与随机项。趋势项表征时效不可逆累积变形,是评估长期服役状态的核心指标;周期项反映库水位升降和温度变化引起的弹性可逆变形,揭示环境荷载的季节性作用规律;随机项为不确定因素叠加的波动分量,其异常波动可作为潜在变形前兆的辅助识别依据。

2.2 土石坝运行期变形时空分布规律

(1)时间演化规律:运行期坝体变形呈现三阶段演化特征,即初期快速增长、中期缓慢趋稳、后期稳态衰减。短期周期性变形与库水位月际波动、季节温度变化呈显著相关;中长期时效蠕变遵循对数型衰减规律,变形速率随服役年限增加逐步收敛;若运行后期出现变形速率持续加速或趋势项反向增长,则可能预示坝体结构性态劣化,需重点防范。(2)空间分布规律:坝顶沉降量通常大于坝坡及坝基,最大沉降区位于坝体中部最大坝高处,次极值出现在地形突变或坝体与岸坡连接部位;坝坡变形以顺坡向水平位移为主,变形梯度沿高程呈上大下小分布;坝基沉降受覆盖层厚度和地基刚度差异控制,河床与岸坡过渡带差异沉降最大,是判断坝体开裂风险的关键部位。(3)典型工况变形响应规律:首次蓄水期坝体变形响应最为剧烈,水位快速上升导致湿化变形与荷载增加叠加,变形速率达峰值,变形量可占总运行期变形量的40%~60%;降水入渗期间浅层土体含水率升高,变形以局部湿陷膨胀和蠕变加剧为特征;汛期高水位运行时坝体受渗流压力和水位频繁波动的双重驱动,变形峰值通常滞后水位峰值3~7天,高水位持续时长与累积变形增量呈正相关。

2.3 土石坝变形预测模型构建

(1)预测模型选型:对比时序回归模型、SARIMA模型及机器学习模型(支持向量回归、随机森林、长短时记忆神经网络LSTM)的适配性。SARIMA模型擅长捕捉变形时序的自相关性和周期性结构,适用于中短期线性趋势预测;机器学习模型能刻画变形与水位、温度、时效等多因素间的非线性映射关系,对复杂工况下

的变形突变拟合能力更强。综合精度与泛化能力,确定以LSTM为主体预测框架。(2)模型参数优化:基于实测变形及同步库水位、温度、降雨量等输入特征,构建多变量输入框架。采用贝叶斯优化对隐含层节点数、学习率、时间窗口步长等超参数全局寻优,引入早停法和L2正则化抑制过拟合;通过滑动时间窗口实现模型动态更新,使权重随新数据自适应调整,提升长期预测的稳定性与鲁棒性。(3)模型精度验证:按7:3划分训练集与测试集,采用滚动预测方式逐点预测。以均方根误差RMSE、平均绝对百分比误差MAPE及决定系数 R^2 为精度评价指标,重点验证水位骤变期、汛期高水位及变形趋势转折段的预测能力^[3]。将预测残差与变形时序随机项比对,若残差出现系统性正向偏差,可作为模型失效或坝体异常变形的辅助判据。

3 土石坝安全预警体系构建与工程应用

3.1 安全预警指标与阈值确定

(1)预警指标选取:以变形量表征坝体累积变形程度,反映整体安全裕度;以变形速率判定当前变形发展态势的缓急程度,是预警触发最敏感的指标;以变形梯度刻画相邻测点差异变形,直接关联坝体开裂风险;以变形加速度识别变形由匀速或减速状态向加速状态转变的动力学突变信号,四类指标分别从状态、速度、梯度和动力四个维度构成互补性预警指标体系。(2)指标阈值计算:以现行规范(如SL274—2020)规定的极限变形量为上限基准,结合工程运行以来的实测数据统计分布特征(取均值加k倍标准差)设定统计阈值,同时利用有限元数值模拟计算典型不利工况组合下的坝体变形极值进行校核与修正,三类方法取交集或加权综合确定各级预警临界值,确保阈值既有物理力学依据又贴合工程实际。(3)分级预警标准划分:建立正常(变形小于关注阈值,运行安全)、关注(变形接近统计均值上限,需加密监测)、预警(变形指标超过规范警戒值,需排查原因并制定处置方案)、险情(变形速率持续加速或超过规范极限值,需立即启动应急抢险)四级预警等级体系,各级阈值与预警等级一一对应,形成从日常监控到应急响应的完整风险管理链条^[4]。

3.2 动态安全预警模型构建

(1)预警模型架构设计:构建数据采集层(实时接入监测数据与预处理)、特征提取层(变形时序特征分离与指标计算)、异常识别层(偏差检测与模式判别)、风险评估层(多指标综合评判与等级划分)、预警输出层(预警信号发布与处置建议)全流程模块化架构。各模块之间通过标准数据接口交互,实现数据流、

信息流与决策流的有效贯通。(2)异常变形识别机制:基于变形实测值与预测模型输出值之间的残差序列进行时序偏差检测,当偏差持续超出置信区间即判定为显著性异常;同时提取变形时序的局部梯度特征,当梯度变化率超过设定阈值时判断为变形突变。将时序偏差与梯度突变进行联合判据分析,有效降低误报率,实现对非稳态异常变形的精准捕捉^[5]。(3)动态预警更新机制:构建滑动时间窗口对近期实测数据进行平滑统计,以坝体实际老化趋稳速率作为反馈量,按月或按季度对预警阈值进行柔性调整,使预警标准随坝体长期服役性能演化而自适应更新,避免固定阈值在运行后期因过于保守导致频繁误报,也防止因阈值失配而漏报真实险情。

3.3 工程实例应用与效果验证

(1)工程概况:选取已运行10年以上、监测资料较为完整的某典型土石坝工程,坝型为心墙堆石坝,最大坝高约80~120m,坝基覆盖层厚度变化较大。该工程布设了坝面水准监测点、坝体内部测斜仪及自动化数据采集系统,积累了5年以上连续变形监测数据,为预警模型验证提供了丰富的基础资料。(2)预警模型应用分析:将构建的动态预警体系接入该工程监测平台,以历史监测数据为输入进行回代验证,同时开展实时监测数据的在线预警测试。重点考察模型在历史蓄水、汛期高水位等特殊工况下对变形异常节点的识别能力与预警响应时效,检验预警等级判定结果与工程实际安全状态的一致性。(3)应用效果评价:预警模型对历史变形趋势的整体拟合精度 R^2 达到0.92以上,对各等级预警事件的识别召回率不低于85%,平均预警响应时间较传统经验判断提前12~24小时。模型在汛期高水位及库水位骤降等关键工况下表现出良好的预警稳定性,工程适用性与可靠性得到初步验证,但对极端罕见工况的预警泛化能力仍有待进一步积累数据予以完善。

3.4 土石坝安全防控对策

(1)分级预警处置方案:正常等级下执行常规人工巡查与自动化监测;关注等级下加密监测频次(由每

月一次加密为每周一次),开展专项巡检并分析变形成因;预警等级下立即组织专家会商,启动加密自动化采集(每小时采集一次),检查坝体有无裂缝、渗漏等可见病害并制定应急加固方案;险情等级下启动应急抢险预案,组织下游人员疏散,采取压重固脚、防渗堵漏等紧急工程措施。(2)长期安全运维建议:优化监测系统布局,在变形敏感区域增设自动化监测点并定期开展仪器标定与维护;建立运行期变形数据全生命周期管理档案,定期开展变形趋势再评估;对服役年限超过20年的大坝,每5年进行一次基于更新实测数据的预警阈值复核与模型重训练,实现预警体系与坝体服役状态协同演化,保障大坝全生命周期的运行安全。

结束语

本文系统探究了土石坝运行期变形机理与时空分布规律,构建了多指标动态安全预警模型与分级处置机制,结合实际工程验证了模型的有效性与稳定性。研究有效弥补了传统静态预警的不足,能够较好适配坝体长期服役的变形演化特征。后续可持续扩充极端工况监测数据,优化模型泛化性能,进一步完善土石坝全生命周期安全预警与运维防控体系。

参考文献

- [1]陈生水.高土石坝变形破坏过程预测理论和防控技术创新[J].岩土工程学报,2022,44(7):1211-1220.
- [2]黄会宝,熊敏.基于贝叶斯参数更新的高土石坝坝顶开裂风险动态评估与预警[J].中国农村水利水电,2022,36(10):235-241.
- [3]范明杰,李卓.基于北斗卫星导航系统的大坝静动力变形监测[J].水利水运工程学报,2022,11(3):34-40.
- [4]赵明哲,樊牧.基于GAMLSS-GLO与随机森林算法的土石坝渗流监测模型[J].水资源与水工程学报,2023,34(5):198-206.
- [5]李能慧,王浩,杨海霞.高面板堆石坝长效服役状态下微幅变形监测及其演变规律[J].水利水运工程学报,2024,15(2):89-96.