

Construction of deformation monitoring and stability warning model for plain reservoir dam

Yanqing Ma¹ Ruizhang Wang¹ Weihai Li¹ Changhao Chen² Zhenyu Wang²

1. China Construction Eighth Bureau Second Construction Co., Ltd., Jinan, Shandong, 251400, China

2. Construction Eighth Bureau Southwest Construction Engineering Co., Ltd., Jinan, Shandong, 251400, China

Abstract

This study begins by investigating the deformation mechanisms of cofferdam structures, establishing a multi-source monitoring system that integrates surface, internal, seepage, and environmental quantity measurements. The paper details automated data acquisition and preprocessing workflows. For deformation analysis, we propose a pattern recognition method utilizing spatiotemporal distribution features and correlation analysis. Stability evaluation combines limit equilibrium methods with finite element numerical simulations for quantitative assessment. A comprehensive framework comprising four layers—data acquisition, analysis, modeling, and early warning—is designed. The paper elaborates on a multi-level early-warning indicator system, threshold determination methodologies, and core algorithms including statistical analysis, machine learning, and hybrid warning systems. These innovations aim to deliver real-time, accurate, and practical stability monitoring for cofferdam safety, providing scientific decision-making support for plain reservoir management.

Keywords

plain reservoir; dam deformation; stability analysis

平原水库围坝变形监测及稳定性预警模型构建

马延青¹ 王瑞樟¹ 李维汉¹ 陈昶昊² 王振宇²

1. 中建八局第二建设有限公司, 中国·山东 济南 251400

2. 中建八局西南建设工程有限公司, 中国·四川 成都 610041

摘 要

研究首先从围坝变形机理出发, 建立了集表面、内部、渗流及环境量监测于一体的多源立体化监测体系, 并阐述了数据自动化采集与预处理流程; 进而, 在变形分析层面, 提出了基于时空分布特征与相关性分析的规律分析方法, 在稳定性评价层面, 综合运用极限平衡法与有限元数值模拟进行了定量评价; 最终, 设计了包含数据层、分析层、模型层与预警层的总体框架, 详细阐述了多层级预警指标体系、阈值设定方法以及统计、机器学习与混合预警等核心算法, 旨在实现围坝稳定性的实时、准确与实用性预警, 为平原水库的安全管理提供科学决策支持。

关键词

平原水库; 围坝变形; 稳定性分析

1 引言

平原水库作为重要的水利基础设施, 其围坝的长期安全与稳定运行直接关系到下游人民生命财产安全和区域经济的可持续发展。相较于山区水库, 平原水库围坝多建于软基之上, 其变形机理更为复杂, 受地质条件、水位骤降、渗流控制及施工质量等因素影响显著, 传统单一监测手段与经验判断已难以满足现代工程安全管理的要求。因此, 构建一套集先进监测技术、科学分析理论与智能预警模型于一体的综合体系, 实现对围坝变形行为的精准捕捉、稳定性状态的

客观评价以及潜在风险的超前预警, 已成为当前水利工程安全领域亟待解决的关键课题。本文旨在系统研究平原水库围坝变形监测、数据分析、稳定性评价与预警模型构建的理论与方法, 以形成一套科学、实用的技术方案, 提升水库安全管理的主动性与智能化水平。

2 平原水库围坝变形监测体系构建

2.1 围坝变形机理与监测需求分析

平原水库围坝变形监测体系的科学构建源于对围坝变形内在机理的认识以及由此产生的精准监测需要, 围坝变形不是单一的形变, 主要包括软基固结、坝体自重连续作用产生的竖向变形、库水推力、土压力引起的水平位移以及不均匀沉降或材料抗拉强度不足产生的裂缝等不同类型的形变,

【作者简介】马延青 (1992–), 男, 中国山东济南人, 本科, 助理工程师, 从事水利工程研究。

各种形变综合反应坝体的结构状况；影响稳定的因素非常复杂，地质条件决定着起始变形量大小；库水位骤降的反向透水力容易导致上坝坡失稳；渗流的作用时间久可能导致坝体内部被掏空或出现管涌；施工质量不好可能留下坝体内不均匀变形的隐患等。因此，从机理出发进行监测内容系统的覆盖面广于表面、内部分析；根据机理分析，测点要注重重点加强和依据布设等要求进行测点布设，利用测点所采集的信息进行综合分析，把整体控制和局部细测结合在一起，在准确掌握反映围坝实际工作状态安全性的基础上，为评价围坝的稳定性及作出预警提供可靠依据^[1]。

2.2 多源立体化监测技术方案设计

依据围坝变形机理认识和多源立体化监测技术方案，综合应用多种手段和技术从整体上把握围坝的状态。该方案综合应用了表面变形监测技术：GNSS 实时连续自动监测测点的绝对坐标位置，测量机器人精准监测测网的角度、距离，InSAR 对大面积的地表毫米级的变形趋势有可观测性，3D 激光扫描能够迅速获取坝体表面的高精度点云数据，描述坝体的整体形变趋势；探明坝体内的情况可以布设内部变形监测技术：使用测斜仪监测坝体深层水平位移；采用沉降仪监测坝体与坝基不同层面的沉降情况；通过应变计了解结构内应力应变状态，见图 1；渗流渗压监测技术是必需的，通过埋设渗压计测定坝体与坝基内孔隙水压力分布，用量水堰测定渗流量变化来判断渗流是否稳定；同时还需要进行环境量监测，通过持续监测库水位、降雨量及地下水位情况给变形提供重要的外荷载信息。最后，将各源头数据交叉校验，互为补充，形成一个从宏观到微观、从表层到内部、从力学响应到水力驱动的立体化监测网，为建立稳定性预警模型提供科学全面的基础数据保障。



(图 1：沉降仪观测分层沉降)

2.3 监测数据的自动化采集与预处理

通过多源监测数据的集成与传输方案，将分布在各监测点位的 GNSS 接收机、渗压计、测斜仪等智能传感器接入数据采集单元，并利用有线或无线通信网络组成物联网，实现数据的自动采集与远程实时传输至中央数据库，解决数据源的异构性和孤立性问题。原始数据不可避免地包含误

差，因此需进行严格的预处理，包括采用统计识别或模型算法进行粗差剔除，对测量机器人等网式观测数据进行平差处理以优化估值和精度评定，并对不同量纲和量级的物理量进行标准化方法处理，消除单位差异，为多源数据融合分析奠定基础。在此基础上，将清理后的数据按时间顺序组织，构建长期、等间隔的监测数据时间序列，并对其进行特征分析，如计算趋势项、周期项和残差项，识别变形与环境因素的响应规律与滞后效应，从而提取出反映坝体真实状态的特征信息，为后续的稳定性和预警模型提供高质量、结构化且富含规律的数据基础^[2]。

3 围坝变形分析与稳定性评价理论

3.1 基于监测数据的围坝变形规律分析方法

根据高精度的监测资料，通过把离散的监测数据转换成一定时空条件下坝体整体结构性态的信息，围绕着监测数据重点分析围坝变形的空间时程分布特性，采用等值线图的方法给出坝体表面各测点位移值的空间分布图，确定位移异常区；通过对坝轴线或坝横断面上的测点变形量和变形梯度的空间分布用剖面图表示出来，反映结构内部响应；通过以关键测点为对象的过程线图描述其在不同时间段内变形值的发展变化趋势，并刻画变形的大小、速率及稳定性情况。再根据以上分析进一步探究其变形和因素的相关性，在这里应用数理统计法定量研究变形量和库水位、时效等主要因素间的相互作用以及数学关系，例如建立变形—水位关系模型来探讨坝体对水力荷载的弹性响应，或者建立变形—时效关系模型以期将由土体蠕变、固结等因素引起的不可恢复的塑性变形部分从整体变形量中分离出来。

3.2 围坝稳定性定量评价方法

围坝稳定性的定量评价是预警模型建立的理论依据，方法上既要满足工程应用要求又要确保结果准确性，组成从宏观整体到微观机理多层次评价系统；基于极限平衡法的坝坡稳定性计算方法是一种工程应用最广的经典方法，在理论上，采用预设圆弧、复合等滑动面形式，利用静力平衡原理分析坝坡滑体滑面上抗滑力矩与滑动力矩，得出相应安全系数的大小，该法最大的优点是简单直观、计算方便快捷，适用于工程初步设计、常用工况下常规校核及快速评估场景；但由于它的计算前提都是一些假定条件，实际上并未考虑坝体内部的应力应变和复杂的边界条件。对于这一缺陷可以通过渗流—应力耦合的有限元数值模拟方法加以解决，即通过建立能真实反应土体本构关系的数值模型，模拟库水位升降时坝体内的渗流场与应力场的变化过程，能精确计算出坝体与地基的位移和应力场分布情况以及潜在塑性区产生的和发展过程，从机理层面对稳定性进行更深层次的认识。因此，为了使不同的成果获得直接对比效果，不论采用何种方式计算，最后计算所得的安全系数均应同对应规范中不同的建筑物等级或者工程情况下的评价标准相对照。严谨的量化对比

工作是把计算所得的结果转变为工程稳定性的判断的重要的中间步骤，并能之后的预警模型中各种等级的风险阈值提供科学的依据和规范的基础^[3]。

4 围坝稳定性预警模型构建

4.1 预警模型总体框架设计

建设围坝稳定性预警模型应有整体框架，以此模型实现稳定性的实时性、准确性以及实用性的基本目标和准则，并且基于上述分析可将该模型的逻辑结构分为 4 个层次：数据层，作为模型的基础，集成模型中用到的所有多源监测和环境量数据；分析层，进行实时的数据处理与时空特征分析来发现变形的趋势；模型层是模型的关键部分，利用经过训练好的算法对模型的状态进行判别、预测；最终预警层根据模型的输出值以及事先设置好的阈值进行对比判断得到预警结果并自动生成不同的等级预警信息发布，即各层模型需要依次完成自己的功能后才可以上报下一层次模型，具有从原始数据到预警决策的连续性和科学性，并在模型的基础上可以针对具体指标做出相应架构规划^[4]。

4.2 预警指标体系与阈值设定

围坝稳定性预警模型是否有效，要看能否建立起一套较为科学合理的多级预警指标体系，并且要确定好每级预警指标的阈值，以体现单点指标、整体指标、变化率指标、趋势指标等方面的预警指标特性。预警阈值的判定方法有根据行业规范的标准来判定、由理论计算得出限值、从历史监测数据中找到正常值范围并结合实际通过专家经验来进行修正等手段来确定。再把预警状态分正常、蓝色预警、黄色预警、橙色预警、红色预警这几个等级，表明坝体的风险是按照从正常到比较危险的过程来进行分级预警，并能够及时地作出正确的应对措施。

4.3 核心预警算法模型

预警模型本质就是算法，它决定着预警预测精度与可靠性。目前核心算法有三种，分别是：统计预测模型，统计学上用一定的数学方法确定变形量与各种影响因素之间的数量

关系，对于存在稳定规律的可预测的事件比较适用；机器学习预测模型是大数据时代流行的技术，可以从海量监测数据中发现较难辨别的复杂非线性特征和时序相关性，而 LSTM 可以较好的实现对于时间序列长时滞的捕捉；将表征物理机理的数据驱动模型与反映物理机理的机理模型进行有机结合，以期达到发挥机理与数据各自优点，进而弥补彼此缺陷的目的，可进一步提高模型的泛化能力及解释性，实现预警模型本质的内涵式发展。针对不同模型，可以按照明确的模型比选、性能评估指标等标准展开对比，然后选择最合适的优化算法应用于该工程预警中，保证模型是最优模型^[5]。

5 结语

综上所述，通过构建“监测体系 - 分析理论 - 预警模型”的完整技术链条，不仅详细阐述了从多源数据采集、处理到变形规律挖掘和稳定性定量评价的全过程，更创新性地设计了一套分层递进、指标多元、算法智能的稳定性预警模型框架。该研究将现代监测技术、数值模拟方法与数据驱动算法深度融合，实现了对围坝稳定性从静态评估到动态预测的跨越，为工程安全管理提供了从“事后分析”转向“事前预警”的理论依据与实践路径。未来，随着物联网、大数据和人工智能技术的不断发展，该模型框架有望通过引入数字孪生等技术进一步深化，实现更精准的仿真预测与智慧化管理。

参考文献

- [1] 李明.百色水库银屯副坝变形监测工作基点复建方案设计[J].广西水利水电,2025,(03):68-70+79.
- [2] 吴中波,木合甫力·阿不都热依木,元鹏鹏.高海拔恶劣场景的水库大坝安全监测系统研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(27):198-200.
- [3] 褚夫玉,张心怡,康建荣,等.InSAR在水利工程变形监测中的应用研究进展[J].水利水电快报,2025,46(09):85-91.
- [4] 钟益斌,陈意良,陈有琰,等.基于涪城一号雷达卫星和视觉测量技术的土石坝变形监测应用研究[J].测绘通报,2025,(S1):151-154.
- [5] 闫晓亮.某水库大坝变形监测系统改造升级方案的比选[J].山西水利科技,2025,(03):74-76.