

水库大坝渗流安全稳定分析研究

许安文 王专成

江苏筑宇工程技术有限公司 江苏 扬州 225000

摘要：水库大坝作为水利工程的核心设施，其渗流安全稳定状况直接关系到工程效益发挥与下游人民生命财产安全。本文围绕水库大坝渗流安全稳定问题展开系统研究。首先阐述渗流基本概念与原理，深入分析地质条件、水文气象、大坝结构材料及施工管理等因素对渗流安全的影响；接着详细介绍现场监测、数值模拟、模型试验、经验类比及无损探测分析等多种渗流安全稳定分析方法；最后提出优化设计、严控施工质量、完善监测预警及强化运行管理等保障措施。研究成果为科学评估水库大坝渗流安全状态、制定有效防范策略提供理论依据与实践指导，对保障水库安全运行、提升水利工程效益具有重要意义。

关键词：水库大坝；渗流安全；稳定分析；研究

引言：水库大坝作为水利工程的核心设施，其渗流安全直接关系到工程效益与人民生命财产安全。随着全球气候变化与水利工程规模扩大，大坝渗流引发的安全隐患日益凸显。渗流问题不仅受地质构造、水文条件等自然因素影响，还与大坝设计、施工及运行管理密切相关。当前，传统分析方法在应对复杂渗流工况时存在局限性，新兴技术虽为研究带来突破，但尚未形成系统的分析体系。因此，深入开展水库大坝渗流安全稳定分析研究，探索科学有效的评估方法与保障措施，对推动水利工程安全技术发展、维护区域经济社会稳定具有迫切的现实需求。

1 渗流的基本概念与原理

1.1 渗流定义及分类

渗流描述的是流体在土壤、岩石等多孔物质孔隙里流动的现象。在自然界，地下水在地下的含水层中缓缓移动；在工业生产里，石油在地下岩石的缝隙中慢慢运移，这些都属于渗流。从流体性质看，渗流可分为水的渗流、气体的渗流，还有水和气体等多种流体混合的渗流。按运动状态，若流体流动的速度、方向等要素不随时间变化，就是稳定渗流；若这些要素不断改变，就是非稳定渗流。从空间维度区分，渗流还能分为只在一个方向流动的一维渗流，在平面上流动的二维渗流，以及在空间中复杂流动的三维渗流。

1.2 渗流基本定律——达西定律

达西定律是渗流领域的基石，由法国工程师达西通过实验发现。这个定律指出，当流体在多孔介质中平稳流动时，单位时间内流过多孔介质的流体量，和流体流动的距离长短有关，距离越长，流量越小；同时，流量还和流体流过的横截面积、推动流体流动的“力量”

大小有关，面积越大、“力量”越大，流量就越大。这里衡量多孔介质透水能力的指标，和介质本身的孔隙结构、流体的特性相关。凭借达西定律，人们能计算渗流的流量，为坝堤防渗漏、水井出水量计算等工程设计提供了重要理论支持。

1.3 渗流场的基本特征

渗流场是指有渗流发生区域内，所有与渗流运动相关要素的集合。它具有几个明显特征：其一，渗流速度非常慢，因为流体要在曲折狭小的孔隙通道里穿行，导致其实际流速比肉眼宏观观察到的慢得多。其二，渗流情况受多孔介质影响很大，介质孔隙的大小、连接程度，决定了流体流动的路线和遇到的阻力。其三，渗流过程中存在压力变化，流体所处位置、受到的压力等因素形成水头，水头沿着流体流动方向逐渐降低，由此产生的水力梯度推动流体前进。其四，渗流场的状态复杂，流体可能是平稳的层流，也可能是混乱的紊流，不同区域的渗流特点各不相同，需要具体分析研究^[1]。

2 影响水库大坝渗流安全的因素

2.1 地质条件

地质条件是影响大坝渗流安全的基础因素。坝基和坝肩的地质构造、岩土体类型、节理裂隙发育程度等都会对渗流产生重要影响。例如，如果坝基存在软弱夹层、断层破碎带等不良地质体，这些部位往往成为渗流的通道，导致渗漏量增大，甚至可能引发渗透破坏。此外，两岸山体的岩性、风化程度等也会影响绕坝渗流的情况，若两岸山体透水性强，绕坝渗流可能会对大坝边坡稳定造成威胁。

2.2 水文气象条件

库水位的变化是影响大坝渗流的重要因素之一。库

水位的升降会导致坝体内外水头差的改变,从而影响渗流场分布。当库水位快速上升时,坝体迎水侧水头增大,渗流速度加快,可能导致坝体浸润线升高,增加坝坡滑动的风险;而库水位快速下降时,坝体内外水头差迅速增大,坝体内部的水来不及排出,可能产生较大的孔隙水压力,对坝坡稳定产生不利影响。此外,降雨也会增加大坝的渗流量,特别是对于土石坝,大量雨水渗入坝体,会使坝体含水量增加,抗剪强度降低,影响大坝的稳定。

2.3 大坝结构与材料特性

大坝的结构形式和材料特性对渗流安全有着直接的影响。不同类型的大坝,如均质土坝、心墙坝、面板堆石坝等,其渗流特性各不相同。均质土坝的渗透系数相对较为均匀,但防渗性能相对较差;心墙坝通过设置心墙防渗体来减少渗流量,心墙的防渗效果直接影响大坝的渗流安全;面板堆石坝依靠混凝土面板作为防渗结构,面板的质量和接缝处理对渗流控制至关重要。此外,大坝材料的颗粒级配、密实度等也会影响其渗透性能。材料颗粒级配不良、密实度不足会导致孔隙率增大,渗透系数升高,增加渗流风险。

2.4 施工质量与管理维护

施工质量是保证大坝渗流安全的关键环节。在施工过程中,如果防渗体施工质量不达标,如土坝心墙填筑不密实、混凝土面板存在裂缝等,都会为渗流提供通道,导致渗漏问题。此外,排水设施的施工质量也至关重要,排水体堵塞、反滤层失效等会影响排水效果,使坝体内积水无法及时排出,进而影响大坝的稳定。在大坝运行过程中,管理维护不善也会对渗流安全产生不利影响。例如,缺乏对大坝渗流情况的定期监测,不能及时发现渗漏隐患;对监测数据分析处理不当,无法准确判断大坝的渗流状态;对大坝的维护不及时,如坝体裂缝未及时修补、排水设施未定期清理等,都可能导致渗流问题逐渐恶化^[2]。

3 水库大坝渗流安全稳定分析方法

3.1 现场监测法

现场监测是获取大坝渗流信息最直接、最有效的方法。通过在大坝不同部位布置监测仪器,实时监测渗流量、浸润线、孔隙水压力等渗流要素的变化情况。渗流量监测通常采用量水堰、流速仪等设备,通过对渗流量的长期监测,可以了解大坝渗漏的发展趋势,判断是否存在异常渗漏。浸润线监测一般通过埋设测压管来实现,测压管可以反映坝体内不同深度处的水位情况,通过分析浸润线的变化,能够判断坝体防渗性能和渗流稳

定性。孔隙水压力监测则用于了解坝体内孔隙水压力的分布和变化,对于分析坝体在渗流作用下的应力状态和稳定性具有重要意义。通过对现场监测数据的整理和分析,可以及时发现大坝渗流存在的安全隐患,为大坝的安全运行提供依据。

3.2 数值模拟法

数值模拟法是利用计算机技术,通过建立大坝渗流数学模型,对大坝渗流场进行数值计算和分析的方法。常用的数值模拟方法有有限元法、有限差分法等。有限元法将大坝渗流区域离散为有限个单元,通过求解每个单元的渗流方程,得到整个渗流场的分布情况。该方法可以处理复杂的几何形状和边界条件,能够较为准确地模拟大坝在不同工况下的渗流特性。有限差分法则是将渗流微分方程离散为差分方程,通过求解差分方程得到渗流场的数值解。数值模拟法具有灵活性强、适用范围广等优点,可以模拟不同库水位、降雨等工况下大坝的渗流情况,预测渗流对大坝稳定的影响,为大坝的设计、加固和运行管理提供科学依据。

3.3 模型试验法

模型试验法是根据相似原理,制作大坝的物理模型,在模型上模拟实际大坝的渗流情况,通过观测模型中的渗流现象和参数,来研究大坝的渗流特性。模型试验可以分为定性模型试验和定量模型试验。定性模型试验主要用于观察渗流的基本现象,如渗流路径、渗透破坏形式等,通过直观的观察,对大坝的渗流安全状况进行初步判断。定量模型试验则可以精确测量渗流量、水头损失等参数,通过与实际大坝的对比分析,验证数值模拟结果的准确性,为大坝渗流安全分析提供更可靠的依据。模型试验法能够直观地展示渗流过程,对于一些复杂的大坝工程,模型试验可以弥补数值模拟和现场监测的不足,为渗流安全分析提供重要的补充。

3.4 经验类比法

经验类比法是借鉴国内外类似大坝工程的渗流安全经验和研究成果,对目标大坝的渗流安全状况进行分析评价的方法。通过对已建大坝的渗流监测数据、渗流破坏案例等进行总结分析,找出影响大坝渗流安全的主要因素和规律,将这些经验应用到目标大坝的分析中。例如,对于地质条件相似、结构形式相近的大坝,可以参考其渗流控制措施和运行管理经验,对目标大坝的渗流安全进行初步评估。经验类比法简单易行,但具有一定的局限性,因为每座大坝都有其独特性,完全依赖经验类比可能会导致分析结果不够准确,需要结合其他分析方法进行综合判断。

3.5 无损探测分析法

无损探测分析法借助先进的非侵入式检测技术,对水库大坝内部渗流状况进行可视化分析。该方法利用地质雷达、电阻率成像、光纤传感等技术,在不破坏坝体结构的前提下,探测大坝内部渗流通道、渗漏位置及渗透介质特性。电阻率成像技术则基于不同介质电阻率差异,构建大坝渗流区域的三维电阻率模型,直观展现渗流路径分布。光纤传感技术能够实时监测大坝内部温度、应变变化,结合渗流特性,精准判断渗流异常情况。无损探测分析法具有高效、直观、不干扰大坝运行等优势,可有效弥补传统方法在隐蔽性渗流问题检测上的不足,为大坝渗流安全评估提供可靠数据支持^[3]。

4 保障水库大坝渗流安全的措施

4.1 优化大坝设计

在大坝设计阶段,应充分考虑地质条件、水文气象条件等因素,合理选择大坝的结构形式和防渗排水措施。对于地质条件较差的坝基,应进行详细的地质勘察,采取有效的地基处理措施,如固结灌浆、帷幕灌浆等,提高坝基的防渗性能。在设计防渗体时,应根据坝体材料和运行要求,合理确定防渗体的尺寸、材料和施工质量标准。例如,土坝心墙的厚度、高度以及防渗土料的渗透系数等参数应满足防渗要求;混凝土面板堆石坝的面板厚度、配筋以及接缝处理应保证面板的防渗效果。同时,要合理设计排水系统,确保坝体内的渗水能够及时排出,降低坝体内的孔隙水压力,提高坝坡稳定性。

4.2 加强施工质量控制

施工质量是保证大坝渗流安全的关键。在施工过程中,应严格按照设计要求和施工规范进行操作,加强对防渗体、排水设施等关键部位的施工质量控制。对于土坝心墙填筑,要控制好土料的含水量、压实度等指标,确保心墙填筑密实;混凝土面板施工时,要保证面板的平整度、厚度和混凝土强度,做好面板接缝的止水处理。排水设施施工时,要确保排水体畅通,反滤层材料级配合理,防止排水体堵塞和反滤层失效。此外,要加强对施工过程的监督和检验,及时发现并处理施工中出现的的质量问题,确保大坝施工质量符合要求。

4.3 完善监测与预警系统

建立完善的大坝渗流监测与预警系统是保障大坝渗流安全的重要手段。应根据大坝的特点和运行要求,合

理布置监测断面和监测点,确保能够全面、准确地监测大坝的渗流情况。监测设备应选用精度高、可靠性好的产品,并定期进行校准和维护,保证监测数据的准确性。同时,要建立监测数据自动采集、传输和分析系统,实现对大坝渗流情况的实时监测和动态分析。当监测数据出现异常变化时,能够及时发出预警信号,为采取应急措施提供时间保障。此外,要加强对监测数据的长期分析和研究,总结大坝渗流变化规律,为大坝的安全运行和管理提供科学依据。

4.4 强化运行管理与维护

加强大坝的运行管理与维护是保障大坝渗流安全的长期任务。应建立健全大坝运行管理制度,明确各部门和人员的职责,规范大坝的运行操作。在库水位调度方面,要根据水库的防洪、兴利要求和大坝的安全状况,合理控制库水位的变化速度和幅度,避免库水位快速升降对大坝渗流和稳定造成不利影响。同时,要定期对大坝进行检查和维护,及时发现并处理坝体裂缝、渗漏等病害。对于排水设施,要定期进行清理和疏通,确保排水畅通^[4]。

结束语

研究整合现场监测、数值模拟等多类分析方法,系统剖析水库大坝渗流安全稳定问题,明确地质、水文等影响因素及演变规律,所提优化设计、完善监测等保障措施具备实践指导价值。但随着高坝大库建设加速,极端工况频发,多场耦合机理研究尚浅,复杂地质与气候条件下的适应性分析也有待加强。后续应加快人工智能、数字孪生技术与渗流研究融合,构建动态评估体系,实现全流程精细化管理,提升水库大坝渗流安全防控水平。

参考文献

- [1]江铤斌.五华县岩前水库大坝稳定性分析及加固设计[J].陕西水利,2021(09):180-183.
- [2]王志江.上蒋水库大坝除险加固工程防渗效果分析[J].黑龙江水利科技,2021,49(04):89-92.
- [3]胡建平.刘口水库大坝加固设计与稳定性分析[J].河南水利与南水北调,2021,50(04):59-61.
- [4]杨鸿宇.风岩水库工程稳定安全复核及除险加固设计[J].河南科技,2019,40(10):51-53.