

# 水库大坝稳定性分析与加固设计

李大鹏

济源产城融合示范区河湖事务中心 河南 济源 459000

**摘要:** 水库大坝稳定性分析是确保水利工程安全运行的关键,需综合考虑坝体结构、地质条件、水文特征等多种因素。通过分析坝体应力变形、地质构造及水文影响,评估大坝稳定性状态。针对存在的安全隐患,如裂缝、渗流等,进行加固设计,采取混凝土加固、防渗处理等措施。通过加固设计,旨在提升大坝抗灾能力,确保水库正常运行和下游安全。

**关键词:** 水库大坝;稳定性分析;加固设计

引言: 水库大坝作为重要的水利工程,其稳定性直接关系到人民生命财产安全和社会经济发展。随着运行年限的增长,大坝可能面临材料老化、结构损伤等问题,影响其稳定性。因此,进行大坝稳定性分析,及时发现潜在安全隐患,并采取科学的加固设计措施,是确保大坝安全运行的必要条件。本研究旨在探讨有效的分析方法与加固策略,为大坝安全管理提供科学依据。

## 1 水库大坝稳定性分析方法

### 1.1 静力分析

静力分析是评估水库大坝在静荷载作用下稳定性的基础方法。它主要考虑大坝在自重、水压力、扬压力等静荷载作用下的应力分布和变形情况。(1)库伦-莫尔法:这是一种基于滑动面概念的极限平衡分析方法。它考虑了土体的抗剪强度参数,通过计算滑动面上的抗滑力矩与滑动力矩的比值来评估大坝的抗滑稳定性。该方法适用于非均质坝或土石坝的稳定性分析。(2)瑞典条分法:也是一种极限平衡分析方法,它将坝体划分为若干垂直条块,并假设各条块间的作用力方向平行于滑动面。通过计算各条块的滑动力和抗滑力来评估大坝的整体稳定性。这种方法相对简单,但忽略了条块间的相互作用。(3)简化毕肖普法:这是一种简化的极限平衡分析方法,适用于均质坝或具有均匀物理性质的坝体。它假设大坝沿某一潜在滑动面滑动,并计算该滑动面上的抗滑安全系数。该方法计算简便,但在复杂地质条件下可能不够准确。

### 1.2 动力分析

动力分析主要考虑水库大坝在地震、波浪等动态荷载作用下的响应和稳定性。(1)时程分析法:这是一种详细的动力分析方法,它考虑了地震波的时程特性,通过数值解的方法求解坝体在地震过程中的加速度、位移和内力等响应。该方法可以提供大坝在地震过程中的详

细动态信息,对于评估大坝在地震下的安全性具有重要意义。(2)反应谱分析法:该方法基于地震反应谱理论,将地震波简化为一系列不同频率的简谐振动,并计算坝体在这些简谐振动下的响应。通过比较坝体的动力特性和地震反应谱,可以评估大坝在地震作用下的安全性。反应谱分析法相对简便,但在处理复杂非线性问题时可能不够准确。

### 1.3 数值分析

随着计算机技术的发展,数值分析方法在水库大坝稳定性分析中得到了广泛应用。(1)有限元法:通过离散化坝体结构,使用数值方法求解力学方程,得到坝体的应力、变形等结果。有限元法能够模拟复杂的地质条件和非线性问题,为大坝设计和施工提供重要依据。(2)边界元法:适用于流体-结构相互作用问题,如大坝水动力分析。边界元法通过求解边界上的积分方程来得到坝体的应力、变形等结果,对于评估大坝在水压力作用下的稳定性具有重要意义。

## 2 混凝土水库大坝稳定性分析实例

### 2.1 工程概况

我们以混凝土拱坝为例,探讨其工程概况。我国在六七十年代大量修建拱坝,截至1985年底,全国已建坝高15米以上的拱坝总数超过800座,占全球拱坝总数的四分之一。其中,王屋山水库大坝位于河南省济源市西北部,矗立于黄河中游北岸支流铁山河上游。该大坝始建于上世纪70年代,受限于当时的技术条件,其施工工艺相对粗糙,工程标准较低,且配套设施不完善。经过60多年的运行,大坝多处出现渗流问题,坝址山体也风化剥落,这些问题对水库大坝的稳定性构成了严重威胁。

### 2.2 稳定性分析过程

#### 2.2.1 静力、动力和极限平衡分析过程

(1)静力分析:首先,我们利用有限元分析软件,

建立了大坝的三维数值模型,考虑了坝体材料属性(如弹性模量、泊松比、密度等)、几何形状、边界条件及作用在大坝上的各种静荷载(包括自重、水压力、扬压力、温度应力等)。通过模拟大坝在正常运行水位下的受力状态,得到了坝体内部的应力分布图,特别是关注坝踵、坝趾等关键部位的应力集中情况。(2)动力分析:为了评估大坝在地震作用下的响应,我们采用了地震反应谱分析方法。基于历史地震数据和大坝所在地区的地震动参数,设定了多个地震加速度时程,输入到有限元模型中,计算大坝的动力反应,包括位移、加速度、动应力等。此外,还考虑了地震波在不同介质中的传播效应,以及土壤-结构相互作用对大坝动力响应的影响<sup>[1]</sup>。(3)极限平衡分析:采用简化的条分法,将大坝划分为若干垂直条块,考虑滑动面上的抗剪强度和正应力分布,通过迭代计算确定大坝沿潜在滑动面的最小安全系数。这一步骤中,特别关注了基础岩石的力学性质、接触面的摩擦系数以及地下水位变化对滑动稳定性的影响。

#### 2.2.2 分析过程中考虑的主要因素和假设条件

在分析过程中,我们充分考虑了大坝材料的老化、裂缝发展、地下水渗透压变化、温度变化引起的热应力、以及可能的地震活动等因素。同时,为了简化模型和提高计算效率,做了一些必要的假设,如假定坝体材料是均质的、各向同性的;忽略了裂缝对整体刚度的非线性影响;假设地震波的传播是线弹性的等。

#### 2.3 分析结果及讨论

##### 2.3.1 展示分析结果

静力分析结果显示,大坝在正常水位下,坝体内部应力分布基本合理,最大主拉应力未超过混凝土抗拉强度设计值,但在坝踵附近出现了局部应力集中现象。动力分析揭示,在设定的地震加速度作用下,大坝顶部产生了较大的水平位移,虽然未超过允许值,但表明了大坝在极端动力荷载下的脆弱性。极限平衡分析得出的最小安全系数为1.35,略高于设计规范要求的最小限值,但考虑到长期运行中的潜在退化,这一安全裕度值得进一步关注<sup>[2]</sup>。

##### 2.3.2 分析结果对大坝稳定性的影响及可能存在的问题

静力分析结果提示我们,尽管大坝整体结构安全,但局部区域的应力集中可能成为未来裂缝扩展的起点,需要定期监测和维护。动力分析揭示了大坝在地震作用下的敏感性,提示应加强抗震设计和抗震加固措施。极限平衡分析虽然显示大坝当前处于安全状态,但安全系

数的边缘性提醒我们,应考虑未来可能的荷载增加(如气候变化导致的极端水位事件)和坝体材料老化带来的挑战。因此,建议实施更加细致的坝体健康监测计划,以及考虑采用先进的加固技术,如预应力锚固系统、高性能混凝土修补等,以提高大坝的整体稳定性和延长其使用寿命。

### 3 混凝土水库大坝加固设计

#### 3.1 加固设计原则

##### 3.1.1 基本原则与要求

混凝土水库大坝加固设计需遵循以下原则:(1)安全优先。以安全鉴定结论为依据,针对坝体渗漏、结构裂缝、防洪能力不足等病险问题制定措施,确保加固后防洪能力、渗流稳定性、抗震性能等满足规范要求。(2)因地制宜。结合大坝实际地质条件、病害类型及施工条件,选择经济合理、技术成熟的加固技术,例如对于深层裂缝采用注浆补强,对渗漏问题采用截渗墙或高压喷浆。(3)系统性与整体性。兼顾坝体、坝基、泄水建筑物的协同加固,避免局部处理导致新的薄弱环节。(4)可持续性。优先利用原有结构与材料,减少资源浪费,同时提升智能化监测能力。

##### 3.1.2 主要方法与手段

常用加固方法包括:结构补强。如预应力锚固、粘贴钢板或碳纤维布,提升坝体抗拉、抗剪能力;防渗处理。采用混凝土截渗墙、高压喷射灌浆或外贴玻璃钢防渗层,降低渗漏风险;基础加固。通过灌浆、锚杆等增强坝基承载力和抗冲刷能力;材料改性。对老化混凝土进行表面封闭或注入环氧树脂修复<sup>[3]</sup>。

#### 3.2 加固设计方案

##### 3.2.1 针对性方案制定

基于大坝稳定性分析结果,典型加固方案包括:渗漏治理:采用低压速凝灌浆法封闭裂缝,或设置水泥土截渗墙阻断渗流路径;结构补强:对坝体薄弱部位实施预应力锚固(如锚索张力达1000kN以上),或在迎水面粘贴钢板(厚度8-12mm)以增强抗剪性能;抗震加固:增设混凝土抗震墙或土工格栅加筋层,提升坝体整体性。

##### 3.2.2 关键技术措施

(1)预应力锚固:适用于坝体抗滑稳定性不足的情况,通过锚索将坝体与基岩锚固,锚固深度需穿透潜在滑动面;(2)外贴玻璃钢加固:在坝面铺设玻璃纤维增强复合材料(FRP),兼具防渗与抗冲刷功能,适用于表面风化严重区域;(3)灌浆技术:针对深层裂缝(如2m以上深度),采用劈裂式帷幕灌浆,灌浆压力控制在0.5-2.0MPa,确保浆液填充密实。

### 3.2.3 可行性分析

(1) 技术可行性: 截渗墙、高压喷浆等技术已在工程中广泛应用, 成熟度高; (2) 经济性: 以某均质土坝为例, 注浆加固成本约为混凝土截渗墙的60%, 且工期更短; (3) 环境影响: 优先选择低噪声、少污染的工艺, 如静压灌浆替代冲击钻孔。

### 3.3 加固施工与监测

#### 3.3.1 施工步骤与注意事项

(1) 施工流程: 准备阶段。清理坝面、设置施工导流设施; 主体施工。分序钻孔(孔距3m)、注浆(采用42.5级水泥浆), 或分段安装锚索/钢板; 收尾阶段。表面修复与防渗层施工, 如涂抹环氧树脂或铺设玻璃钢。

(2) 注意事项: 严格控制灌浆压力, 防止坝体抬升或开裂; 锚固施工需避开汛期, 确保锚索张拉精度(误差 $\leq 5\%$ ); 高温或低温环境下采取混凝土养护措施。

#### 3.3.2 监测方案与要求

监测内容: 变形监测。布设位移观测点(间距20-50m), 采用全站仪或GNSS实时监测坝体位移; 渗流监测。安装渗压计和量水堰, 监测浸润线变化及渗流量; 应力监测。在锚索和钢板关键部位埋设应变计, 评估加固效果。监测频率。施工期每日1次, 竣工后首年每月1次, 后期每季度1次<sup>[4]</sup>。

## 4 加固效果评估与风险管理

### 4.1 加固效果评估

(1) 通过数值模拟或实验方法评估加固效果。数值模拟方法, 如有限元分析(FEA)、离散元法(DEM)等, 是评估加固效果的重要手段。这些方法可以模拟大坝在不同工况下的应力分布、位移变化等, 从而判断加固措施对大坝整体稳定性的影响。通过对比加固前后的模拟结果, 可以直观地看到加固效果的提升。实验方法则包括现场实验和实验室实验。现场实验可以直接在大坝上进行, 通过监测加固前后的各项性能指标来评估加固效果。实验室实验则可以在控制条件下模拟大坝的加固过程, 通过对比分析实验结果来验证加固措施的有效性。实验方法具有直观性和可靠性, 但成本相对较高, 且可能受到现场条件的限制。(2) 对比加固前后的稳定性分析结果。稳定性分析是评估大坝安全性的重要手段。在加固前, 需要对大坝进行全面的稳定性分析, 识别存在的安全隐患。加固后, 再次进行稳定性分析, 对比加固前后的结果, 可以评估加固措施对大坝稳定性的提升程度。稳定性分析的结果通常以安全系数、位移量

等指标来表示。安全系数越大, 表示大坝越安全; 位移量越小, 表示大坝的变形越小。通过对比加固前后的这些指标, 可以直观地评估加固效果的好坏。

### 4.2 风险管理

(1) 识别加固过程中可能出现的风险和问题。加固过程中可能出现的风险和问题包括施工安全事故、材料质量问题、加固效果不达标等。施工安全事故可能由操作不当、设备故障等原因引起, 对人员和设备造成损害。材料质量问题可能导致加固措施失效, 影响大坝的整体安全性。加固效果不达标则可能是由于设计或施工不当, 使得加固后的大坝仍然存在安全隐患。为了识别这些风险和问题, 需要在加固前进行充分的风险评估。通过收集和分析相关信息, 识别潜在的风险源和风险事件, 评估其可能性和影响程度。同时, 还需要与施工单位、设计单位等进行充分沟通, 了解加固工程的实际情况和可能存在的问题。(2) 提出风险管理策略和措施。针对识别出的风险和问题, 需要制定相应的风险管理策略和措施。对于施工安全事故, 可以通过加强安全培训、完善安全管理制度、定期检查和维护设备等方式来降低风险。对于材料质量问题, 可以通过严格材料检验、选择优质供应商、加强材料存储和管理等方式来确保材料质量。对于加固效果不达标的问题, 可以通过优化设计方案、提高施工质量、加强监测和评估等方式来提升加固效果。

### 结束语

综上所述, 水库大坝的稳定性分析与加固设计是保障大坝安全、延长使用寿命的重要环节。通过综合运用静力分析、动力分析和数值分析方法, 我们能够全面评估大坝的安全状态。结合针对性的加固设计原则和方法, 实施有效的加固措施, 可以显著提升大坝的抗灾能力。未来, 我们将继续探索更加高效、智能的分析与加固技术, 为水利工程的安全运行提供坚实保障。

### 参考文献

- [1] 许雷, 杨鸽, 刘慧. 某抽水蓄能电站下水库主坝抗震安全性复核分析[J]. 大坝与安全, 2022, (06): 48-53.
- [2] 陈超, 尚金光. 抽水蓄能电站运行期平面控制网复测及稳定性分析[J]. 大坝与安全, 2020, (05): 58-59.
- [3] 张明赞. 浏阳市道源水库大坝安全监测系统建设与管理[J]. 湖南水利水电, 2023, (04): 33-34.
- [4] 卢季柳. 小型水库雨水情测报和大坝安全监测系统建设探讨[J]. 中国科技期刊数据库工业A, 2023, (14): 94-95.