

水利水电工程中坝体稳定性分析与优化设计

黄耀中

国家粮食和物资储备局江西局六七三处, 江西 抚州 344200

摘要: 水利水电工程坝体稳定性分析是确保工程安全的关键技术, 地质条件以及荷载组合对坝体稳定性产生重要影响, 极限平衡法及有限元分析与正交试验设计为稳定性评价提供了多元化技术手段, 三维数值模型能够准确反映坝体空间效应与复杂边界条件。基于可靠度理论的设计准则通过概率化分析量化不确定性因素影响, 结构优化技术在满足安全约束下实现工程造价最小化, 工程应用案例验证了理论方法的有效性, 经济与安全效益评估为工程决策提供量化支撑, 坝体稳定性分析与优化设计方法为水利水电工程安全性与经济性提升提供理论基础。

关键词: 水利水电工程; 坝体稳定性; 有限元分析; 优化设计

DOI: 10.63887/jad.2025.1.4.2

引言

水利水电工程坝体稳定性直接关系工程安全运行与社会经济发展, 随着工程规模扩大与建设条件复杂化, 传统设计方法已难以满足现代工程技术要求, 复杂地质条件及多变荷载工况与严格安全标准对坝体稳定性分析提出更高技术挑战。数值分析技术快速发展为稳定性评价提供强有力工具支撑, 有限元方法、可靠度理论与优化设计技术在工程实践中广泛应用, 多学科交叉融合推动坝体稳定性分析理论不断完善, 为解决复杂工程技术问题提供新思路, 探讨坝体稳定性分析与优化设计方法对提升水利水电工程技术水平具有重要意义。

1 坝体稳定性影响因素分析

1.1 地质条件对坝体稳定性的影响

地质条件作为评价坝体稳定性的基础要素, 对大坝长期安全运行有着决定性影响, 基岩的岩性特征、节理裂隙发育程度以及风化程度, 直接影响坝基的承载能力和变形特性。软弱夹层的存在往往会成为坝体失稳的潜在滑动面, 尤其是层状岩体中的泥质夹层, 其强度参数显著低于围岩, 在应力作用下易产生剪切破坏, 地下水的渗流作用会降低岩土体的有效应力, 同时产生渗透压力, 对坝体稳定性造成不利影响。岩体结构面的组合关系决定了可能的破坏模式, 当结构

面倾向与坝轴线夹角较小时, 容易形成沿结构面的滑动破坏, 地质构造活动形成的断层带和破碎带, 其力学参数普遍较低, 成为坝体稳定的薄弱环节。

1.2 荷载组合对坝体稳定性的影响

坝体稳定性分析需要考虑多种荷载的组合作用, 不同荷载工况之下的稳定性评价标准存在差异, 静水压力是坝体承受的主要荷载, 其大小和水位高程是直接相关的, 上游水位的变化会引起坝体内部应力状态重新分布。地震荷载作为一种动态荷载, 具备随机性和瞬时性等显著特点, 地震惯性力的作用会显著降低坝体的抗滑稳定性, 温度荷载所引起的坝体温度应力和变形, 在混凝土坝当中表现得尤为明显, 温度梯度的存在有可能导致坝体产生拉应力集中。依据极限平衡理论, 考虑多种荷载组合的坝体抗滑稳定安全系数可表示为:

$$K_s = \frac{\sum (W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i + c_i l_i)}{\sum (W_i \sin \alpha_i + U_i + P_i)} \quad (1)$$

式中: K_s 为抗滑稳定安全系数, W_i 为第 i 个条块的重量, $\sin \alpha_i$ 为滑动面倾角, $\cos \alpha_i$ 为内摩擦角, c_i 为黏聚力, l_i 为滑动面长度, U_i 为孔隙水压力, P_i 为地震惯性力^[1]。荷载组合的不利程度会直接影响坝体的安全系数, 正常运行期、洪水期和地震期的荷载组合分别对应不同安全系数要求, 渗透压力的存在会增加下滑力

进而降低坝体稳定性，特别是在快速泄洪过程中，孔隙水压力滞后消散会产生不利渗透梯度。

2 坝体稳定性分析方法研究

2.1 极限平衡法稳定性分析

极限平衡法作为传统坝体稳定性分析方法，是基于力学平衡和极限状态理论，通过分析滑动面上力平衡关系来确定坝体安全系数，Bishop 简化法和 Janbu 法属于工程中常用条分法，是将坝体沿潜在滑动面分割成若干竖直条块，考虑各条块重量、水压力和土压力等作用，圆弧滑动面假设适用于均质土坝的稳定性分析，而复合滑动面更适合非均质坝体和复杂地质条件下稳定性评价。Spencer 法和 Morgenstern - Price 法考虑了条块间相互作用力，能够满足力和力矩双重平衡条件，计算精度相对较高，瑞典圆弧法虽计算简便，但在处理复杂边界条件和材料分布时存在一定局限性，极限平衡法优势在于概念清晰且计算快速，广泛应用于初步设计阶段的稳定性评价。条分法精度与条块数量和滑动面形状密切相关，条块数量过少会影响计算精度，过多则增加计算复杂度，滑动面搜索算法选择对于确定最危险滑动面至关重要，遗传算法和粒子群算法等智能优化方法在滑动面搜索中展现良好应用效果。

2.2 有限元分析方法的应用

有限元法是把坝体离散成有限数量的单元，建立起节点位移和应力的关系矩阵，从而能够精确模拟坝体的应力分布和变形特性，平面应变条件下的有限元分析适合用于长直坝段的稳定性计算，而三维有限元模型则可以反映坝体的空间效应和端部约束影响。强度折减法结合有限元分析，是逐步降低材料强度参数直到坝体达到破坏状态来确定安全系数，有限元分析在处理非线性材料本构关系、复杂边界条件和渗流耦合问题方面有显著优势^[2]，有限元法中的平衡方程可以表示为：

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (2)$$

式中： $[K]$ 为整体刚度矩阵； $\{u\}$ 为节点位移向量； $\{F\}$ 为节点力向量。该方程通过组装各单元刚度矩阵形成总体平衡方程组，求解后得到坝体各节点的位移响应，进而计算应力分布和安全系数。

2.3 基于正交试验的多因素分析

正交试验设计通过合理选择试验点，能用较少计算量获多因素对坝体稳定性影响全面信息，坝体材料参数、几何尺寸和荷载条件等因素变化对稳定性影响程度有差异，正交试验可定量分析各因素敏感性。 $L_9(3^4)$ 正交表适用于四因素三水平的试验设计，通过极差分析和方差分析确定主要影响因素与最优参数组合，边坡角度、坝高和材料强度参数通常是影响坝体稳定性的关键因素，密度和弹性模量的影响相对较小。正交试验结果可为坝体优化设计提供量化依据，避免传统试错法的盲目性，回归分析建立的多元回归方程能预测不同参数组合下稳定性安全系数，为工程决策提供科学支撑^[3]。

2.4 三维数值模型的建立与验证

三维数值模型可真实反映坝体空间几何形状以及复杂边界条件，是现代坝体稳定性分析当中的重要手段。模型建立时需要准确描述坝体的几何尺寸、材料分区和地质构造特征，网格划分精度会直接影响计算结果的可靠性，接触面单元设置对于模拟坝体与基岩之间的相互作用十分关键，能够反映界面的滑动和分离特性。三维分析考虑了坝体端部效应和空间约束条件，计算结果比二维分析更接近实际工程情况，图 1 展示出三维坝体有限元网格模型的基本构成，涵盖网格划分、节点分布、边界约束和荷载作用等关键要素，精细网格划分能够准确捕捉应力集中区域的力学响应，模型边界条件合理设置对计算精度有重要影响。底部边界通常采用固定约束条件以防止坝体产生刚体位移，侧面边界根据实际工程条件设置相应约束形式，模型验证通过与监测数据和模型试验结果对比来评价数值模型准确性，位移、应力和渗流量等参数吻合程度是验证重要指标。

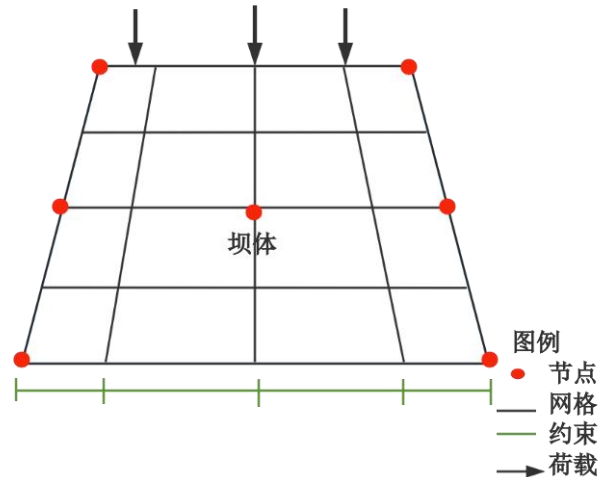


图1 三维坝体有限元网络模型

3 坝体优化设计方法与实践应用

3.1 基于可靠度理论的设计准则

可靠度理论给坝体设计提供概率化安全评价框架，通过量化不确定性因素对结构安全性的影响来建立更科学合理的设计准则。传统安全系数法采用确定性分析方法，无法充分反映参数变异性和荷载随机性对坝体安全的影响，可靠度分析考虑材料参数、几何尺寸和荷载条件的概率分布特征，建立功能函数用来描述结构的极限状态。可靠度指标 β 与失效概率 P_f 的关系可表示为：

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (3)$$

式中： $-\Phi^{-1}$ 为标准正态分布的逆函数； P_f 为结构失效概率。一次二阶矩法和 Monte Carlo 模拟是常用可靠度计算方法，前者计算效率高但精度有限，后者精度高但计算量大，目标可靠度指标的确定要综合考虑结构重要性、破坏后果和经济因素，重要工程目标可靠度指标通常设定在 3.0-4.0 之间。可靠度指标与失效概率呈现负相关关系， β 值增大时失效概率显著降低体现概率化设计方法科学性，设计点的确定是可靠度分析的关键步骤代表最可能导致结构失效的参数组合，敏感性系数反映各随机变量对可靠度指标的影响程度有助于识别控制结构安全的关键参数，可靠度约束优化将可靠度指标作为约束条件在满足安全要求前提下实现结构优化设计^[4]。

3.2 坝体结构优化技术研究

坝体结构优化技术是基于数学优化理论，在满足

安全性、稳定性和功能性要求前提下去寻求经济性最优设计方案，优化设计变量包含坝体几何参数、材料分布和施工工艺等内容，约束条件涵盖强度、稳定性、渗流和变形等多个方面。目标函数的选择会直接影响优化结果，单目标优化一般以工程造价最小作为目标，多目标优化则需在安全性和经济性之间寻求平衡，梯度优化算法适用于连续变量的优化问题，收敛速度快却容易陷入局部最优解。遗传算法、粒子群算法和模拟退火算法等启发式算法具备全局搜索能力，适用于离散变量和多峰函数的优化，拓扑优化通过调整材料分布实现结构性能改善，在坝体防渗设施和加固措施布置中有良好应用前景，形状优化主要针对坝体轮廓线进行调整，通过改变上下游坡比和坝顶宽度提高结构效率。

3.3 工程应用案例分析

坝体稳定性分析方法在实际工程中的应用展现了理论与实践相结合的重要价值，不同类型的水利工程对稳定性分析提出了差异化的技术要求，高土石坝工程面临的主要挑战包括深厚覆盖层地基处理与高应力状态下的材料非线性行为以及复杂的渗流场分布。混凝土面板堆石坝的稳定性分析需要特别关注面板与垫层的接触特性与周边缝的止水效果以及堆石料的流变特性，碾压混凝土坝的分层施工特点要求在稳定性分析中考虑层间结合面的抗剪强度以及温度应力的影响，病险水库除险加固工程的稳定性评价涉及既有结构的安全状态评估以及加固措施的效果验证^[5]。地震作用下

的坝体稳定性分析需要采用动力分析方法，考虑地震动的频谱特性与持续时间对坝体响应的影响，软土地基上的堤坝工程需要重点分析地基的稳定性与沉降变形，采用固结理论与有效应力原理进行分析，复杂地质条件下的坝体稳定性分析要求建立精细的三维地质模型，准确反映岩土体的空间变异性。

3.4 经济与安全效益评估

坝体优化设计的经济效益评估要综合考量建设成本、运行维护费用、风险损失等多个方面并建立全生命周期的成本效益分析模型，工程直接成本包含土石方开挖、材料采购、设备安装和施工费用等内容，间

接成本涵盖征地移民、环境保护和管理费用等相关方面，安全效益的量化评估借助风险分析方法达成，把破坏概率与损失后果相结合来计算期望损失值。表 1 呈现了不同优化方案的经济技术指标对比情况为决策提供量化依据，投资回收期和净现值作为评价工程经济性的重要指标需考虑资金时间价值和通胀因素的影响，敏感性分析评估关键参数变化对经济指标的影响程度以识别影响项目经济性的主要因素。社会效益涉及防洪减灾、供水保障和生态环境改善等诸多方面虽难以直接货币化但在决策中有重要意义，风险管理策略的制定要在风险水平和管理成本之间寻求平衡避免过度安全投入导致经济效益下降。

表 1 不同优化方案经济技术指标对比

优化方案	工程造价(万元)	安全系数	渗流量(m ³ /d)	工期(月)	综合评分
原设计方案	15680	1.35	125.6	36	72.5
优化方案 1	14250	1.42	98.3	32	84.2
优化方案 2	16420	1.58	76.8	38	89.6
优化方案 3	13890	1.38	115.2	30	78.9
推荐方案	15100	1.45	85.4	34	91.3

结语

坝体稳定性分析与优化设计形成了完整的理论体系和技术框架，地质条件和荷载组合影响机理为工程设计提供理论指导，多种分析方法在不同工程条件下发挥重要作用，三维数值建模技术显著提升分析精度以及工程适用性，可靠度理论有效处理工程不确定性

问题，结构优化技术实现安全性与经济性协调统一，工程应用案例验证理论方法实用性。经济效益评估为工程决策提供量化依据，促进水利水电工程可持续发展，未来应深化多学科交叉研究，推动坝体稳定性分析技术向智能化以及精细化方向发展，为水利水电事业高质量发展提供技术保障。

参考文献

- [1] 饶美芳. 基于渗流和稳定性分析的水库坝体加固方案比选[J]. 水利技术监督, 2025, (06): 163-168.
- [2] 穆明垚, 王岳航, 冯国磊. 水库除险加固方案设计与技术优化及坝体稳定性分析[J]. 粘接, 2025, 52(04): 163-165+169.
- [3] 韩宗建. 水利工程堤坝防参与加固技术研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(03): 97-100.
- [4] 雷海林, 张万栋, 张汉康. 基于有限元方法的水利工程坝体稳定性监测研究[J]. 水利科技与经济, 2024, 30(03): 152-157.
- [5] 袁东. 基于 BIM 技术的水利工程坝体稳定性和应力分析探讨[J]. 科技资讯, 2021, 19(29): 66-68.