

水利水电工程中坝体稳定性分析与优化设计

龚小虎

江西省宜安建设开发有限公司 江西南昌 330000

【摘要】针对水利水电工程中坝体稳定性问题，通过建立三维有限元模型，结合现场实测数据，对不同工况下坝体稳定性进行了系统研究。研究采用ANSYS软件进行数值模拟，分析了水位变化、地震作用、温度应力等因素对坝体稳定性的影响。实验结果表明，在正常蓄水位条件下，坝体最大位移出现在坝顶中部区域，应力分布总体合理，最大主应力集中在坝踵位置。基于稳定性分析结果，提出了优化设计方案，包括优化坝体断面、改进施工工艺和加强监测等措施。优化后的设计方案显著降低了工程造价，同时提高了坝体整体稳定性和安全系数。

【关键词】水利水电工程；坝体稳定性；有限元分析；优化设计；应力分布

引言：

随着我国水利水电事业的快速发展，大型水利枢纽工程建设数量不断增加，坝体结构安全性和稳定性问题日益突出。坝体作为水利水电工程的关键构筑物，其稳定性直接关系到工程的安全运行和效益发挥。近年来，国内外学者对坝体稳定性分析方法进行了大量研究，从传统的极限平衡法发展到现代数值分析方法。然而，由于水利水电工程的复杂性和特殊性，现有研究仍存在计算精度不足、优化方案不够系统等问题。因此，开展坝体稳定性分析与优化设计研究，对提高水利水电工程的安全性和经济性具有重要意义。

1 工程概况

1.1 工程特征与规模

某水利枢纽工程位于松花江中游河段，枢纽工程由混凝土重力坝、泄洪闸、电站厂房及输水系统等建筑物组成。大坝为混凝土重力坝，最大坝高156米，坝顶长度842米，坝顶高程387米。坝体采用C25水工混凝土浇筑，内设垂直收缩缝和水平施工缝。坝段分块采用标准坝段宽度为15米，坝体剖面呈梯形。泄洪闸布置于坝体中部，共设5孔泄洪闸，单孔宽度15米，闸底高程332米。电站装机容量120万千瓦，年发电量38.5亿千瓦时。输水系统包括进水口、压力钢管及尾水系统，压力钢管采用三岔管形式。溢流坝段设计泄洪流量15000立方米每秒，相应下游最大水位342米。

1.2 工程地质条件

工程区位于华北地台北部，区域构造较为稳定。坝址区基岩主要为前震旦系变质岩系，岩性以片麻岩、花岗岩片麻岩为主，局部夹混合岩及浅变质砂岩。基岩岩体完整性较好，节理裂隙发育程度中等，岩体基本质量等级为II-III

级。坝基面存在一条走向近东西向的断层F23，倾向175°，倾角68°，断层两盘岩体较完整，胶结程度良好。岩体变形模量平均值为15GPa，单轴抗压强度平均值为85MPa，天然地基承载力允许值为2.0MPa。地下水类型主要为基岩裂隙水，水位年变幅2-3米，地下水对混凝土无腐蚀性。场地地震动峰值加速度为0.15g，设计地震分组为第二组。

2 坝体稳定性影响因素研究

2.1 水位变化影响

水库水位变化直接影响坝体受力状态和稳定性。正常蓄水位384米时，上游水压力对坝体产生最大推力，下游消能防冲区水位为326米。水位急剧下降时，坝体内外水压差增大，引起坝体应力重分布，导致坝体产生附加变形。库水位降至死水位345米时，坝体内部孔隙水压力滞后消散，坝体稳定性安全储备降低。汛期水位超过设计洪水位386米时，渗透压力显著增加，坝体抗滑稳定性系数由1.8降至1.6。坝基渗透变形主要发生在基岩裂隙发育带，最大渗透压力集中在坝踵部位。库水位年际变幅达39米，反复作用导致坝体产生疲劳效应，对坝体长期稳定性造成不利影响^[1]。水位变化引起的动水压力需通过消能设施有效消解。

2.2 地震作用分析

地震作用对坝体稳定性的影响主要表现在惯性力和水动力两个方面。地震惯性力随坝高增加而增大，坝顶最大加速度可达基岩输入加速度的2.5倍。地震时库水附加动水压力对坝体产生巨大超载作用，最大附加水平力可达静水压力的35%。地震荷载作用下，坝体最大主压应力由2.8MPa增至3.6MPa，拉应力区域扩大，坝踵处出现应力集中现象。强震作用导致坝体剪切变形增大，坝基岩体产生软化，降低了抗滑稳定性。震后坝体裂缝发展加剧，可能引起渗流通道扩展。坝体与岸坡交接部位因地形突变，地震响应较

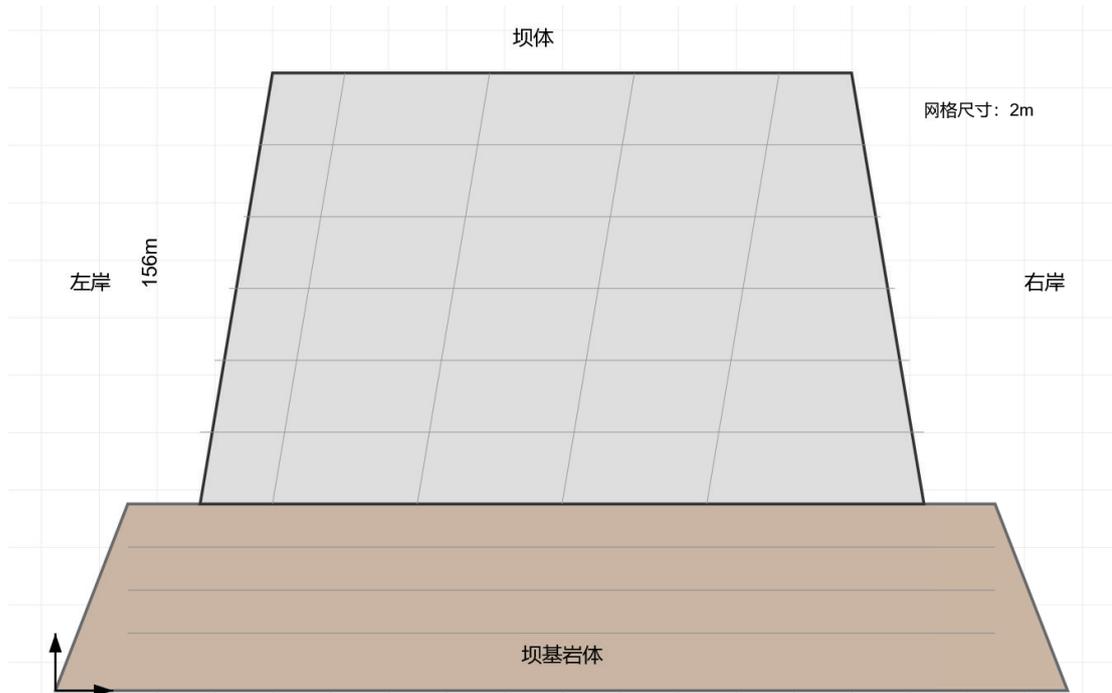


图1 坝体三维有限元计算模型图

为剧烈，需重点加固处理。

2.3 温度应力影响

温度因素对坝体应力状态和变形特性产生持续影响。混凝土浇筑初期水化热释放，坝体内部温度可达65℃，温度梯度引起较大拉应力。冬季气温降至-20℃时，坝体表层与内部温差达到30℃，产生显著温度应力，易导致表面开裂^[2]。夏季阳面坝体表温可达45℃，温度应力叠加水压力作用，加剧坝体开裂风险。坝体温度场呈现明显的季节性变化规律，年温差可达40℃。混凝土收缩和徐变效应与温度变化耦合作用，导致坝体产生不均匀变形。坝体温度控制防裂措施包括合理选择水泥用量、控制浇筑厚度、设置防裂钢筋等。

2.4 施工工艺影响

施工工艺和施工质量直接决定坝体结构性能。混凝土浇筑分层厚度控制在2米以内，振捣密实度达到98%，确保结构整体性。坝段间施工缝和收缩缝处理质量影响防渗性能，缝面凿毛处理深度不小于6毫米，清理冲洗后浇筑防渗混凝土。冷热季节施工时，采取保温或降温措施控制混凝土温度，预防温度裂缝。灌浆施工压力、灌浆量及扩散半径严格控制，防止产生水力劈裂。帷幕灌浆和固结灌浆施工顺序科学安排，先实施固结灌浆，后进行帷幕灌浆。施工期间严格控制上游水位，确保基坑开挖和坝体浇筑安全^[3]。

3 稳定性分析与计算

3.1 计算模型建立

基于工程实际特征，采用ANSYS有限元软件建立三维计算模型。模型整体尺寸确定：坝高156米，坝基岩体下游

取坝高1.5倍，上游取坝高2倍，两岸取坝高2倍，如图1所示。单元类型选用二十节点等参单元SOLID95，具有较好的计算精度和几何适应性。网格划分采用渐变方案，坝体区域网格尺寸2米，过渡区域逐渐增大至4米，坝基远场区域采用6米网格尺寸。模型总单元数85246个，节点数156832个。边界条件设置遵循工程实际：坝基底部采用固定约束，限制三个方向位移；上下游面及两岸面采用法向位移约束，允许坝体在重力及水压力作用下产生变形；上游水压力通过面荷载形式施加，压力大小随水深线性变化；下游消力池水压力计入稳定性分析。坝体与基岩接触面引入库伦摩擦接触单元CONTA174和TARGE170，摩擦系数取0.75。温度场分析考虑混凝土导热系数随龄期变化规律，比热容取920J/(kg·℃)，线膨胀系数 $1 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。（见图1）

计算工况涵盖施工期、正常运行期和特殊工况。施工期包括基坑开挖、混凝土浇筑、灌浆及蓄水过程。运行期考虑正常蓄水位384米、设计洪水位386米、校核洪水位387米工况。特殊工况包括地震工况和非常态工况。混凝土弹性模量28GPa，泊松比0.167，容重24kN/m³，抗压强度25MPa，抗拉强度2.5MPa。坝基岩体弹性模量15GPa，泊松比0.25，容重26kN/m³，内摩擦角45°，黏聚力1.2MPa。坝基渗透系数 $1 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ ，坝体-基岩接触面摩擦系数0.75。地震工况动力分析中，阻尼比取5%，反射系数取0.75，输入地震波主要周期0.3秒。

3.3 稳定性计算结果

静力工况下，坝体最大位移出现在坝顶中部，正常蓄水位时水平位移35毫米，垂直位移28毫米。坝踵处最大主

压应力2.8MPa,坝踵上游侧存在局部拉应力区,最大拉应力0.8MPa。渗流计算结果显示坝基最大渗透压力0.9MPa,渗透梯度1.2,防渗帷幕减压效果明显。地震工况下,坝顶最大加速度响应0.375g,坝体最大动应力3.6MPa,位移包络值达52毫米。温度应力分析表明,施工期最大温度应力1.2MPa,运行期温度应力年变幅0.6MPa。抗滑稳定系数在各工况下均满足规范要求,最小值出现在地震工况,为1.6。应力水平总体处于弹性范围内,结构变形可控。

3.4 安全性评价

基于计算分析结果,从强度、稳定性、渗流控制和抗震性能四个方面进行安全性评价。坝体整体应力水平合理,最大主压应力为设计强度的65%,局部拉应力未超过混凝土抗拉强度设计值。坝体变形总体可控,各类变形监测点位移值均在允许范围内。抗滑稳定系数满足规范要求,各部位安全储备充足。渗流防控措施有效,帷幕灌浆和排水系统工作正常,渗透压力及渗透梯度满足控制标准^[4]。地震工况下,坝体动力响应合理,结构未出现损伤性变形。温度应力控制措施得当,未发现有害裂缝。综合评价表明,工程安全性满足设计要求,运行风险可控。

4 优化设计与工程应用

4.1 坝体结构优化

坝体结构优化主要针对坝体断面形式、材料强度等级及内部结构布置展开。优化后的坝体采用折线坝体断面,上游坡比1:0.2,下游坡比1:0.75,相比原设计节省混凝土方量8.6万立方米。混凝土标号优化采用分区设计,坝体外层采用C30防渗混凝土,内部采用C25混凝土,过渡区采用C20混凝土,提高了结构耐久性。坝体内部廊道布置优化为上下游双廊道系统,间距50米,断面尺寸3×3.5米,便于施工期通风排水和运行期检修。溢流坝段消能防冲区结构改进,底板厚度由3米增加至3.5米,消力齿高度1.8米,间距4米,提高了消能效果。泄水系统优化采用三层取水方案,确保水质调节需求。

4.2 施工方案改进

施工方案改进重点围绕混凝土浇筑工艺和灌浆施工技术。混凝土浇筑采用爬模系统,浇筑块体高度控制在1.8米,减少施工缝数量。混凝土运输系统采用塔式起重机配合装载机方案,提高了施工效率。接缝处理采用凿毛深度8毫米,高压水冲洗后铺设抗渗混凝土层。帷幕灌浆采用GIN灌浆法,控制灌浆压力0.8-1.2MPa,灌浆量120-180L/m。固结灌浆分区采用“小区快灌”技术,单排孔间距2米,帷幕灌浆采用三排孔方案。基坑开挖优化为台阶式开挖,台阶高度6米,宽度4米,确保边坡稳定。施工导流明渠断面尺寸优化为底宽16米,边坡比1:0.5,提高了防洪能力。

4.3 监测系统设计

监测系统采用自动化监测与人工巡检相结合模式。变形监测布设垂直位移测点52个,水平位移测点48个,沉降观测点35个。渗流监测设置渗压计86个,测压管32组,排水量计42个。应力监测埋设应变计124个,测缝计86个,温度计156个。监测数据采用GPRS无线传输系统,建立数据采集中心。自动监测频率:正常工况每日4次,汛期每日8次,特殊工况每小时1次。监测预警分级:预警值按坝体设计指标85%控制,警戒值按95%控制,报警值按设计指标确定。监测资料分析采用神经网络模型,建立预警预报体系^[5]。

4.4 经济效益分析

经济效益分析采用全寿命周期成本法进行评估。优化设计方案节约混凝土用量8.6万立方米,降低工程直接费用1860万元。施工工艺改进缩短工期45天,减少施工费用680万元。帷幕灌浆优化节约水泥浆液2600吨,降低成本320万元。监测系统自动化改造投入850万元,年运行维护费用减少180万元。相比原设计方案,优化后工程总投资节约2890万元,年运行成本降低260万元。工程建成后年发电量38.5亿千瓦时,年供水量12.6亿立方米,防洪效益显著。经济内部收益率达12.8%,投资回收期8.6年,经济效益显著。

结语

通过对某水利水电工程坝体稳定性的系统研究,获得了坝体在不同工况下的变形特征和应力分布规律。研究发现水位变化和地震作用是影响坝体稳定性的主要因素,温度应力的影响次之。基于研究结果,提出的优化设计方案在保证工程安全的前提下,实现了投资成本的有效控制。建议在后续工程实践中,加强施工质量控制,完善监测系统,建立健全预警机制。该研究成果可为同类工程的设计和施工提供参考,对提高水利水电工程的整体性能具有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 李浩. 回水倒灌作用下重力坝的安全稳定性分析研究[D]. 重庆交通大学, 2023.
- [2] 陆庆芳, 陆华坤. 考虑渗流影响的水库大坝边坡稳定性研究[J]. 科技资讯, 2023, 21(11): 107-110. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2210-5042-7187.
- [3] 耿俊涵. 栾川县水露沟尾矿库坝体稳定性分析及洪水作用下的安全评估研究[D]. 华北水利水电大学, 2023.
- [4] 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.
- [5] 张丽萍. 基于层次分析法的水利工程滑坡体稳定性评估方法分析[J]. 水科学与工程技术, 2020, (04): 75-79.