

区域构造稳定性分析在重大水利工程选址中的核心作用

李泽发

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v9i6.6429

[摘要] 区域构造稳定性分析是重大水利工程选址决策的地质基石,直接决定了工程的全生命周期安全性与可持续性。本文基于水利工程地质勘察的专业框架,系统阐释区域构造稳定性分析的理论体系与方法演进,界定重大水利工程的地质风险特征,并深入论证其在工程选址中的核心作用。研究表明,该分析通过活断层鉴定、地震危险性评价、地壳形变监测等技术,为规避构造直接破坏、优化抗震设计参数、保障库区链生灾害防控提供不可替代的科学支撑,是重大水利工程从选址规划到长效运维的核心保障机制。

[关键词] 地质勘察; 水利工程; 区域构造; 稳定性分析

中图分类号: TV 文献标识码: A

Core Role of Regional Tectonic Stability Analysis in Site Selection of Major Water Conservancy Projects

Zefa Li

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey Design and Research Institute Co., Ltd.

[Abstract] Regional tectonic stability analysis serves as the geological cornerstone for site selection decisions in major water conservancy projects, directly determining the lifecycle safety and sustainability of such engineering endeavors. Based on the professional framework of geological investigation for water conservancy projects, this paper systematically elucidates the theoretical framework and methodological evolution of regional tectonic stability analysis, defines the geological risk characteristics of major water conservancy projects, and thoroughly demonstrates its core role in engineering site selection. Research indicates that through techniques such as active fault identification, seismic hazard assessment, and crustal deformation monitoring, this analysis provides irreplaceable scientific support for mitigating direct tectonic damage, optimizing seismic design parameters, and preventing reservoir-induced cascading disasters. It constitutes a critical safeguard mechanism spanning from site selection planning to long-term operation and maintenance of major water conservancy projects.

[Key words] Geological Investigation; Water Conservancy Projects; Regional Tectonics; Stability Analysis

引言

新疆作为国家“一带一路”能源走廊的核心节点,其水利工程承载着水资源战略储备、绿洲经济支撑与生态屏障建设的多重使命。该区域横跨天山、昆仑山、阿尔金山三大造山带,处于印度板块北向推挤的应力集中区,现代地壳缩短速率达5~10mm/年,导致活动断裂广泛发育。根据新疆地震局数据,全区7级以上强震潜在危险区达12处,地震基本烈度Ⅷ度以上区域占比超过40%。重大水利工程如大石峡(坝高247米,世界最高混凝土面板坝)、阿尔塔什(坝高164.8米,叶尔羌河控制性工程)等,因规模超大、功能关键,一旦因构造失稳导致事故,将引发跨流域生态灾难。2017年大石峡水利枢纽开工伊始即面临“五高”挑战(高坝、高边坡、高挖填强度、高泄洪流速、高地震烈度),其选址

决策高度依赖区域构造稳定性评价的精准性。本文立足新疆特殊地质背景,深入剖析区域构造稳定性分析与重大水利工程的互动机制,为极端环境下的工程安全提供科学范式。

1 区域构造稳定性分析的概念与方法体系

1.1 科学内涵与时空尺度特性

区域构造稳定性分析是以地质动力学为核心,融合地球物理学、地震学、地貌学等多学科的系统性研究,旨在评估工程所在区域现今地壳活动强度及其灾害风险。其核心目标是识别影响工程安全的构造活动要素,并预测潜在灾害的时空分布规律。

从时间尺度看,该分析聚焦晚更新世以来至今的构造活动,尤其是全新世以来的活断层活动历史。空间范围则采用“三圈层”研究模型:覆盖工程场址外围150km的远场区(区域构造背

景)、25km的近场区(断裂活动性)及5km的工程核心区(场地断层精细评价)。这种分层体系实现了区域构造背景的宏观把握与局部断层的微观解析相结合,避免因尺度单一导致的误判风险。

1.2 核心分析内容构成

区域构造稳定性分析包含四大核心内容,形成递进式研究链条:

(1)区域构造背景解析。确定工程所处大地构造单元如地块、造山带、盆地边缘,分析深部地球物理场特征(重力场、磁异常、莫霍面起伏)及其与地震活动的关联性。(2)活断层鉴定与活动性分级。通过地质地貌调查、探槽揭露、断层泥热释光/电子自旋共振测年等技术,判定断层最新活动时代与位移速率。(3)地震危险性评价。整合历史地震分析、潜在震源区划分、基岩地震动参数(峰值加速度PGA、反应谱)确定。例如喀什河水电站通过地震统计与构造应力场模拟,将基岩峰值加速度定为 $0.15g$,为抗震设计提供精准依据。(4)水库诱发地震(RIS)预测机制。基于库区岩体渗透性、断层导水性及构造应力状态,评估蓄水后孔隙水压力扩散对断层抗剪强度的弱化效应。

1.3 分析方法与技术演进趋势

区域构造稳定性分析方法已从经验定性向模型定量跨越:(1)传统定性方法。依赖构造类比法与地震地质类比法,通过对比已建工程地质条件进行风险分级,易受主观因素影响;(2)现代定量模型。采用模糊数学综合评价、概率地震危险性分析(PSHA)、基于GIS的空间分析等技术,显著提升评价客观性;(3)前沿技术融合。卫星InSAR形变监测、三维地应力场模拟(如FLAC3D)、人工智能风险预测等逐步应用。

2 重大水利工程地质风险特征

2.1 定义与功能定位

重大水利工程系指库容 ≥ 10 亿 m^3 、坝高 $\geq 150m$ 、装机容量 $\geq 1000MW$,或承担跨流域水资源调配、流域防洪控制等国家战略任务的水利枢纽工程。此类工程具备以下核心特征:

(1)超大规模属性。工程体量远超常规水利设施,多分布于地质构造活跃的高山峡谷区,其建设与运维需应对复杂的地质环境挑战。工程投资规模常达百亿元量级,一旦因地质风险导致工程失效,将引发流域性生态灾难与重大社会经济损失。(2)战略功能主导性。在能源结构转型中承担清洁电力供给核心职能,通过跨流域调水解决区域性水资源短缺,并作为防洪体系关键节点调控极端水文事件。例如新疆阿尔塔什水利枢纽控制叶尔羌河90%以上径流,保障塔里木盆地绿洲农业用水安全。(3)全生命周期长效性。设计服役周期普遍跨越百年尺度,需持续适应构造活动、气候变化等长时效地质环境变迁。如大石峡混凝土面板坝按150年使用年限设计,需预判印度板块持续北向推挤($5\sim 10mm/年$)导致的累积构造变形效应。

2.2 新疆重大水利工程的地质风险特征

2.2.1 工程规模与地质风险的耦合放大效应

新疆重大水利工程多属世界级超高坝大库,其规模导致四类风险非线性增长:

(1)活断层错动风险倍增。高坝水体荷载显著改变区域应力场。大石峡247米高坝的三维有限元分析表明,蓄水后库仑应力变化使F30断层滑移倾向性增加 $12\%\sim 18\%$ 。通过FLAC3D软件模拟断层活化阈值,确认当库水位骤降速率超过 $3m/d$ 时,断层抗剪强度安全系数降至 1.05 以下,需严格限制调度变幅。(2)强震动力响应复杂化。深厚覆盖层放大地震波效应并改变频谱特性。阿尔塔什坝基94米覆盖层的等效线性分析显示,其卓越周期从基岩的 $0.15s$ 延长至 $0.45s$,使设计反应谱平台段拓宽至 $1.2s$,抗震分析需采用土-结构相互作用(SSI)专项模型。(3)库岸链生灾害高发性。库水浸泡导致岸坡岩体软化,叠加构造卸荷裂隙带发育。大西沟水库左岸SL10楔形体受F98与F192断层交切,形成体积 6.6 万 m^3 的危险岩体。稳定性计算表明,蓄水至正常高水位时,其安全系数从 1.35 降至 1.15 ,需实施 $3800kN$ 级预应力锚索加固。(4)渗透失稳的系统性风险。活动断裂带成为渗漏主通道。早卡子滩水库左坝肩黄土湿陷等级达IV级,下伏碎石土层渗透系数 $0.0035cm/s$,渗透破坏试验显示临界水力坡降仅 0.78 。采用高压旋喷灌浆形成 $1.2m$ 厚垂直防渗墙后,渗透系数降至 $10^{-6}cm/s$ 量级。

2.2.2 全寿命周期风险的时空演化特性

新疆工程服役期普遍跨越百年尺度,需应对构造活动的长期累积效应:

(1)断层蠕滑位移累积。天山北麓活动断裂年均位移速率 $0.5\sim 1.0mm$,百年累积位移可达 $10cm$ 。阿尔塔什工程通过GPS监测网建立位移预测模型,确认F5断层百年位移量 $8.3cm$,小于面板接缝设计容许值 $15cm$ 。(2)气候变化-构造活动互馈。冰川融水加剧库水位波动,诱发库岸再造与断层活化耦合效应。阿尔塔什水库设计预留 2.5 亿 m^3 库容应对冰川洪水,其水位骤降速率控制需兼顾岸坡稳定与断层应力状态。数值模拟表明,当水位降速超过 $2.5m/d$ 时,F2断层孔隙水压力消散滞后引发有效应力增加,滑移风险提高 22% 。

3 区域构造稳定性分析在选址中的核心作用

3.1 精准规避板块碰撞带活断层直接破坏

新疆地处印度板块与欧亚板块碰撞前沿,活动断裂带呈网状交织,活断层错动风险远超一般区域。区域构造稳定性分析通过多尺度断层精确定年技术与三维应力场模拟,为重大工程划定不可逾越的“地质禁区”。以新疆某世界最高混凝土面板坝工程为例:(1)断层活动性精准判定。对F30断裂实施4个探槽解剖,采用电子自旋共振(ESR)测年技术获取断层泥年龄数据,确认其最新活动时代为晚更新世中期(约7万年),垂直位移速率 $\leq 0.1mm/年$,属弱活动性断层(C级)。(2)应力场活化阈值模拟。基于FLAC3D构建蓄水前后三维地应力场模型,揭示247米高坝水体荷载使库仑应力增加 $0.8\sim 1.2MPa$,导致F30断层滑移倾向性提升 $12\%\sim 18\%$ 。当库水位骤降速率 $> 3m/d$ 时,断层抗剪强度安全系数降至 1.05 以下。(3)工程避让决策。据此将坝轴线向西南偏移 $1.2km$,使坝基完全坐落于完整性系数 > 0.75 的凝灰岩体,并设置水位骤降速率 $\leq 2.5m/d$ 的刚性调度约束。该技术体系使工程

成功避开3条区域性活动断裂,从源头上消除断层错动导致的坝体剪切破坏风险。

3.2 优化高烈度区抗震设计参数

新疆地震基本烈度Ⅷ度以上区域占比超40%,且深厚覆盖层显著放大地震效应。区域构造稳定性分析通过场地相关地震动模型与坝料智能控制技术,推动抗震设计从“烈度设防”向“性能化设计”跨越:(1)定制化地震动谱构建。在新疆某工程(坝高164.8米)中,联合深地震反射剖面与94米覆盖层剪切波速测试,确认场地特征周期达0.45s(基岩仅0.15s)。据此将设计反应谱平台段延长至1.5s,基岩峰值加速度从0.30g校正至0.41g。坝体采用非线性动力时程分析,优化面板接缝止水结构,容许三向变位50mm(常规设计仅30mm)。(2)智能压实抗震增强。大石峡工程首创砂砾石坝料北斗监测系统,32台无人碾压机搭载GNSS定位与压实度传感器,实时反馈填料含水率与干密度。通过动态调控碾压轨迹(重叠率>95%)与激振力,使坝料级配误差≤3%,相对密度>0.85,动剪模量提升至280MPa(常规施工约240MPa),显著改善坝体地震耗能能力。该技术使坝顶震陷量预测值降低35%,成功应对Ⅸ度抗震设防要求。

3.3 防控断裂切割引发的库区链生灾害

新疆水库岸坡普遍受活动断裂切割,蓄水后易触发滑坡涌浪与渗漏失稳。区域构造稳定性分析通过结构面控制型滑坡机制解析与渗流-应力耦合模型,实现灾害精准防控。(1)断裂控制型滑坡预警。在大西沟水库左岸SL10楔形体治理中,三维激光扫描结合地质雷达探测,揭示其受F98与F192断层交切形成双滑面结构,体积达6.6万m³。极限平衡计算表明,蓄水至正常高水位时,地下水浸润线上升使抗滑力下降28%,安全系数从1.35降至1.15。据此采用126根3800kN级预应力锚索实施局部锚固,节约投资2300万元,并减少生态扰动面积1.2公顷。(2)断裂带渗漏系统阻断。针对旱卡子滩水库左坝肩强透水碎石土层,基于三维渗流场模拟揭示集中渗漏路径。采用高压旋喷灌浆形成1.2m厚垂直防渗墙,墙体渗透系数降至10⁻⁶cm/s级,结合下游12口减压井群控制逸出坡降<0.3。渗流量监测显示,处理后日渗流量从2850m³降至62m³,杜绝管涌型渗透破坏风险。

3.4 构建百年尺度全周期风险管控体系

新疆重大工程服役期普遍跨越百年,需应对断层蠕滑累积与气候-构造互馈等长期风险。区域构造稳定性分析通过空天地监测网络与动态预警模型,实现从施工到运营的全周期管控。(1)施工期智能风险调控。大石峡工程集成智慧建造云平台,实时采集1.2万个传感器数据(包括InSAR形变、坝料含水率、碾压遍数

等)。当填筑沉降速率>5mm/d时,系统自动降低填筑强度并调整碾压参数,预警响应时间<2小时,使坝体差异沉降控制在0.29%以内(行业标准≤0.5%)。(2)运营期风险迭代机制。阿尔塔什工程布设642个监测点,通过北斗卫星与微震网络融合数据,构建坝体变形-渗流场-断层活动的多参数预警模型。设定三级响应阈值:当年位移量>8mm或渗流量突变>15%时,启动断层蠕滑速率复核与防渗体系诊断。2023年汛期,系统成功预警F5断层位移加速(0.9mm→1.2mm/年),经调降库水位2.8米后位移恢复常态,避免面板接缝超标变位风险。(3)作用机制闭环。四大核心作用形成“风险规避→设计优化→灾害防控→长效运维”的闭环管控体系。在印度板块持续北向推挤(速率5~10mm/年)的极端环境下,该体系成为新疆重大水利工程不可替代的安全支柱。

4 结束语

区域构造稳定性分析在新疆重大水利工程中的实践,不仅是对地质风险的被动规避,更是对工程生命力的主动塑造。在印度板块持续北向推挤(年速率5~10mm)的强构造背景下,这一分析体系以深部构造探测为盾,抵御板块碰撞的直接冲击;以定量地震模型为刃,劈开高烈度区抗震设计的迷雾;以链生灾害机制解析为网,兜住库区系统安全的底线;以智能监测为脉,贯通百年运维的风险预警。面向“一带一路”水资源战略需求,新疆水利工程正迈向更高难度的战场——青藏高原北缘强隆升区、塔里木盆地超深覆盖层、冰川消融带的水文-构造互馈前沿。唯有持续突破InSAR-深度学习联合反演、渗流-应力-损伤多场耦合、气候-构造互馈定量建模三大技术瓶颈,构建“地质感知神经网络”与“工程智慧中枢”的闭环体系,方能在中亚水塔之上筑起永不溃败的安全丰碑。这不仅是对工程技术的锤炼,更是对人与自然的共生智慧的深刻践行——让每一座大坝都成为大地脉搏的守护者,而非地质悲剧的导火索。

[参考文献]

- [1]黄河,褚程程,翟晓荣,等.“工程地质勘察技术与方法”社会实践教学基地建设研究[J].佳木斯大学社会科学学报,2023,41(5):11.
- [2]刘松良.浅谈水利工程中地质勘察与岩土治理问题探究[J].水上安全,2023,(3):15.
- [3]马士伟.工程地质勘察中水文地质若干问题的探讨[J].资源信息与工程,2017,(5):17.

作者简介:

李泽发(1985--),男,汉族,新疆玛纳斯县人,大学本科,高级工程师,研究方向为工程地质勘察、水文地质勘察。