

复杂地质条件下水电站地下厂房围岩稳定性数值模拟与支护优化

李天超

陕西秦海检测科技有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i11.17510

[摘要] 水电站地下厂房作为能源工程核心,其围岩稳定性对工程安全与效益至关重要。复杂地质下,软弱破碎带、高地应力、岩溶等因素叠加,大幅增加围岩失稳风险。本文以典型复杂地质水电站为案例,系统剖析不同地质条件对围岩稳定性的影响,揭示多因素耦合规律。通过构建三维数值模型,精准预测围岩变形破坏特征,据此优化锚杆、锚索、喷射混凝土等支护参数,并对特殊部位提出加强措施。研究成果为复杂地质围岩稳定控制提供理论与工程参考,提升建设安全与经济性。

[关键词] 复杂地质; 地下厂房; 围岩稳定性; 数值模拟; 支护优化

中图分类号: TV731 文献标识码: A

Numerical Simulation and Support Optimization for Surrounding Rock Stability of Underground Powerhouse in Hydropower Stations under Complex Geological Conditions

Tianchao Li

Shaanxi Qin Hai Testing Technology Co., Ltd.

[Abstract] As the core component of energy projects, the surrounding rock stability of the underground powerhouse in hydropower stations is crucial for project safety and economic benefits. Under complex geological conditions, factors such as weak fractured zones, high in-situ stress, and karst phenomena combine to significantly increase the risk of surrounding rock instability. This paper takes a typical hydropower station under complex geological conditions as a case study, systematically analyzes the impact of different geological conditions on surrounding rock stability, and reveals the coupling mechanisms of multiple influencing factors. By constructing a three-dimensional numerical model, it accurately predicts the deformation and failure characteristics of the surrounding rock. Based on this, it optimizes support parameters, such as rock bolts, anchor cables, and shotcrete, and proposes reinforcement measures for critical areas. The research outcomes provide theoretical and engineering references for surrounding rock stability control under complex geological conditions, enhancing construction safety and economic efficiency.

[Key words] Complex Geology; Underground Powerhouse; Surrounding Rock Stability; Numerical Simulation; Support Optimization

引言

随着我国水电工程向西部复杂地质区推进,地下厂房建设面临的地质挑战愈发严峻。围岩作为厂房天然承载结构,其稳定性是工程安全的关键。复杂地质中,单一地质缺陷(如断层、软弱夹层)即可致围岩变形、塌方,多因素耦合更使失稳风险剧增。近年来,多地水电站地下厂房施工频现围岩大变形、支护失效,造成工期延误与经济损失。为此,亟需探究复杂地质对围岩稳定性的影响机理,利用数值模拟精准预测,优化支护设计。本文聚焦此问题,填补技术空白,为工程提供科学指导。

1 复杂地质条件对水电站地下厂房围岩稳定性的影响

1.1 复杂地质条件概述

水电站地下厂房选址常受地形、水文等多重因素制约,复杂地质条件在此类区域普遍存在,其核心特征表现为地质构造多样、岩性变化剧烈及不良地质体集中分布。这类地质环境是地壳长期构造运动、风化侵蚀及水文作用的综合结果,具体可涵盖软弱破碎围岩区域、高地应力带、岩溶发育区及地下水富集段等多种类型。与常规地质条件相比,复杂地质环境下的岩体完整性差、力学参数波动大,给地下厂房围岩稳定性带来极大不确定性。工程实践表明,复杂地质条件直接决定施工难度、支护成本及工程运营安全,是水电站地下厂房建设必须优先攻克的技术难题,需结合具体地质勘察数据进行针对性分析。

1.2 不同地质条件对围岩稳定性的影响机制

1.2.1 软弱破碎围岩

软弱破碎围岩主要由断层破碎带、蚀变岩及风化夹层等组成,其显著特点是岩体结构松散、胶结程度低,抗压强度仅为完整岩体的10%~30%,抗拉强度更弱。在地下厂房开挖过程中,原有应力平衡被打破,软弱破碎围岩难以承受卸荷应力,易发生塑性变形。此类围岩的变形具有时间效应,初期表现为表层岩体剥落,随时间推移逐渐发展为塌方或冒顶。同时,软弱破碎带还会成为地下水渗透的通道,进一步降低岩体力学性能,形成“变形-渗水-强度降低”的恶性循环,严重威胁地下厂房施工安全,需在开挖后及时采取支护措施控制变形^[1]。

1.2.2 高地应力

高地应力是深部或构造活跃区域地下厂房面临的典型地质问题,通常指岩体初始应力超过20MPa的地质环境。在高地应力条件下,地下厂房开挖后,围岩会因应力释放产生强烈的弹塑性变形,具体表现为硬岩易发生脆性破裂,如岩爆现象,软岩则出现持续的塑性挤出。岩爆发生时,岩体以突然、猛烈的方式释放能量,对施工设备和人员造成致命威胁;而软岩的塑性挤出会导致厂房断面缩小,影响结构施工与后期运营。高地应力对围岩的影响与岩体岩性密切相关,硬岩的脆性破坏具有突发性,软岩的塑性变形则具有持续性,需采取差异化控制措施。

1.2.3 岩溶发育

岩溶发育区因碳酸盐岩经地下水长期溶蚀,形成溶洞、溶沟、暗河等特殊地质形态,给地下厂房围岩稳定性带来多方面影响。首先,溶洞的存在破坏岩体完整性,使围岩形成局部应力集中区,在开挖扰动下易发生塌落;其次,大型溶洞可能导致厂房基础承载力不足,影响整体结构稳定性;再者,岩溶系统往往与地下水连通,溶洞突水突泥事故时有发生,不仅影响施工进度,还可能引发地质灾害。岩溶发育的随机性和复杂性增加了工程勘察难度,部分隐蔽溶洞在施工中才被发现,给围岩稳定控制带来极大挑战,需结合超前地质预报技术提前探明分布情况。

1.2.4 地下水丰富

地下水丰富区域的地下厂房,围岩稳定性会因水的物理化学作用显著降低。从物理作用来看,地下水在岩体裂隙中形成静水压力,抵消部分岩体抗剪强度,同时软化岩体结构面,使裂隙张开度增大;从化学作用来看,地下水会溶解岩体中的可溶性矿物,破坏岩体胶结结构,导致力学性能劣化。在施工过程中,地下水的渗出会使围岩表层岩体饱和,引发剥落、滑塌等问题;当遭遇断层破碎带时,还可能出现大规模涌水,造成基坑淹没。地下水的动态变化还会导致围岩应力状态持续改变,增加稳定性控制的复杂性,需将排水与支护协同考虑。

2 多种复杂地质条件耦合作用下的围岩稳定性

多种复杂地质条件的耦合作用,对水电站地下厂房围岩稳定性的影响远大于单一因素的简单叠加,形成更为复杂的灾害机理。以软弱破碎围岩与地下水耦合为例,软弱岩体本身力学性

能差,地下水的渗透会进一步降低其黏聚力和内摩擦角,使岩体从“松散”向“流塑”状态转变,围岩变形速率较单一因素时提升3~5倍,且易引发大规模塌方。高地应力与岩溶发育耦合时,高地应力使岩体处于高度受压状态,而溶洞的存在导致应力集中效应加剧,在溶洞周边易形成拉应力区,加速岩体开裂,同时应力释放可能诱发溶洞突水^[2]。实际工程中,常见“软弱破碎带+高地应力+地下水”的三重耦合模式,此时围岩不仅承受卸荷应力与静水压力,还因岩体破碎导致应力传递路径紊乱,易出现支护结构超载破坏,需建立耦合作用下的稳定性评价体系。

3 水电站地下厂房围岩稳定性数值模拟方法

3.1 数值模拟方法概述

数值模拟技术凭借其高效、精准的优势,已成为复杂地质条件下围岩稳定性分析的核心手段,常用方法包括有限元法(FEM)、离散元法(DEM)及边界元法(BEM)等。有限元法适用于模拟岩体连续变形过程,能精准计算围岩应力应变分布,在均质或弱破碎岩体分析中应用广泛;离散元法则聚焦于岩体离散颗粒间的相互作用,对软弱破碎围岩的塌落、滑动等非连续变形模拟效果更佳;边界元法通过求解边界积分方程简化计算,在大范围地质模型分析中具有效率优势。不同方法各具适用场景,实际应用中需结合地质条件特点选择,如硬岩高地应力区优先采用有限元法模拟岩爆,软弱破碎带则选用离散元法。近年来,多方法耦合模拟成为趋势,可实现对复杂地质耦合作用的全面刻画。

3.2 数值模型的建立

数值模型的建立需以详细的地质勘察数据为基础,确保模型能真实反映工程地质条件,主要包括四个关键环节。首先是地质建模,通过钻孔勘探、物探及地质编录等手段,获取岩体分布、断层位置、溶洞形态等数据,采用三维建模软件构建包含各类不良地质体的精细化模型,模型范围通常取厂房尺寸的3~5倍以消除边界效应。其次是参数确定,通过室内岩石力学试验获取岩体抗压强度、弹性模量等基本参数,结合现场原位测试结果进行修正,针对软弱破碎带等特殊区域需单独设定参数。然后是边界条件设置,根据地质背景施加初始地应力、地下水压力等荷载,约束模型底部及侧面位移,顶部按上覆岩层重量施加均布荷载。最后是开挖与支护模拟,采用“分步开挖、及时支护”的原则,模拟实际施工工序,确保模型与工程实践一致。

3.3 数值模拟结果分析

数值模拟结果分析需围绕围岩稳定性核心评价指标展开,实现定性定量相结合的综合判断。定量分析主要关注应力、位移、塑性区三大指标:应力分析重点查看最大主应力、最小主应力分布,识别应力集中区域及拉应力区,当拉应力超过岩体抗拉强度时需警惕开裂风险;位移分析通过监测厂房周边围岩的竖向及水平位移,明确变形最大值及影响范围,若位移速率持续增大则表明围岩处于不稳定状态;塑性区分析则判断岩体发生塑性变形的区域,塑性区贯通是围岩失稳的重要前兆。定性分析需结合工程经验,解读模拟结果反映的地质灾害演化趋势,如高地应力区出现“应力突变+局部塑性区集中”可能预示岩爆。同

时,需将模拟结果与现场监测数据对比,修正模型参数以提升分析精度,为支护优化提供可靠依据^[3]。

4 水电站地下厂房支护优化设计

4.1 基于数值模拟的支护参数优化

4.1.1 锚杆支护参数优化

锚杆支护通过将表层岩体与深部稳定岩体锚固,形成联合承载结构,其参数优化需结合数值模拟结果针对性调整。首先是锚杆长度,模拟结果显示,当围岩塑性区深度为3m时,锚杆长度需超过塑性区0.5-1m才能有效控制变形,软弱破碎带中需进一步加长至塑性区2倍;锚杆直径需根据锚固力需求确定,通过模拟不同直径锚杆的应力传递效果,当锚杆直径从22mm增至25mm时,锚固区域承载能力提升约20%,但直径过大易导致施工困难,需平衡性能与经济性。锚杆间距优化以“无应力盲区”为原则,通过模拟不同间距下围岩位移分布,在高地应力区间距控制在1.5-2m,软弱破碎带缩小至1-1.2m。此外,锚杆倾角需与岩体主体结构面呈较大角度,模拟验证倾角为15°-30°时锚固效果最佳,可有效限制结构面滑动。

4.1.2 锚索支护参数优化

锚索支护凭借其大锚固力优势,在高地应力、大跨度厂房围岩控制中不可或缺,其参数优化聚焦于锚固深度、预应力及间距。锚固深度需基于数值模拟的应力传递范围确定,深部锚固段必须嵌入完整岩体,模拟表明当锚固深度达到厂房跨度1/3时,锚索能有效传递表层围岩荷载,在高地应力区需增加至1/2;预应力值需通过模拟优化避免过大或过小,预应力不足会导致锚索过早失效,过大则可能压裂岩体,通常取岩体抗压强度的30%-40%。锚索间距需结合锚固范围叠加效应,模拟显示间距为4-6m时锚固区域相互衔接,形成连续承载带,在溶洞周边等应力集中区需将间距缩小至3m以内。同时,锚索的布置需与锚杆协同,形成“锚杆控表层、锚索控深部”的支护体系。

4.1.3 喷射混凝土支护参数优化

喷射混凝土作为表层支护手段,能及时封闭岩体裂隙、防止风化,其参数优化包括厚度、强度等级及配合比。混凝土厚度需根据围岩破碎程度通过模拟确定,完整岩体中厚度取5-10cm即可满足需求,软弱破碎带中需增至15-20cm,模拟验证当混凝土厚度达到裂隙发育深度的1.5倍时,能有效阻止裂隙扩展;强度等级需与围岩承载要求匹配,C20混凝土适用于常规地质,高地

应力区需提升至C25-C30,通过模拟不同强度混凝土的应力分布,确保混凝土不发生压溃破坏。配合比优化需兼顾强度与施工性,掺入速凝剂可缩短凝结时间,在地下水丰富区需增加防水剂掺量,模拟显示优化后的喷射混凝土与岩体黏结强度提升25%,有效增强表层支护效果^[4]。

4.2 特殊地质部位的加强支护措施

特殊地质部位是围岩稳定性控制的薄弱环节,需结合数值模拟揭示的风险特征采取加强支护措施。对于厂房顶拱软弱破碎带,模拟显示该区域易发生冒顶,需采用“超前小导管注浆+格栅钢架+双层喷射混凝土”组合支护,超前小导管深入破碎带3-5m形成注浆加固圈,格栅钢架间距缩小至0.8m,双层喷射混凝土分别采用C25和C30等级,有效提升顶拱承载能力。厂房边墙与断层交汇部位,因应力集中易出现滑动,采用“锚杆+锚索+混凝土挡墙”联合支护,锚杆与锚索呈交叉布置,混凝土挡墙嵌入断层两侧完整岩体,模拟验证该措施可使边墙位移量减少60%以上。溶洞周边区域需先进行充填灌浆处理,再布设加密锚索,灌浆材料采用水泥-水玻璃双液浆,凝固时间控制在30min内,确保快速形成承载结构,避免应力集中引发灾害。

5 结束语

复杂地质水电站地下厂房围岩稳定控制是涵盖地质分析、数值模拟与支护设计的系统工程。本文剖析了单一及耦合地质条件对围岩稳定性的影响,明确核心风险点;借助数值模拟构建精细化模型,精准预测围岩变形与破坏特征;基于模拟结果优化支护参数,针对特殊地质提出加强措施,形成完整技术体系。实践表明,“地质勘察-数值预测-支护优化”路径可有效降低工程风险,提升建设安全与经济性。未来结合智能化监测实现动态调整,将为水电工程高质量发展提供更强支撑。

[参考文献]

- [1]汤艳春.地质强度指标对白鹤滩水电站地下厂房围岩稳定性的影响研究[J].水电能源科学,2022,40(10):140-143.
- [2]童政,俞钟杰.白鹤滩水电站蓄水过程对左岸地下厂房围岩稳定性影响评价[J].中国农村水利水电,2025(4):210-218.
- [3]叶文.水电站地下厂房洞室围岩稳定性监测与分析[J].低碳世界,2019,9(12):118-119.
- [4]陈铭.哈德布特水电站地下厂房施工期洞室围岩稳定性分析及处理措施[J].广东水利水电,2022(10):52-57.