

水电站坝基岩体质量评价与开挖边坡稳定性预测

于帅印

浙江华东岩土勘察设计研究院有限公司 浙江 杭州 310030

摘要: 本文聚焦水电站坝基岩体质量评价与开挖边坡稳定性预测。先阐述坝基岩体工程地质特征,包括地质构造、水文地质等方面;接着介绍岩体质量评价指标体系、分级方法及综合评价;然后分析边坡地质条件、变形破坏模式,进行稳定性定性及定量评价;最后探讨边坡稳定性预测方法,如基于监测数据、人工智能的预测等,为水电站坝基工程提供技术支持。

关键词: 水电站;坝基岩体;质量评价;边坡稳定性

引言: 水电站建设关乎能源供应与区域发展,坝基岩体质量与开挖边坡稳定性至关重要。坝基岩体质量影响建基面选择与基础处理,开挖边坡稳定性关乎施工及运营安全。本文深入探讨水电站坝基岩体工程地质特征,系统开展岩体质量评价,分析开挖边坡稳定性并研究预测方法,旨在为水电站坝基工程设计与施工提供科学依据,保障工程安全稳定运行。

1 坝基岩体工程地质特征

1.1 坝址区地质与构造特征

坝址区地质与构造特征是坝基工程地质研究的首要内容,主要包括地层岩性分布、地质构造发育及地形地貌特征三个核心方面。现场勘察表明,坝址区多位于构造活动相对稳定的区域,出露地层以沉积岩、岩浆岩或变质岩为主,如侏罗系流纹质凝灰熔岩、中元古界变质片岩等,岩性整体较坚硬,但局部存在岩性夹层及软弱岩层。构造方面,主要发育区域性断裂、次级断层及节理裂隙,断裂带多充填糜棱岩、碎裂岩等软弱物质,带宽可达数十至百余米,节理裂隙的产状、间距及连通率直接影响岩体完整性。地形地貌上,坝址多处于河谷地貌,两岸地形陡峻,河谷多呈“V”形或“U”形展布,地表基岩多裸露,第四系覆盖层分布范围较小,这些特征共同决定了坝址区岩体的结构完整性及工程地质条件优劣。

1.2 水文地质与风化卸荷特征

坝址区水文地质与风化卸荷特征是影响坝基岩体稳定性的重要因素,直接关系到坝基防渗设计及岩体力学性能。水文地质方面,主要分为孔隙水、裂隙水及岩溶水三类,地下水补给主要来自大气降水及地表水渗透,排泄方式以地下径流、蒸发及泉涌为主,地下水水位受季节变化影响明显,其渗透性与岩体裂隙发育程度、岩性组合密切相关,强风化带及断裂破碎带为地下水主要渗

透通道^[1]。风化卸荷方面,岩体风化以物理风化为主,局部伴随化学风化,按风化程度可分为强风化、弱风化及微新岩体,强风化带岩体破碎、强度低,弱风化带岩体完整性较好,卸荷带主要分布于坝肩两岸,水平深度可达数十至百余米,卸荷形式主要有缓剪陡张型、引张型及整体松弛膨胀型,导致岩体裂隙张开、强度降低,需重点关注其分布范围及工程影响。

1.3 地应力场特征

地应力场是坝基岩体所处的天然应力环境,其分布特征直接影响坝基岩体变形、破坏及工程支护设计,主要通过水压致裂法、应力解除法等原位测试手段进行研究。坝址区地应力场主要受区域构造运动控制,多以水平应力为主,主应力关系一般表现为最大水平主应力大于垂直主应力大于最小水平主应力,属于走滑应力状态,最大水平主应力方向与区域主压应力方向一致,主要受板块挤压及构造旋转影响。地应力大小随深度呈线性增长,在坝基及地下洞室埋深范围内,主应力值分布在数兆帕至十余兆帕之间,局部构造破碎带附近地应力分布不均。另外,地应力场分布还与地形地貌、岩体岩性及构造发育程度相关,不合理的工程开挖会导致地应力释放,引发岩体变形或破坏,需准确掌握其分布规律以优化工程设计。

2 水电站坝基岩体质量评价

水电站坝基岩体质量评价是工程设计与施工的关键环节,核心是通过科学的评价指标体系及分级方法,对坝基岩体的工程地质性能进行全面、系统的评估,为建基面选择、基础处理方案制定及工程安全保障提供依据。

2.1 岩体质量评价指标体系与分级方法

岩体质量评价指标体系与分级方法是坝基岩体质量评价的核心,指标体系需全面反映岩体的工程地质特性,主要包括岩体完整性指标、力学强度指标、渗透性指标及

风化卸荷指标四大类。完整性指标主要有岩体完整性系数、RQD值等,力学强度指标包括岩石单轴饱和抗压强度、岩体变形模量等,渗透性指标主要为渗透系数,风化卸荷指标则反映岩体风化程度及卸荷状态^[2]。常用分级方法主要有BQ分级法、RMR分级法、Q分类法等,同时结合可拓理论、灰色理论等系统理论,根据《水利水电工程地质勘察规范》,将岩体质量划分为不同等级,明确各级岩体的特征值及工程性质。分级过程中需结合现场实测数据,对指标进行无量纲处理,确保评价结果的科学性、准确性及实用性。

2.2 多种分级方法综合对比与力学参数确定

多种分级方法综合对比与力学参数确定是提升坝基岩体质量评价准确性的关键,不同分级方法基于不同的评价原理及指标体系,存在各自的优势与局限性。BQ分级法注重岩体基本质量指标,操作简便、适用性广;RMR分级法综合考虑岩体结构、强度及地下水等因素,评价更全面;Q分类法侧重岩体裂隙特征及水力学条件,适用于裂隙发育岩体。通过综合对比不同方法的评价结果,结合坝址区岩体实际地质条件,分析各方法的适用性及偏差,筛选出最贴合工程实际的分级方法。同时结合室内试验及原位测试数据,通过回归分析、数值模拟等手段,确定不同质量等级岩体的抗压强度、抗剪强度、变形模量等力学参数,为坝基工程设计、稳定性计算及基础处理提供精准的参数支撑。

2.3 坝基岩体质量综合评价

坝基岩体质量综合评价需在指标体系构建、分级方法对比及力学参数确定的基础上,结合坝址区地质构造、水文地质及风化卸荷特征,对坝基岩体质量进行全面整合与综合判断。评价过程中,需明确不同质量等级岩体的空间分布范围,重点分析强风化带、断裂破碎带等不良地质体的分布及对坝基稳定性的影响,划分出适宜作为建基面的岩体范围。结合工程实际需求,对各区域岩体的工程适应性进行评价,明确需进行基础处理的区域及处理方式,如固结灌浆、防渗帷幕等。综合评价需兼顾科学性与实用性,既反映岩体的客观工程地质特性,又结合水电站坝体受力特点,为建基面选择、基础处理方案优化及工程安全评估提供全面、可靠的评价结论,保障坝基工程安全稳定。

3 水电站坝基开挖边坡稳定性分析

水电站坝基开挖边坡稳定性分析是坝基工程施工及运营期间的重要安全保障工作,核心是通过分析边坡地质条件、变形破坏模式,采用定性与定量相结合的方法,评价边坡稳定性,确定安全系数及评价标准,为边坡开

挖、支护设计及安全监测提供依据。

3.1 边坡地质条件与变形破坏模式

边坡地质条件是决定边坡稳定性的基础,主要包括边坡岩体岩性、地质构造、风化卸荷状态及地下水条件。边坡岩体多为坝址区出露的基岩,岩性差异较大,中硬岩及坚硬岩边坡稳定性相对较好,软弱岩层及夹层易引发边坡变形^[3]。地质构造方面,节理裂隙、断层等软弱结构面控制边坡变形破坏,缓倾角结构面易形成滑动面,陡倾角结构面则易导致岩体倾倒。风化卸荷方面,边坡表层岩体风化卸荷强烈,形成松动带,岩体强度降低、裂隙张开,加剧边坡不稳定性。地下水的渗透作用会降低岩体抗剪强度,增加边坡下滑力。常见的变形破坏模式主要有滑移拉裂、阶梯式滑移拉裂、脆性倾倒变形及压缩倾倒变形,不同模式的形成与边坡地质条件密切相关,需结合现场勘察明确其具体类型及特征。

3.2 边坡稳定性定性与定量评价

边坡稳定性定性与定量评价是边坡稳定性分析的核心环节,二者相辅相成、缺一不可。定性评价主要基于边坡地质条件、变形破坏迹象及工程经验,通过分析岩体岩性、构造发育、风化卸荷程度、地下水作用及边坡形态,判断边坡的稳定性状态,识别可能发生的变形破坏模式,常用方法有工程地质类比法、赤平投影法等。定量评价则通过建立力学模型,结合岩体力学参数,采用极限平衡法、数值模拟法等计算边坡稳定性安全系数,量化边坡稳定程度。极限平衡法适用于简单边坡的稳定性计算,操作简便;数值模拟法可模拟边坡应力、变形分布特征,适用于复杂地质条件下的边坡评价。通过定性与定量评价相结合,全面、准确判断边坡稳定性,为后续支护设计及安全防控提供科学依据。

3.3 稳定性评价标准与安全系数

边坡稳定性评价标准与安全系数是判断边坡安全状态、指导工程设计的核心依据,需结合水电站工程等级、边坡重要性及地质条件,遵循相关规范要求确定。评价标准主要根据边坡变形破坏的可能性及危害程度,划分稳定、基本稳定、欠稳定及不稳定四个等级,明确不同等级边坡的防控要求。安全系数是衡量边坡稳定性的量化指标,指边坡抗滑力与下滑力的比值,其取值需综合考虑工程安全等级、岩体力学参数的不确定性、施工扰动及运营期间的各种不利因素。对于水电站坝基开挖边坡,安全系数取值一般不低于1.3,重要边坡需适当提高取值标准。同时需结合边坡监测数据,动态调整安全系数及评价标准,确保评价结果贴合工程实际,保障边坡工程安全。

4 边坡稳定性预测方法

边坡稳定性预测是水电站坝基开挖边坡安全防控的关键手段,核心是通过科学的预测方法,提前预判边坡变形发展趋势,及时发现安全隐患,为工程防控及应急处置提供依据。

4.1 基于监测数据的预测方法

基于监测数据的预测方法是边坡稳定性预测的传统且常用方法,核心是通过布设监测设备,实时采集边坡位移、沉降、应力、地下水水位等监测数据,结合数据变化规律,预判边坡变形发展趋势。常用的监测手段包括GPS监测、测斜仪监测、声波监测及地下水监测等,传统监测方法精度较高但成本较高、覆盖范围有限,InSAR遥感技术结合多源数据融合,可实现大范围、高精度监测,但受植被及大气条件限制。预测方法主要有趋势分析法、回归分析法、时间序列分析法等,通过对监测数据进行拟合、分析,建立监测数据与边坡变形的关联关系,预测边坡未来变形状态,及时发出预警信号。该方法数据直观、可靠性强,是边坡稳定性动态预测的基础。

4.2 基于人工智能的预测方法

基于人工智能的预测方法是近年来边坡稳定性预测的研究热点,凭借其强大的非线性拟合、自主学习及模式识别能力,有效解决了传统预测方法难以处理的复杂地质条件下的边坡预测问题。常用的人工智能方法包括人工神经网络、卷积神经网络(CNN)、长短期记忆网络(LSTM)、支持向量机等,通过构建预测模型,将边坡地质参数、监测数据作为输入变量,边坡稳定性状态作为输出变量,通过大量样本训练优化模型参数,提升预测精度。例如,基于贝叶斯优化的CNN-LSTM组合模型,可有效避免过拟合,提高模型训练效率及泛化能力,预测准确率可达90%以上。该方法适用于地质条件复杂、影响因素多的边坡,可实现边坡稳定性的精准预测。

4.3 不确定性分析方法

边坡稳定性预测过程中,存在诸多不确定性因素,主要包括岩体力学参数的随机性、地质条件的复杂性、监测数据的误差及施工扰动的不确定性等,这些因素会影响预测结果的准确性,因此需采用不确定性分析方法对预测结果进行修正。常用的不确定性分析方法包括蒙特卡洛模拟法、模糊数学法、云模型法等,其中云模型可

实现定性概念与定量数值之间的不确定转换,有效处理预测过程中的模糊性与随机性^[4]。通过不确定性分析,可量化各不确定因素对预测结果的影响程度,确定预测结果的置信区间,提升预测结果的可靠性。结合熵值法、优序图法等赋权方法,可进一步优化不确定性分析过程,为边坡稳定性预测及防控决策提供更科学的依据。

4.4 综合预测模型建立

综合预测模型建立是提升边坡稳定性预测精度及时效性的关键,核心是整合基于监测数据、人工智能及不确定性分析的各类预测方法,结合边坡地质条件及工程实际需求,构建多方法融合的综合预测模型。模型建立过程中,需首先梳理边坡影响因素,筛选关键预测指标,整合监测数据、地质勘察数据及室内试验数据,建立完善的预测数据库。其次,结合各单一预测方法的优势,将监测数据预测方法作为基础,人工智能方法作为核心,不确定性分析方法作为修正,通过权重分配、模型融合,实现各方法的优势互补。最后,通过工程案例验证模型的可靠性,优化模型参数,确保模型能够准确预判边坡变形发展趋势,及时识别安全隐患,为边坡工程安全防控提供全面、精准的技术支撑。

结束语

水电站坝基岩体质量评价与开挖边坡稳定性预测是复杂且关键的工作。通过全面研究坝基岩体工程地质特征,构建科学评价指标体系,综合多种分级方法,能准确评价岩体质量。深入分析边坡地质条件与变形破坏模式,结合定性定量评价,可有效评估边坡稳定性。同时多种预测方法各有优势,综合预测模型能提升预测精度,为水电站坝基工程安全提供有力保障。

参考文献

- [1]谭朝爽,杜华冬,陈金龙,等.旭龙水电站坝基岩体质量验收控制标准研究[J].水利水电快报,2024,45(5):20-25.
- [2]杨彦军.铁城水电站坝基岩体固结灌浆试验研究[J].甘肃水利水电技术,2021,57(5):61-65.
- [3]刘士奇,周勇,褚卫江,王环玲.不同工况条件下倾倒岩体边坡变形机理及稳定性研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2025,42(01):50-57.
- [4]杨昌兴.蓄水过程中水电站坝基稳定性分析[J].陕西水利,2023,(07):12-14.