

水利水电工程库区高边坡稳定性分析及综合治理技术研究

郑晓瑞

中核大地生态科技有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i1.22223

[摘要] 水利水电工程库区高边坡稳定影响枢纽建筑物安全、库岸居民生命财产以及水库长期发挥效益。由于库水位变化频繁、地质条件复杂、降雨入渗以及人为干扰等多种因素综合作用下造成高边坡失稳具有明显的时空演变规律。对库区高边坡稳定进行总结归纳其影响因素主要包括地质条件、水-岩相互作用、应力场变化以及时间效应等方面。然后阐述极限平衡法、数值分析方法和不确定性分析方法各自优缺点。最后给出包括主动防护、被动支挡、排水疏干、生态加固与智能化监测预警等综合措施,并提出以“防-治-监”为主的思想。认为今后高边坡治理需结合数字孪生及人工智能等新技术,使高边坡由原来的被动应对转变为积极预防。

[关键词] 水利水电工程; 库区高边坡; 稳定性分析; 综合治理

中图分类号: TV223.3 **文献标识码:** A

Research on Stability Analysis and Comprehensive Treatment Technologies for High Slopes in Reservoir Areas of Water Conservancy and Hydropower Projects

Xiaorui Zheng

CNNC Dadi Ecological Technology Co., Ltd.

[Abstract] The stability of high slopes in reservoir areas of water conservancy and hydropower projects directly affects the safety of hydraulic structures, the lives and property of residents along reservoir banks, and the long-term benefits of reservoirs. Due to the combined effects of frequent fluctuations in reservoir water levels, complex geological conditions, rainfall infiltration, and human disturbances, the instability of high slopes exhibits significant spatial and temporal evolutionary characteristics. This paper summarizes the major factors influencing the stability of high slopes in reservoir areas, including geological conditions, water-rock interactions, changes in stress fields, and time effects. It then discusses the advantages and disadvantages of the limit equilibrium method, numerical analysis methods, and uncertainty analysis methods. Finally, comprehensive measures are proposed, including active protection, passive retaining, drainage and dewatering, ecological reinforcement, and intelligent monitoring and early warning, with an emphasis on the principle of “prevention-treatment-monitoring.” It is suggested that future high-slope treatment should integrate emerging technologies such as digital twins and artificial intelligence to shift high-slope management from passive response toward proactive prevention.

[Key words] water conservancy and hydropower engineering; high slopes in reservoir areas; stability analysis; comprehensive treatment

引言

我国西南及西部高山峡谷地区分布有大量的已建、在建以及规划中的大型水电站,这些水电站库区岸坡的高度常在一两百米甚至达到几百米,地形非常陡峭,地质条件也十分差。高边坡稳定性是影响这类工程的安全性和寿命的重要地质力学问题。而随着水电开发向高海拔、深切河谷的发展,高边坡所面临的问题也越来越严重。库区高边坡不同于一般的工程边坡之处

在于一方面库水位的变化导致坡体内渗流水力条件及应力状态发生改变从而削弱岩体中结构面的抗剪强度;另一方面由于库区蓄水使得坡脚被淹没而使浮托力减小而有效应力增大并且对软弱夹层起软化作用;此外还有诸如地震或者暴雨之类的外加载荷都可能对高边坡产生不利的影响。因此研究库区高边坡失稳机理并针对这种特殊的工程制定相应的稳定分析技术和综合防治措施就显得尤为重要。

1 库区高边坡失稳机理与主控因素

1.1 地质结构控制效应

库区高边坡稳定主要取决于其本身所处的地质条件。岩性组合、层理产状、断层破碎带、节理裂隙发育程度以及软弱夹层分布情况决定了边坡变形的基础条件。顺层边坡中,如果层面倾斜角度小于坡度但是大于结构面内部摩擦角,则会发生顺层滑动;而反倾边坡主要表现为倾倒变形,逐渐发展到深处。另外,古滑坡体或者堆积物等地质不良现象,在水库水的作用下重新活化几率很大。由于地质条件不均匀性和各向异性造成应力传递路径较复杂,在局部应力集中位置容易出现失稳前兆。

1.2 库水位波动的水-力耦合效应

库水位周期性升降是库区高边坡不同于一般边坡主要水文条件。水库蓄水初期,边坡从天然非饱和状态变为完全饱和,基质吸力消失,抗剪强度降低;水位骤降过程中,边坡内部孔隙水压力滞后外界水压力,产生朝向坡外方向动态渗流,对边坡起到推动作用。这股力对边坡的影响一方面是改变了有效应力场,另一方面由于化学溶蚀以及物理冲刷而使得结构面进一步弱化^[1]。水位变化幅度越大,频率越高,则边坡内超静孔隙水压力积累程度就越严重,边坡失稳的速度也越快。

1.3 工程开挖与荷载扰动

枢纽建设过程中大范围开挖卸荷使得坡体原有应力场发生变化,在坡面上形成拉应力区,卸荷裂隙发育,岩体完整性降低,另外,坝体自重、车辆荷载以及施工堆载等因素对坡体产生附加压力,进一步改变坡体应力状态。开挖面裸露新鲜岩体处于大气中,风化速度加快,特别是含有膨胀性矿物岩石,在干湿循环作用下发生较大胀缩变形,促进裂缝发展连通。

1.4 时效变形与渐进破坏特征

库区高边坡失稳不是瞬间发生的事情,而是需要经历几年甚至几十年的时间逐步发展而成的过程。蠕变试验以及现场监测也表明,软弱结构面存在明显的流变性,在一定应力作用下会不断地发生剪切蠕变变形。当变形达到一定程度之后,就会出现局部破坏,这些破坏部位相互连接形成贯通型滑动面而导致整个边坡失稳。这也就体现了其时程相关性,因此对于其稳定性进行评估应考虑其在整个服役期间所发生的变化,而不能仅仅只看其最初的状态。

2 高边坡稳定性分析方法

2.1 极限平衡法及其适用条件

极限平衡法是目前工程中最常用的稳定性定量分析的方法,它是基于一定的假设,如滑动面为圆形、折线形或者复合型,将整个边坡分成若干部分,根据静力平衡求出的安全系数。主要有瑞典圆弧法、毕肖普法、简布法以及摩根斯坦-普赖斯法等。这种方法简单明了,便于操作,可以很快得到一个结果。但是也有很大的缺点就是需要事先确定滑动面的位置及其形状,不能反映坡体内真实的应力-应变状态;不能适用于非均质、各向异性以及复杂的边界条件;对于库水位变动引起的不稳定渗流考虑不够充分。所以极限平衡法只能用来进行初步判断或者是方案

的选择,在进行精确的设计中应当结合其他方法使用。

2.2 数值分析方法体系

数值分析方法可以考虑岩土材料非线性本构关系、复杂几何形态以及多种场相互作用等因素,目前已成为研究高边坡主要手段。有限元法(FEM)能够解决连续介质变形和应力问题,可用于分级开挖、分步注水等施工过程模拟,还可以用强度折减法得到边坡稳定性安全系数而不需要假定潜在滑动面。有限差分法(FDM)适合于大位移和动态响应计算,在崩塌、碎屑流等地质灾害发生后运动过程模拟上应用广泛。而离散元法(DEM)能描述节理岩体不连续变形、块体滑移、转动等现象,在裂隙发育丰富库岸边坡上应用较好^[2]。此外,近年来边界元法、数值流形法也在一定范围内取得良好效果。但是应该注意的是数值分析结果正确与否很大程度上取决于所采用本构关系参数、边界条件、初始应力场是否合理,而库区岩体参数又难以准确获得,因此需要进行反演来加以约束。

2.3 不确定性分析方法

库区高边坡系统自身固有的随机性(岩土体性质的空间变异性)、模糊性(失稳判据的边界模糊)以及认识上的不确定性(勘察资料不足)是造成其稳定性的不确定因素,在此基础上进行的概率分析方法如蒙特卡洛模拟、一次二阶矩法,把物理参数当作随机变量求出失稳概率以及可靠度,用于指导工程实践;模糊综合评判法利用隶属度解决多因素分级评价中边界模糊的问题;证据理论和区间分析方法适合于小样本或者缺少信息的情形。不确定性分析不能单独作为一种方法存在,而应该与其他确定性分析相结合形成一个完整的稳定性评价体系。

2.4 多尺度与多场耦合分析策略

库区高边坡行为跨越微观(颗粒),细观(裂隙面)到宏观(边坡整体)不同尺度并且存在渗流场、应力场、温度场和化学场之间相互影响的关系。多尺度研究目的在于寻求不同尺度间的信息传递途径,如利用均匀化的方法把细观裂隙发展过程反映到宏观本构关系中去。而多场耦合则是指对水-力(H-M)、热-水-力(T-H-M)或者化学-力学(C-M)等耦合方程进行求解。但是目前的问题是这些耦合模型难以得到试验支持而且计算量很大,在工程应用上一般采取简化处理,即解耦或者部分耦合的方式。

3 综合治理技术体系

3.1 主动防护与源头控制技术

主动防护主要是针对边坡本身力学条件进行处理,以减少造成失稳外力作用。坡面处理主要包括清除危石、削坡减重以及坡面防护(喷锚、格构护坡等)防止局部不稳定体发展以及坡面风化。地下排水也是主动防护一种重要方式,在边坡内部布置排水洞、排水孔幕或者排水井,降低坡体内水位,降低孔隙水压力,提高边坡稳定性,对于水库高水位以下区域可以采用防渗铺盖或帷幕灌浆减小水位变化对边坡影响^[3]。主动防护一般应在工程初期完成,费用较低而且与周围环境相协调,但是需要确定主要致灾因素。

3.2 被动支挡与加固结构

当边坡天然稳定性不足或主动措施受到限制的情况下,需要利用支挡构筑物提供额外外力。抗滑桩由于其布置方便、抗力集中而被广泛使用,桩型有普通钢筋混凝土桩、预应力锚索桩以及微型桩群等,在设计中应合理确定桩位、桩距及嵌固长度。锚固工程采用预应力锚索或者锚杆将坡体内不稳定部分锚固到较深处稳定岩石上,通过施加预应力增加结构面对应处法向压力进而提高其抗剪强度,是处理深部滑坡的一种有效方法。挡土墙(重力式、悬臂式、扶壁式)可用于坡脚下部支挡,但是不能过高;支撑盲沟及抗滑键等组合形式也可根据实际情况选用。被动支挡设计应以“强脚固腰”为原则,使支挡构筑物与坡体共同工作,防止由于二者刚度差异造成额外位移。

3.3 生态防护与绿色治理技术

生态防护注重工程安全以及生态环境保护,是绿色发展理念在边坡治理上的应用。植被护坡利用植物根系固定土壤、叶片拦截雨水以及蒸腾降低坡面水分含量,适合于坡度较小、岩石较为稳定的边坡。厚层基材喷播、客土挂网以及植生袋等方法已经应用于高陡岩质边坡上。生态与工程措施相结合的方式有生态型格构锚固、植被混凝土以及柔性防护网+攀缘植物等。但需要注意的是,生态防护具有长期性,不能单独使用,应配合工程措施使用并且要选择适合当地生长、抗旱性强、根系发达的本土植物。

3.4 智能监测与预警预报系统

监测是对治理效果进行检验的方法同时也是对治理过程进行控制的基础。库区高边坡监测内容包括表面位移(GNSS、全站仪)、深层位移(测斜仪、TDR)、地下水位(渗压计)、锚固力(锚索测力计)以及地声(微震监测)等多种物理量。随着物联网以及人工智能的发展,监测逐渐走向自动化、实时化以及智能化。而基于监测结果建立的各种预警方法有阈值法、统计预测方法(例如时间序列分析)以及机器学习方法(支持向量机、长短时记忆网络),其中后者的优点在于其可以更好地发现非线性的变化规律^[4]。一个好的预警系统应该是具有自我学习能力,在接收到新的信息之后可以自动更新自己的阈值从而降低虚警率以及漏警率。

3.5 “防-治-监”一体化综合治理框架

单一治理手段对于库区高边坡众多致灾因素作用有限,需要建立“预防—治理—监测”闭环一体化方法。此方法要求:在设计时考虑监测系统与治理措施一起布置,留出设备安装位置;施工中做到“先排水、后锚固、再防护”,保证各项措施有效实施;运营过程中利用监测信息评价治理效果并据此进行加固或者变更方案。另外,对治理项目进行全寿命周期管理,把勘

察资料、设计图纸、施工日志及监测结果汇集在一个信息系统中,供今后维护以及类似工程参考。一体化治理关键是灵活性,即根据边坡反应情况随时调整治理措施,防止出现“过度治理”或者“治理不足”。

4 关键技术挑战与发展趋势

第一,库水位变化对边坡长期强度劣化的影响缺乏定量描述,需要建立基于损伤力学的渐进劣化本构来弥补目前的经验公式不能准确反映实际问题,第二,巨大的滑坡以极高速度远距离移动的原因和造成的破坏范围难以把握,需要进行多相介质相互作用的动力学数值模拟研究;第三,深层岩体内部的真实力学性质难以测定,尺度效应问题仍然未得到解决,而高精度反演方法可能会是突破口。未来的发展趋势将是数字孪生技术的应用,即利用虚拟的边坡双胞胎,整合地质资料、监测信息和计算软件等进行虚实交互,在此基础上结合强化学习以及智能优化的方法可以自动生成最有效的解决方案并且不断调整相关参数。另外,天地空三位一体的监控体系结合北斗卫星导航系统、无人机以及地面传感器的应用能够大幅度提高预报的准确性。智能化、精细化和绿色化是今后的发展方向。

5 结语

库区高边坡稳定性研究聚焦水-力-化-时多过程耦合机理。本文明确水位波动、地质结构等四大主控因素,指出多尺度多场耦合分析是关键。构建“防-治-监”一体化动态治理体系,推动治理从“治己病”向“治未病”转变。针对我国水电工程现状,建议深化长期性能演化研究,发展融合AI的实时预警算法,推广绿色材料与碳评价。唯有在机理认知、分析技术、治理工法及智慧管控四方面协同发力,方能有效应对风险,保障水利水电工程长治久安。

[参考文献]

- [1]陈祖煜.土质边坡稳定分析——原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2020.
- [2]郑颖人,赵尚毅,孔亮.边坡工程稳定性分析及其治理技术研究进展[J].岩石力学与工程学报,2022,41(增1):2645-2660.
- [3]李宁,张鹏,许强.库水位变动条件下库岸滑坡渗流-应力耦合机理研究[J].水利学报,2021,52(6):651-662.
- [4]唐辉明,胡新丽,章广成.水利水电工程库区滑坡成灾机理与防控研究综述[J].地球科学,2021,46(10):3457-3472.

作者简介:

郑晓瑞(1986--),男,汉族,内蒙古赤峰市人,本科,中级工程师,研究方向:水利工程。