

水利工程高边坡勘察设计质量控制措施研究

雷永旭

(江西华水勘测设计有限公司, 江西 南昌 330000)

摘 要 水利工程高边坡是保证工程结构稳定的重要载体, 其勘察设计质量直接关系到工程的安全性和长期运行效益。该类边坡长年受地形、地质、水文环境变化和工程扰动等因素的影响, 易发生滑坡、崩塌等地质灾害, 严重威胁着水利工程的防洪、发电和供水等核心功能。本项目以水利工程高边坡勘察设计全过程为研究对象, 对勘察阶段地质勘察精度不足、稳定性评估手段单一、支护设计脱离实际工况等关键科学问题进行系统研究。本文从勘察工艺优化、稳定性评价体系完善、支护设计精细化方面, 构建覆盖地质勘察、参数选择、方案设计、施工衔接的质量控制体系, 并以大型水库高边坡工程为研究对象, 对所提出措施的应用效果进行验证, 以期相关人员提供借鉴。

关键词 水利工程; 高边坡; 勘察设计; 稳定性评价; 支护设计

中图分类号: TV5

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.039

0 引言

高边坡勘察设计是控制工程稳定的源头, 其质量水平直接影响到后续工程的安全和运行可靠度。我国水利工程高边坡勘察领域还存在诸多不足: 部分工程受工期限制, 勘察流于形式, 钻孔布设密度不够, 对关键地质体(如隐伏断层、软弱夹层)的识别存在疏漏。以往的稳定性评价主要依赖于传统的极限平衡方法, 忽略了岩体的非线性变形特征和动力荷载下稳定演化规律。现有的支护设计方案都是照搬同类工程的经验, 没有根据边坡的具体地质条件和水文条件进行个性化的优化, 导致了“过度支护”和“支护不足”的现象比较普遍。这不仅增加了工程造价, 而且存在严重的安全隐患, 制约了水利工程的综合效益。基于此, 研究水利工程高边坡勘察设计质量控制措施具有重要意义。

1 水利工程高边坡勘察设计核心特征与质量影响因素

1.1 高边坡勘察设计核心特征

复杂的地质环境对边坡的影响尤为突出, 边坡一般经历了多期构造活动, 节理、裂隙发育, 在长期的库水和地下水的渗透作用下, 其物理力学参数呈现动态变化。在峡谷地区, 高边坡易形成潜在滑裂面, 断层破碎带和卸荷裂隙等不良地质体。除了自身重力作用外, 库水推力、施工爆破震动、地震和温度应力等多种外部荷载共同作用, 荷载作用形式随施工阶段(施工期、蓄水期、运行期)动态调整^[1]。水库蓄水期, 坝肩的高边坡要承受很大的水平水压, 而施工过程中

的爆破振动和开挖卸荷又是主要的影响因素。

1.2 勘察设计质量核心影响因素

地质调查资料是勘察设计的依据, 其准确与否直接影响到后续工作的质量。其主要表现在: 调查布点密度不够, 不能覆盖斜坡关键部位(如斜坡转折处、地质界线附近); 由于钻孔深度不能触及潜在滑移面或稳定层, 不能揭示边坡内部的地质构造; 室内试验参数的选择脱离了工程实际, 如没有考虑地下水对岩体强度软化的影响, 仅以干态试验参数进行设计; 由于地球物理勘察和钻井的结合不够紧密, 对隐伏地质体的识别精度不高, 造成了地质模型的变形。

支护设计方案是控制边坡稳定的核心措施, 其质量问题主要体现在支护结构选择不当, 如在硬岩边坡过度使用抗滑桩等重型支护结构导致成本浪费等。软岩边坡排水系统不完善, 致使地下水积聚, 使岩体软化; 支护参数的设计比较保守或者不够充分, 一般都是依靠经验来确定锚杆的锚固长度, 没有经过现场抗拔试验的检验; 设计细节不够完善, 支护结构和岩体界面处理不当, 影响了支护效果。

2 水利工程高边坡勘察设计质量控制关键措施

2.1 勘察阶段质量控制

2.1.1 勘察方案个性化制定

摒弃以往“一刀切”的勘察布点方式, 根据前期地质勘察成果和工程重要程度, 根据边坡高程、地形坡度、前期地质勘察成果, 制定差异化勘察方案。对于高达 50 m 以上的高边坡和坝肩边坡, 必须采取“分层

勘察,重点加密”的原则。采用地质测绘和物理测量相结合的方法,结合无人机航测等方法,在坡体上部(坡顶至坡顶2/3高程)建立边坡三维地貌模型。坡下段(高程2/3以下至坡脚处)为应力集中区,勘察线间距缩短至20~30 m,需钻穿潜在滑动面以下3~5 m,保证深部地质结构清晰;在边坡转捩、地质界线及疑似软弱夹层分布的区域,钻孔间距控制在10~15 m之间。利用无人机搭载高精度相机,对陡峭地形、人迹难及地区进行边坡地表裂隙识别和地形建模,并联合无人机提升钻井装备和便携式地质雷达,确保勘察布点覆盖所有关键地段。例如:某水电站左坝肩(82 m)高边坡勘察过程中,识别了3个厚度0.3~0.8 m的隐伏软弱夹层,比常规勘察方案多出2个风险点,为后续支护设计、规避施工期滑坡风险提供了重要依据。

2.1.2 勘察技术多源融合应用

建立“空中、地面、地下”立体勘察系统,实现边坡地质条件的全方位立体调查。采用无人机航测技术,搭载高精度激光雷达(LiDAR),快速获取坡面地形、裂隙分布、植被盖度等信息,并生成1:500高精度地形模型和正射影像,为地质测绘提供基础数据。地面调查采用地质雷达和高密度电法,利用地质雷达对0~30 m的浅地层裂隙、软弱夹层和地下水进行探测,利用高密度电法对50 m以内的地层岩性界面和含水层进行有效识别,提高了隐伏地质体的识别精度^[2]。地下勘察采用钻孔取芯,结合声波测井对岩体完整性进行评价,取芯率要大于85%,关键部位如软弱夹层取芯率不小于90%。现场试验主要包括岩体抗压强度、抗剪强度、点荷载和压水试验,每一关键地质单元进行3次以上的测试,以保证所测参数的代表性。

2.2 稳定性评价阶段质量控制

2.2.1 识别关键风险源

在调查资料的基础上,从地质构造、岩体质量和水文条件三个方面对边坡进行定性评价,识别出主要的危险源。地质构造分析的重点是断层及软弱夹层的产状(走向、倾向、倾角)及展布情况,判断是否为潜在滑裂面;采用RMR(岩体地质力学分类)或Q-体系分级法,综合考虑节理裂隙发育程度和岩体完整性系数等因素,对岩体质量进行分级(I~V);水文条件评价以地下水软化岩体强度为重点,通过井下水位监测和渗流监测,识别渗流区,分析地下水对边坡稳定性的不利影响。在定性评价过程中,为了直观地显示边坡的地质特性,需要编制工程地质剖面图和节理裂隙图^[3]。针对存在多种潜在危险源的边坡,运用风险矩阵方法对各危险源进行分级(高、中、低),明确

关键分析目标,进行定量计算。例如:对某水库坝肩高边坡进行了定性评价,确定了由软弱夹层控制的2个高风险潜在滑裂面,从而确定了下一步定量计算目标。

2.2.2 跟踪工况变化

在前期工作基础上,综合考虑不同施工阶段对边坡稳定性的影响,分阶段进行动态评估,实现边坡整体稳定监测。在施工准备阶段,根据勘察资料,对边坡进行初步稳定评估,确定边坡的初始风险等级,为支护设计提供依据;施工阶段每隔10~15 m进行一次稳定性复核,并结合施工进度,着重研究开挖卸荷和爆破震动对边坡稳定的影响;在运行期,基于库水位变化(蓄水、放水)和边坡变形监测资料,对长期运行条件下边坡稳定性演变趋势进行评估^[4]。施工爆破震动对岩体完整性的影响是动态评估的重要内容。例如:采用预裂爆破技术减小了对边坡岩体的扰动,并通过控制单段药量,使爆破震动速度控制在5 cm/s以内,防止岩体再裂。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

某大型水库工程地处西南山区,是集防洪、发电、供水功能于一体的综合水利枢纽工程,坝高120 m,库容15亿m³。左坝肩高边坡是该工程的重点部位,坝体左侧K0+000-K0+300,最大高程95 m,坡角45°~60°,沿坝轴线方向平行于坝轴线,承担着坝肩稳定和坝体荷载传递的功能,其稳定性直接关系到大坝安全,勘察设计质量控制标准极高。前期研究表明,该边坡主要为花岗岩类,含3个(0.5~1.2 m)软弱夹层,夹层为泥页岩,抗剪强度低(凝聚力C=25 kPa,内摩擦角 $\phi=18^\circ$);边坡区地下水储量丰富,以大气降水和库水为主要补给来源。地震动峰值为0.10 g,地震动基本烈度为Ⅶ度,区域稳定程度为中等^[5]。为了确保边坡排水通畅,在水利工程建设时常在施工开挖线外的坡面设置排水沟,在开挖面设置排水孔,从而控制基岩渗水压力对边坡的破坏影响。工程在大坝基坑开挖时,在死水位以上的开挖面,根据具体情况设置数量及深度恰当的排水孔,排水孔倾向坡外10°,合理控制排水孔的孔深、孔径及分布情况。

3.2 质量控制措施应用

3.2.1 多源技术融合精准勘察

采用“无人机航测+地质雷达+钻井+原位测试”的综合勘察方法,编制了多层次的勘察方案。在坡体上部(0~30 m),以地质雷达和无人机航测为主,布设5条50 m的勘察线;坡体中部(30~60 m)勘察线间距减至20 m,增加8个钻孔;在斜坡下部(60~95 m)

和软弱夹层分布区域,加密钻孔 14 个,钻孔深度均在潜在滑动面以下 5 m 处,累计钻孔 22 口,总进尺 1 200 m。现场进行了 36 组岩石抗压强度、24 组抗剪强度和 22 组压水实验,完成了 52 组岩石力学测试。采用“三参数法”确定了花岗岩的抗压强度为 35 ~ 45 MPa,抗剪强度 $C=45$ kPa, $\phi=32^\circ$ 。试验结果表明,软弱夹层的抗压强度为 1.5 ~ 2.5 MPa,抗剪强度为 28 kPa, $\phi=19^\circ$,比常规勘察方法精度提高 20% 以上。经勘察,确定了 3 个软弱夹层和 2 个潜在滑裂面。

3.2.2 差异化精细化设计

根据边坡的分区地质情况和稳定性评价结果,采取了差别化的支护方案:上坡(0 ~ 30 m)采用 $\Phi 25$ 、间距 3 m、锚固长度 3 m 的“锚杆+喷砼”支护,喷浆 C25 混凝土 15 cm;坡体中部(30 ~ 60 m)采用“锚杆+锚索+格构梁”组合支护,锚杆间距 3 m,锚索 $\Phi 15.24$,间距 4 m,预应力 180 kN;格构梁为 40×50 cm, C30 混凝土。在坡体下部(60 ~ 95 m)及软弱夹层区域,采用“防滑桩+锚索+排水系统”联合支护,采用 1.5×2.0 m、间距 6 m、桩长 25 m (嵌入稳定岩层 5 m)、锚索间

距 3 m、预应力 200 kN。采用“截水沟+坡面排水孔+内排孔+排水盲沟”的排水系统,坡顶截水沟尺寸 0.6×0.8 m,坡面泄水孔间距 2.5 m,内部仰斜排水孔间距 4 m,排水盲沟设置于坡脚,确保地下水及时排出^[6]。根据不同边坡高度来开展边坡的设计工作。当边坡高度 < 40 m 时要将稳定坡率放在首位;而当边坡高度 ≥ 40 m 时要控制坡率,防止因为边坡放缓而产生大量的土石方开挖,同时对边坡上的植被造成破坏。因此,在针对这类坡度及坡率都较高的边坡,可以选择支挡加固的方式来提升边坡的稳定性。

3.3 应用成效

经过两年多的变形监测和稳定性复核,其应用效果明显(见表 1)。结果表明:地质调查的精度达到 96%,比传统方法提高了 11%;边坡稳定系数为 1.35,满足设计要求;最大累积变形只有 4.2 mm,远远小于规范规定的 10 mm;支护工程造价比工业平均水平低 12%,达到了安全与经济统一的目的;施工过程中只发现一处质量隐患,运行期间稳定率 100%,保证了大坝的安全运行^[7]。

表 1 某水库左坝肩高边坡勘察设计质量控制成效指标

评价指标	规范要求 / 行业标准	实际成果	提升幅度 / 改善效果
地质勘察准确率	≥ 85%	96%	11%
边坡安全系数(天然状态)	≥ 1.3	1.35	3.8%
最大累计变形量	≤ 10 mm	4.2 mm	58%(变形量降低)
支护工程成本	行业均值	低于行业均值 12%	12%(成本节约)
施工期质量隐患数量	≤ 5 处	1 处	80%(隐患数量减少)
运营期稳定性达标率	100%	100%	稳定达标,无安全风险
支护方案优化周期	≤ 15 天	3 天	80%(周期缩短)

4 结束语

水利工程高边坡勘察设计质量控制是保证工程安全的重要环节。高边坡勘察设计具有地质条件复杂、荷载作用多样、工程关联性强等特点。本研究突破传统设计思想的局限,提出“精准勘察、动态评估、差异化设计”的质量控制理念,并通过对某水库左坝肩高边坡工程的研究,验证所提出的质量控制措施。结果表明,地质勘察精度提高 11%,降低边坡变形量 58%,节省支护成本 12%,验证了其有效性和实用性。

参考文献:

[1] 刘飞鹏,许婧.水库工程天然高边坡的稳定性分析[J].江西科学,2025,43(05):930-935.

- [2] 匡朝正.大坝高边坡开挖及支护施工技术探讨[J].黑龙江水利科技,2025,53(09):41-45.
- [3] 李亚斐.水利工程施工高边坡稳定性控制技术[J].中国科技信息,2025(16):59-61.
- [4] 卢树盛,向能武,孙云志.高边坡勘察新技术在水利工程中的应用现状、挑战与展望[J].中国水利,2024(14):44-50.
- [5] 吴贵军.水利工程高边坡勘察设计质量控制措施[J].四川建材,2021,47(04):81-82.
- [6] 狄瑞.水利工程高边坡勘察设计质量控制管理[J].水利技术监督,2020(04):21-22,198.
- [7] 孙明.高边坡水利工程施工安全风险识别与智能防控技术探索[C]//中国智慧工程研究会.2025 智慧设计与建造经验交流会论文集.山东安澜工程建设有限公司,2025.