

水利工程边坡工程地质勘察及稳定性评价研究

关志伟

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.32629/hwr.v10i8.7102

[摘要] 以某水利枢纽工程右岸联合进水口上游BT2滑塌体为研究对象,综合应用地表地质测绘、平硐钻探与高分倾斜摄影等多种手段全面系统查明边坡工程地质条件。研究揭示,库水长期浸泡致结构面抗剪强度衰减,与前期切脚开挖形成临空面二者耦合,是运行期滑塌的主控机制;建立天然、正常蓄水及地震三种工况极限平衡模型定量评价稳定性,提出免爆开挖、保留压脚与锚索-格构梁协同支护体系。成果可为同类粉土覆盖型库岸边坡勘察与防控提供借鉴,具有一定推广应用价值。

[关键词] 水利工程; 边坡; 工程地质勘察; 稳定性评价; 滑塌体

中图分类号: TV 文献标识码: A

Research on Engineering Geological Investigation and Stability Evaluation of Slopes in Hydraulic Engineering Projects

Zhiwei Guan

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

[Abstract] Taking the BT2 collapse mass above the upstream of the right bank joint intake of a certain water conservancy project as the research object, a comprehensive and systematic investigation of the engineering geological conditions of the slope was conducted by integrating various means such as surface geological mapping, flat tunnel drilling, and high-resolution oblique photography. The study revealed that the long-term soaking of the reservoir water led to the attenuation of the shear strength of the structural planes, and the combination of this with the formation of the exposed surface during the previous cutting foot excavation was the main controlling mechanism for the sliding collapse during the operation period; limit equilibrium models under three working conditions of natural, normal water storage, and earthquakes were established to quantitatively evaluate stability, and a non-explosive excavation, retention of the foot support, and a coordinated support system of anchor cables and lattice beams were proposed. The results can provide reference for the investigation and prevention of similar shore slopes of silty soil-covered reservoirs and have certain application and promotion value.

[Key words] Hydraulic engineering; Slope; Engineering geological investigation; Stability assessment; Collapse mass

引言

水利工程边坡大多处在深厚风积粉土覆盖的库岸区,稳定问题直接影响到大坝和取水建筑物的安全。传统勘察由于上部粉土难以揭露而低估了卸荷和切脚效应,设计阶段“不扰动”的保守判断也容易掩盖开挖卸载激活的隐患,造成运行期突发滑塌。本文选取某水利枢纽工程BT2滑塌体作为研究对象,采用空、天、地多源信息融合的方式,结合系统地质勘察结果进行分析,对其进行量化稳定性评价,在确保安全的前提下,提出一种非扰动性的综合治理方式,为类似的库岸边坡勘察、评价和防治提供一定的实证参考,克服了以往重治理、轻机理的弊端。

1 工程地质勘察与滑塌体结构特征

1.1 地形地貌与地层岩性

BT2滑塌体位于某水利枢纽工程右岸联合进水口上游35~85m、距大坝156m处,后缘高程为2576.5m,高出库水面(2506.7m)约70m,后缘岸坡顶部有施工便道宽约6m。边坡整体顺直近EW向,自然坡度为30°~38°,陡坎处达50°~70°,下游侧发育一条宽浅的小洪沟(底宽3~5m),汇水面积小、补给弱,水文地质条件简单。表部为第四系风积粉土(Q3-4eol),厚5~25m,结构疏松、垂直节理发育,属于南疆山区典型的极限状态土坡;粉土抗剪强度低、遇水易崩解,是浅层累进式塌滑的物源。下伏

中元古界(Pt2)斜长角闪片岩,岩质坚硬、块状构造、宏观不具片理;强风化带厚5~8m,为碎裂镶嵌结构,是卸荷和风化叠加的薄弱层;弱风化带厚10~15m,岩体较完整、节理面锈染;微风化带质量好。粉土厚度由5~25m变化,造成边坡浅层强度空间不均;强风化带正好处在粉土和弱风化岩的交界处,相当于一层顺坡软弱夹层,又削弱了上部岩土体的依附。疏松粉土和卸荷破碎带双层结构,上部土体沿陡坎逐渐塌滑,下部岩体沿结构面楔滑,形成失稳物质基础。

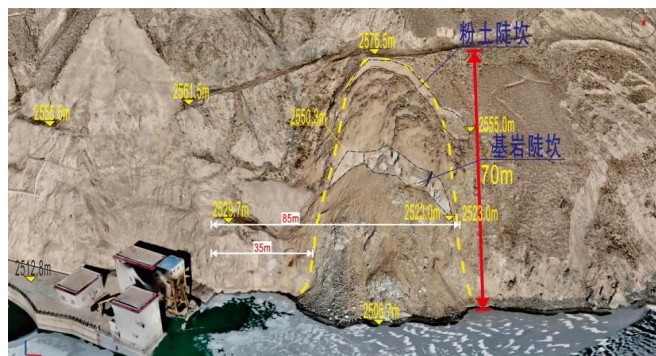


图1 BT2滑塌体平面形态示意图

1. 2滑塌体空间形态与方量测算

滑塌体平面呈舌状,顺河长50m,水面以上最大高差近70m;2550.3~2576.5m为粉土塌滑段,2550.3~2523m为岩质滑塌后缘岸坡段,后缘见两条圈椅状陡壁,陡坎高一般在4~10m。方量计算用双法互校,平行断面法在前后共布置了12条剖面(间距10m),根据地形切线估算约7500m³;倾斜摄影有限元法将滑塌前后高精度三维模型相互叠加,直接解算体积7580m³,两者偏差小于1%,互证可靠。双法互校更具有方法学意义,倾斜摄影可以避免陡崖交通困难区的人工接触测量风险,适合于库岸高频变形的快速复核,可以作为运行期方量动态监测手段。此次方量远小于可研估算1.6万m³,说明本次只是对原BT2卸荷体局部复活,并不是整个失稳;依据后缘陡坎未超出2576m施工便道判断为浅表部滑塌,堆积物分布在十三号路平台、施工便道和河槽坡脚三个地方,与“切脚+软化”机理一致。

2 滑塌机理与成因分析

2.1从可研到施工期的地质演化

对比历次勘察得知BT2认识经历了三个阶段的转变。可研初设阶段:判定该点处于鼻状山梁下游侧,下游冲沟切割深度10~15m,发育一组近平行岸坡节理(280~310° SW $\angle$ 45~65°),估计方量约1.6万m³、卸荷带水平宽度10~15m,认为自然状态基本稳定,以不扰动为宜,未提处理建议。施工期(2015年):十三号路(2500m高程)开挖切脚,PD21平洞下游侧形成顶部2535m、高35m的楔形体并滑塌300余m³,揭示f1与四组节理(L1~L4)组合致塌。运行期(2025年12月):再次滑塌约7500m³。三阶段呈现“卸荷—切脚—软化”三个因子的递进激活过程;原“不扰动”结论忽略了切脚开挖对下部岩体卸荷的激活作用,是认识上的重大失误,也是造成此次滑塌的根源。值得注意的是,2015年施工

期滑塌只有300多m³,但是到了2025年达到了7500多m³,量级上翻是因为十年来切脚临空和库水软化导致岩桥逐渐贯通,潜在滑面由局部变为贯通面,卸荷—软化对岩体完整性产生了累积的劣化。

2.2库水软化—切脚临空耦合致灾机制

致灾机理可概括为“先切脚、后软化、再蠕滑”的链式过程。十三号路施工在2500m平台切脚,给下部岩体提供长期临空面但不支护,使本来受冲沟和卸荷控制的岩体失去侧向约束,抗滑力基数下降;水库蓄至正常蓄水位(2509.0m)之后,坡脚岩体长期浸泡,孔隙水压力增大、有效应力减小,结构面抗剪强度明显降低(饱和折减系数0.85~0.90)。重力长期影响之下岩体会慢慢蠕变,抗滑力不断减小直至失稳。其中库水软化使抗剪强度突然下降成为触发主因,切脚临空提供变形空间,两者耦合作用超过了边坡自稳阈值;而软化是渐进过程,这解释了滑塌为何滞后于蓄水多年方才发生。软化不是瞬间发生的,库水反复升降使节理面充填物泥化、结构面c值不断衰减,岩体由脆性向塑性转变,长期处于临界稳定状态;上部粉土在降雨入渗作用下强度急剧下降,多种不利因素在时间轴上叠加,最终导致失稳,是“极限平衡临界态+渐进劣化”的典型表现^[1]。

3 边坡稳定性定量评价

3.1计算模型与多工况设定

选择典型的1-1'剖面来建立二维极限平衡模型,滑面根据平洞和断面综合确定的f1以及卸荷带边界概化。根据BT2距离大坝只有156米,靠近联合进水口的特点,利用前期PD10、PD14、PD21、PD23四条平洞和ZK35、ZK36两钻孔的深部资料反演岩体结构和风化分带,利用施工期开挖揭露的断层节理校核潜在滑面,形成由表及里的多源勘察链条。联合进水口为2级建筑物、失稳危害较大,故边坡安全等级定为3级,抗滑稳定安全系数限值 $F_s \geq 1.15$ (天然)与 ≥ 1.05 (非正常)。岩体抗剪强度根据平洞揭露的碎裂镶嵌结构和弱风化较完整的段综合赋值,饱和工况按0.85~0.90折减;地震采用拟静力法、水平地震系数取0.20。由于滑塌发生在蓄水运行期,可以认为工况二对应的状态已经处于临界状态,因此对岩体c、 ϕ 进行反演校核,使计算参数更接近工程真实的响应情况,防止只依靠室内试验而产生的系统性偏差。设三种工况,工况一为天然,死水位加自重,工况二为正常蓄水位2509.0m,考虑坡脚浸水软化和渗透压力,工况三为正常蓄水位加上地震。水位以下取浮重度,计入水位骤降不利渗透压力,来模拟蓄水和泄水的真实边界条件。

3.2双方法对比与敏感性分析

用简化Bishop法(圆弧滑动搜索)和Janbu法(沿节理面滑动)进行比较计算。二者的物理假定不同,Bishop假设条间力水平、偏圆弧滑面,Janbu可以处理非圆弧沿结构面滑动,但是得到的结果趋势一致、数值互证,说明滑面形态对结果没有影响、结论可靠。三工况计算结果:工况一天然状态下Bishop法1.35、Janbu法1.28,满足规范但是安全裕度低;工况二蓄水状态降到1.05和1.01,接近允许下限、呈临界稳定,正好和滑塌发生在蓄水土

行期相吻合;工况三地震状态降到0.98和0.93,将失稳破坏、抗震不足。通过量化的分析可知,库水浸软化使稳定系数下降约22%,是控制性诱因,地震使已临界边坡直接失稳。工况二Fs接近下限,就应当采取应急措施;工况三结果表明抗震复核是必要的。敏感性分析结果表明浸水软化对Fs折减的贡献最大,属于控制性敏感因子,地震惯性力和渗透压力紧随其后,从定量角度确定了治理的重点应该放在阻断库水软化路径上^[2]。

表1 边坡稳定性系数(Fs)计算结果表

计算剖面	计算方法	工况一 (天然)	工况二 (蓄水)	工况三 (蓄水+地震)	潜在滑面类型
1-1	Bishop法	1.35	1.05	0.98	圆弧复合型
	Janbu法	1.28	1.01	0.93	沿J1节理面
规范要求[Fs]	/	≥1.25	≥1.15	≥1.05	

4 加固治理方案与施工控制

4.1 免爆开挖与压脚保留设计

治理以“上部清表、下部免爆、保留压脚”的非扰动原则。南疆山区粉土边坡在自然条件下大多处于极限状态,一旦扰动上部粉土就会源源塌滑、清方量剧增,所以只对上部粉土进行清表、不深挖,从源头上避免二次激活。下部岩体由于距离建筑物近,不能进行爆破,采用风镐免爆解小,开挖到2509m高程;其下伏坡积碎块石土保留下来,作为压脚反压,反压体增大滑体底部法向力和抗滑力臂,物理上恢复坡脚抗力,重建被切脚削弱的支撑。1: 0.75坡比在保证开挖边坡自稳的基础上控制开挖总量,防止大范围削方扰动上部粉土;保留压脚体同时降低边坡相对高度,从几何和力学两方面改善稳定条件,体现“最小干预”的治理哲学。施工自上而下分层、逐层封闭支护,既处理滑塌体又不造成新的切脚效应,从机理上切断致灾链,实现安全和经济的统一。

4.2 锚索—格构梁协同支护体系

针对坡面岩体破碎(碎裂镶嵌结构),不宜进行深开挖,用钢筋混凝土格构梁(截面0.4m×0.6m、纵横间距5m)连接锚头,把分散的锚固力整合成坡面整体约束,抑制浅表破碎带松弛。锚索须穿越潜在滑动面f1及PD21-f16并深入稳定岩层≥5~8m,长35~45m;选用Φ15.2mm钢绞线7根、设计拉力1000kN/束。方位角取N10°~15°E,使锚索水平投影指向岸内,抵消f1下滑的岸外分量;仰角0°~5°,保证斜向穿过滑动面之后进入稳定的岩层。共布5排(2515~2535m高程)×6根=30根,张拉至设计值90%~95%。锚索采用机械锚固和注浆锚固双重保护,锚固段≥6m

设在稳定岩层上,先单根预紧后整索张拉,使各股受力均匀;锚墩现浇混凝土作为承压面,外锚头封孔回填灌浆防锈蚀,保证长期耐久。该体系把格构约束浅表和锚索锚固深部两种机制结合起来,既考虑破碎带约束又考虑潜在滑面锁固^[3]。

4.3 低水位窗口期与监测控制

施工要抓住库水位低于2500m(建议≤2497m)的窗口期,因为水位高于2500m时13#临时路会被淹,无法进场;依靠13#临时路(约2500m)和表孔闸井道路连接,由于场地狭小只能采用人工配合小型机械、满堂脚手架和栈道作业。系统自动化监测之前先布设3条临时断面(A-A'联合进水口平台右侧、B-B'闸前、C-C'滑塌段)各2~3个测点,结合专人巡视,使用变形速率阈值及时发现裂缝和突变。临时监测以日变形为基准,裂缝扩展宽度形成点、线、面的变形捕捉网,加固完成之后接入大坝中部或者右岸永久自动化监测站,达到从应急观测到长期安全监控的平稳过渡。工程含税包干总价为336万元,主要由锚索和土石方组成,比整体削方方案节约很多,体现出非扰动治理的安全性和经济性。

5 结论

某水利枢纽工程BT2滑塌体勘察与评价结果表明,在深厚风积粉土覆盖下的卸荷破碎带、切脚临空、库水软化三者耦合作用下,运行期失稳的主要原因就是库水浸泡导致结构面抗剪强度降低,切脚临空提供了变形的空间,两者叠加使潜在滑面逐渐贯通。从稳定性评价结果可以看出,蓄水使稳定系数由天然的1.35降到临界的1.05、地震工况下跌到0.93以下,软化导致折减22%左右,敏感性分析确定浸水软化为控制性因子。以非扰动理念为基础的免爆开挖、保留压脚和锚索—格构梁协同体系兼顾安全与经济,可以为同类库岸边坡勘察、评价和治理提供可推广的范式,对西北干旱半干旱区类似工程有明确的指导意义。

[参考文献]

- [1]黄芳雨.工程勘察技术在边坡地质条件评价中的应用[J].居业,2026,(1):199-201.
- [2]冉江龙.水利工程岩质边坡稳定性分析[J].水利技术监督,2026,(2):249-251+318+330.
- [3]朱利剑.水库工程边坡治理勘察研究[J].工程建设与设计,2025,(18):55-57.

作者简介:

关志伟(1984--),男,锡伯族,新疆乌鲁木齐人,本科,研究方向:工程地质与水文地质勘察。