

# XX 大坝坝体滑坡稳定性勘察与分析

何羽祥

广西壮族自治区河池水利电力勘测设计研究院

**摘要:** 为了有效地解决水库大坝的滑坡问题, 本文将根据实际工程案例, 分析坝前滑坡的物理特性、形成原因, 滑坡发育结构特征, 并从力学变形角度探究水利工程大坝滑坡的诱发机理。对滑坡的特性进行了探讨分析, 为后续下游村民生命财产安全做好保护准备。同时, 通过对监测数据的分析, 对大坝滑坡治理工作提出建议, 并可为后续类似的大坝滑坡状况项目提供借鉴和参考。

**关键词:** 水库大坝; 滑坡; 分析与评价; 治理措施; 地质勘察

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.13.075

## 一、工程概况

巴平水库1974年兴建, 1975年建成蓄水, 主要构筑物包括均质土坝、溢洪道、放水塔及输水平管, 为小(2)型水库, 最大坝高19.70m, 坝顶长194.0m, 坝顶宽4.0m。总库容95.8万 $m^3$ , 正常蓄水位855.40m。坝基基础持力层为强风化基岩, 两坝肩基础持力层为残坡积层含碎石粉质黏土。

受施工条件和施工工艺等影响, 水库坝体单薄, 坝坡不规则, 填土土质和填土质量较差, 溢洪道泄洪能力不足等。

勘察工作重点是调查水库大坝险情, 查明大坝物质组成, 坝体填筑质量及渗透性, 坝基、溢洪道、输水设施工程地质及水文地质条件, 为水库大坝排险设计提供必要的地质资料。

## 二、工程区工程地质条件

**地形地貌:** 坝址位于地马河上游, 属中低山构造剥蚀地貌, 坝址两岸山体地形自然坡度 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ , 两岸山顶高程918.0~994.5m, 高差60~146m, 河流走向 $206^{\circ}$ , 坝顶高程857.80m。山体植被茂密, 坝体为均质土坝, 总体地势呈北东向南西倾斜。

**地层岩性:** ① 人工填土 ( $Q^{ml}$ ): 为大坝填土, 可塑~硬塑, 稍密~密实, 主要成分为含砾粉质黏土、黏土, 厚度0.00~19.50。② 冲积层粉质黏土 ( $Q^{al}$ ): 棕黄色, 松散, 湿, 夹少量淤泥、砂卵石等, 层厚为1.00m。③ 残坡积含碎石黏土 ( $Q^{el+dl}$ ): 棕黄色, 可塑, 稍密, 夹5~10%风化碎石, 厚度1.50~2.20m。④ 炭质页岩 ( $C_{1y}$ ): 强~弱风化, 灰黑色, 薄层状, 岩石极软, 节理裂隙发育, 强风化厚度为1.40~4.60m。

**地质构造:** 枢纽工程区地层总体走向北东, 倾向南东, 倾角 $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。岩层节理裂隙较发育, 沿裂隙面风化程度较高。工程区无活动性断层及发震断层存在, 对水库蓄水及大坝的稳定无不利影响。

工程区地下水分为松散岩类孔隙水及碎屑岩类风化裂隙水。松散岩类孔隙水分布于第四系松散地层孔隙中, 水位、水量受季节变化影响, 主要补给源为降水和

水库渗水。碎屑岩类风化裂隙水分布于强弱风化带风化裂隙中, 含水量受裂隙发育程度和岩石风化程度控制, 含水量一般不大, 水力联系较差。微风化带往下裂隙闭合, 地下水活动微弱。

勘察时水库水位为853.70m, 较正常水位(855.40m)低1.70m, 勘察过程中在坝体及周边共发现6处水文点, 即S1、S2、S3、S4、S5、S6。其中S1点位于大坝左坝肩下游, 既有坝肩排水沟(P3)底部及外侧, 沿土岩接触面呈散浸, 水量小。S2位于大坝下游排水棱体顶部, 勘察时该区域相对干燥, 但石韦等附生蕨类植物茂盛, 排水棱体顶混凝土面板上有长期流水形成的薄层泥垢, 泥垢干后而龟裂呈片状, 初步分析该水点主要是由于其东南侧排水沟(P2)末端因未连接大坝排水系统, 造成沟内排水在附近漫流所致。S3位于大坝右坝下游坝面, 排水棱体顶部, 面积约 $50.0m^2$ , 散浸, 渗流量稍大。

**岩体风化特征:** 强风化带: 呈浅灰—浅黄色, 岩体风化强烈, 节理裂隙发育, 呈块、碎块状, 局部风化呈土状, 力学强度较低, 可见原岩结构。岩体基本质量等级属IV~V级, 坝基岩体工程地质分类属 $C_{IV}$ 类。强风化带厚度1.4~4.6m。弱风化带: 呈灰色, 灰黑色, 岩体节理裂隙发育, 多呈闭合状, 沿裂隙风化严重, 呈浅黄色, 岩石断面中心呈原色。岩体较完整, 岩体基本质量等级III~IV级, 坝基岩体工程地质分类属 $C_{III}$ 类。

## 三、坝体填筑质量与评价

巴平水库大坝坝顶长194m, 最大坝高19.70m。坝址两岸山体较缓, 河床宽敞, 大坝填土在中部河床段厚度最大, 往左右两坝肩地形为山体斜坡, 填土逐渐变薄。根据大坝施工历史, 结合大坝现状, 将坝体划分成I、II、III、IV区。I区以H1滑坡(左坝段)为主体, 从左坝肩至H1滑坡右边界; II区以右坝段破坝涵管重新碾压部位为主体, 结合右坝下游坝坡脚S3, 边界至S3散浸区外界; III区为中间坝段马道以上部分; IV区为中间坝段马道以下部分, 详见图1。

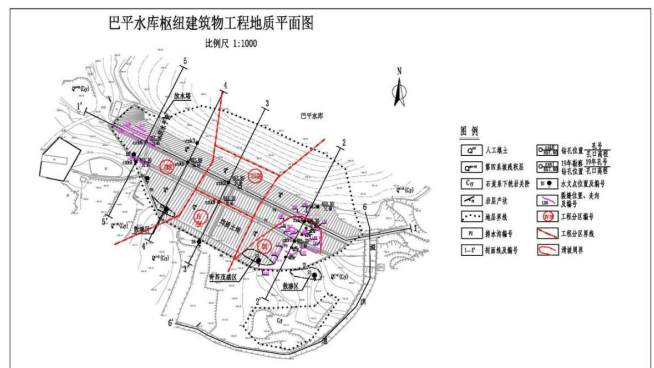


图 1: 大坝工程地质平面图

根据击实试验成果,结合室内土样干密度试验,大坝各区填土压实度普遍不符合现行规范要求,以I区和III区压实度最差,合格率为0%;II区最好,合格率为25%;IV区次之,合格率为14%。I区位于左坝段,由于多次加高培厚及坡面滑动,土体结构较松散。II区因上次除险加固时破坝埋管后重新碾压,压实度相对较好,但总体上部满足现行规范要求。III区为上游中间坝段以上部分,其埋深浅、厚度小,由于应力回弹释放,土体变松弛,压实度变低;特别是多次培厚,下游坝坡越来越陡,因受施工工艺及流程限制,该部分得不到很好的碾压,结构松散,降雨时雨水下渗,对坡面稳定影响较大。IV区为下游中间坝段马道以下部分,由于其埋深较大,应力回弹释放有限,土体压实度相对较高,但差异性大。因此,总体上大坝压实度不满足现行规范要求。

大坝I、II、III、IV区现场注水试验渗透系数为 $2.68 \times 10^{-4} \sim 7.60 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ ,呈中等透水性,大坝填土渗透系数不满足规范要求。

四、坝体滑坡险情分析与评价

该滑坡处于滑动阶段,为大坝填土滑坡,主滑方向为 $206^\circ$ ,滑线长约28m,前缘宽约40m,呈圈椅状。其周界清晰,外貌特征较齐全且显著。滑壁位于坝顶防浪墙基脚,坡度 $60 \sim 80^\circ$ ,长约23m,呈圆弧状,垂直下滑高度 $0.5 \sim 1.0\text{m}$ 不等,因滑动位移,滑壁与滑体间发育拉张裂缝(L15),并在滑体中上部形成滑坡台阶。前缘位于大坝马道下方剪出,呈舌状鼓丘,鼓丘高 $0.2 \sim 0.3\text{m}$ ,并发育垂直于主滑方向的鼓胀裂缝(L12)和平行于主滑方向的扇形张裂缝。两侧边界亦均位于坝体中,因错位而发育剪切裂缝(L03、L07、L10)和羽状裂缝,各裂缝基本贯通形成阶梯状。现场勘查还发现,沿滑坡体中间及下方的浆砌石排水沟发育压鼓裂缝(L09、L11、L13)。滑坡体内建有两条衔接排水沟,一条从左到右穿过滑坡体中下部(P1),一条连接P1往下穿过滑坡前缘并延伸到滑坡体外(P2),由于排水沟为相对刚性体,滑坡发生时因挤压作用而胀裂变形(L09、L11、L13),使其失去使用功能<sup>[1]</sup>。各裂缝统计分析结果见下表3。

表3 裂缝统计分析一览表

序号	裂缝类型	位置	裂缝编号	裂缝特征	备注
1	拉张裂缝	滑坡后缘	L15	长约23m,呈圆弧状,缝宽 $3 \sim 10\text{cm}$ 不等,平行于主滑壁,顶面与后缘滑坡壁落差 $0.5 \sim 1.0\text{m}$ 。	
		滑坡体中上部	L04、L05、L06	为早期滑动变形层面,形成 $5 \sim 10\text{cm}$ 的落差,为张性裂缝。勘察时局部已被松散土体充填,长 $6 \sim 10\text{m}$ ,宽 $2 \sim 5\text{cm}$ 不等。	滑坡台阶
2	剪切裂缝	滑坡两侧	L03、L07、L10	因滑坡体与滑床相对位移而形成。主要发育3条,长 $10 \sim 15\text{m}$ ,缝宽 $2 \sim 5\text{cm}$ 不等,呈阶梯状贯通。	
3	鼓胀裂缝	滑坡前缘	L12	形成于因滑体下滑受阻挤压隆起而形成鼓丘中,垂直滑动方向,长约 $30\text{m}$ ,缝宽 $1 \sim 2\text{cm}$ ,呈断续发育,伴生平行于滑动方向的扇形张裂缝,放射状。	
4	其他裂缝	滑坡体中部及下方	L09、L11、L13	主要沿滑坡体中间及下方的浆砌石排水沟发育,由于排水沟为相对刚性体,滑坡发生时因挤压作用而胀裂变形,使其失去使用功能。缝长 $3 \sim 10\text{m}$ ,宽 $3 \sim 5\text{cm}$ 不等。	压鼓裂缝
		滑坡下方	L14	位于滑坡下方水沟,使水沟发生横向错位,长约 $8\text{m}$ ,距滑坡前缘约 $15\text{m}$ ,初步分析为沟后陡坎变形所致。	

五、坝体滑坡成因及分析

(1) I区

上游迎水坝面为现浇C15砼面板防护,坡面平整,于左坝肩发现L01、L02两条裂缝。其中L01张开度为 $1 \sim 2\text{cm}$ 不等,沿面板呈阶梯状发育,延伸长度约 $10\text{m}$ ,缝内局部充填粉质黏土,并长有小草;L02为面板施工裂缝因差异位移而拉张,缝宽 $2 \sim 3\text{cm}$ 不等,张开度较大,延伸约 $5\text{m}$ ,缝内局部充填粉质黏土,并长有小草。下游坝坡自坝顶 $857.86\text{m}$ 至马道下方 $849.30\text{m}$ 高程处产生滑动,坝顶下沉高度 $0.5 \sim 1.0\text{m}$ 不等,裂缝长约 $23\text{m}$ 。裂缝最大宽度位于马道处,长约 $48\text{m}$ ,滑坡体底部裂缝长约 $15.00\text{m}$ 。滑坡体上边缘至下边缘长约 $28\text{m}$ 。为大坝填土滑坡,滑坡体方量约 $6000\text{m}^3$ 。

滑坡原因分析:大坝均为均质土坝,填筑土料为含砾黏土,其结构较松散,压实度及渗透系数不满足设计要求,抗剪强度低。受土体固结、应力释放、坝体渗漏及

长期雨水淋滤渗透,松散土内细小裂隙结构面逐渐连接贯通,形成潜在临空面,使其上部土体处于欠稳定状态。降雨时,雨水渗入土内,使其处于饱和状态,增加了滑体土的重量,降低滑动带抗剪强度,并形成动水压力,造成坡体滑动,形成滑坡<sup>[2]</sup>。

该区坝体填土渗透性不满足设计要求,库水沿坝体渗透性较大局域发生渗漏,发育有两个渗漏(散浸)点,存在坝体渗漏稳定问题。

(2) II区

上游迎水坝面为现浇C15砼面板防护,坡面平整,L16、L17两条裂缝。坝顶泥结石路面发育L15裂缝,长约 $35.0\text{m}$ ,外侧排水沟下错外倾。

该区坝体填土渗透性不满足设计要求,库水沿坝体渗透性较大局域发生渗漏,下游坝坡发育L18裂缝,并在强降雨时有水呈小股状从裂缝渗出(S5),并在下游坝坡接触带发育S3、S4等渗漏(散浸)点。大坝存在上

下游坝坡稳定问题和坝体渗漏稳定问题。

(3) III区

该区上游坝面为现浇C15砼面板防护，坡面平整，未发现裂隙。坝顶为泥结石路面，其外侧排水沟下错外倾。下游坝坡为草皮护坡，底部为高约0.70m的浆砌石护坡，顺坡砌筑，坡度约1:2。

由于多次加固培厚，其坡度较马道以下坡面陡，填土压实度不满足设计要求，坝坡表面土体结构松散，稳定性差。注水试验结果表明，其坝体渗透系数不满足规范要求。因此，该区存在坝坡稳定和坝体渗漏稳定问题。

(4) IV区

该区坝体结构较完整，下游坝坡坡度约为1:3.3，稳定性较好。仅在排水棱体前排水沟底板下发育S6出水点，该点长期有水渗出。勘察时在czk7钻孔进行注水试验<sup>[3]</sup>，水从孔口溢出后沿坡面散流消失，后在S6点溢

出，水量与注压水时排水量基本一致，且在停止注压水后，溢出量消退。因草皮茂盛，下游坝坡坡面局部发育鼠洞。

坝体渗透系数不满足规范要求，存在渗漏稳定问题。大坝填土压实度不满足设计要求，但坝面坡度平缓，自大坝建成运行几十年以来未出现过失稳现象，因此坝体填筑土压实度对大坝稳定性影响不大，建议对其进行长期观测<sup>[4]</sup>。

六、滑坡区坝体物理力学参数建议值

(1) 根据试验成果，结合有关规程规范及同类工程经验参数，提供大坝安全复核参数建议值（见表3）。

(2) 根据室内试验参数统计分析、经验类比和反演分析的基础上，提出该滑坡稳定性计算滑动面参数建议值（表4）。

表3 大坝安全复核参数建议值

工程部位	重度		孔隙率	压缩性		抗剪强度				渗透系数	临界水力比降
	天然	饱和		压缩系数	压缩模量	总应力		有效应力			
	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	%	a <sub>1-2</sub>	Es	C	φ	C	φ	K	J <sub>cr</sub>
				Mpa <sup>-1</sup>	MPa	kPa	°	kPa	°	10 <sup>-4</sup> cm/s	
I区	18.8	18.9	45.8	0.34	5.5	25.0	28.6	22.0	25.0	7.63	0.81
II区	19.0	19.3	42.6	0.27	5.5	21.8	16.8	20.0	14.0	5.23	0.88
III区	19.0	19.2	45.2	0.36	5.1	24.7	22.0	21.0	18.0	6.80	0.84
IV区	19.0	19.2	44.0	0.29	5.2	24.8	16.5	21.0	14.0	3.34	0.86

表4 滑带土物理力学主要参数建议值

岩土名称	滑体天然重度	滑体饱和重度	滑面天然状态		滑面饱和状态	
	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	C (kPa)	φ (°)	C (kPa)	φ (°)
粘土	19.0	19.3	12	10	10	8

七、建议

(1) 大坝存在多处险情，建议对I、II、III区坝段进行拆除并重新碾压，并做好坝体和坝基面接触带止水措施。可保留IV区坝段，但应进行充填灌浆<sup>[5]</sup>。

(2) IV区坝段虽压实度不满足设计要求，但坝面坡度平缓，水库建成运营至今未发生滑动变形等险情，坡面平整，可保留原状，但需定期进行位移和水位观测。

(3) 建议对IV区坝段接触带-强风化带渗漏进行充填灌浆。

(4) 完善坡面排水系统。

八、结语

20世纪六、七年代兴建很多水库，多数属于一项“三边工程”，没有专业地质人员进行地质勘察，更没有进行过地质勘探工作。很多水库大坝出现开裂或滑坡等不良地质现象，这就要求我们做好岩土地质勘察，分析好当地地质条件及坝体滑坡、渗漏等不良地质的合

理、准确性，为水工设计提供真实的地质依据，因此为水库大坝排除险情提供良好的决策前提。

参考文献

[1] 冯裕疆. 基于水库施工期间坝前滑坡稳定性分析[J]. 水利科学与寒区工程, 2020, 3(06): 44-48.  
 [2] 朱强. 基于Auto bank的某水库大坝坝坡稳定性分析[J]. 水电与新能源, 2023, 37(7): 51-53.  
 [3] 谷跃辉. 水库除险加固工程中的综合地质勘察方法研究[J]. 河南科技, 2019(23): 79-81.  
 [4] 吕超, 何俊澜, 张鹏, 王盛鑫, 黄俊阁. 广西某水库大坝右岸边坡滑坡原因分析及建议[J]. 广西水利水电, 2020(05): 20-22.  
 [5] 汪千敢. 龙潭水库大坝滑坡成因分析与治理措施[J]. 云南水力发电, 2023, 39(07): 89-94.

作者简介: 何羽祥(1987-), 男, 广西南丹人, 勘查技术与工程专业, 学士学位, 主要从事水利水电工程地质、岩土工程勘察设计、地质灾害评估等工作。