

# 芙蓉江清溪水电站坝肩稳定的复核计算分析

杨朝睿

贵州省大坝安全监测中心

**摘要:** 拱坝坝肩稳定是拱坝设计研究的核心问题, 本文通过对芙蓉江清溪水电站大坝坝肩稳定的复核分析, 初步总结拱坝坝肩稳定的复核评价的经验。

**关键词:** 拱坝; 坝肩稳定

## 一、工程概况

清溪水电站位于贵州省绥阳县青杠塘镇境内的清溪河上, 是清溪河干流梯级规划的第三级电站, 电站装机容量28MW (2×14MW)。

大坝为C15碾压混凝土二次曲线双曲拱坝, 最大坝高80.5m, 坝顶高程620m, 坝顶宽5m, 坝底厚16m, 厚高比0.195, 坝顶轴线弧长166.85m, 最大中心角为91°, 弧高比2.073。厚高比0.195, 属薄拱坝。

2012年6月通过竣工验收, 水库总库容9780×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>, 水库工程规模属中型, 工程等别为III等, 大坝为3级建筑物。

## 二、坝址地质条件

坝址位于清溪河中游狮子壁处峡谷内, 河流流向N26°E, 河谷深切, 河床高546.5m~548m, 宽25m~35m, 左岸坡角65°~70°、右岸坡70°~85°, 为两岸基本对称的“V”型横向往河谷。

坝址出露有寒武系中上统娄山关群第三段 (∈<sub>2-3</sub>1s<sup>3</sup>)、奥陶系下统桐梓组 (O<sub>1</sub>t) 及第四系 (Q) 地层。岩层产状

N40°~50°W/N E∠18°~45°, 倾下游、偏右岸。对大坝稳定有影响的有5组裂隙, 6层软弱夹层。具体统计见表1~2。

## 三、坝肩稳定分析计算

拱坝坝肩稳定问题, 主要取决于两岸的地形地质条件和结构布置。先需分析存在的断层、裂隙和软弱结构面能否组合成容易滑动的块体, 研究失稳时滑动的方向和最可能的滑动面, 然后再据此加以分析找出符合实际情况的最低安全系数。

本次复核主要按刚体平衡法平面分层稳定进行, 当个别高程稳定不满足要求时, 采用分层累计法核算。

### (一) 基本参数

坝体参数为: 容重24kN/m<sup>3</sup>, 弹模18GPa, 泊松比0.167; 线膨胀系数9×10<sup>-5</sup>m·(°C)<sup>-1</sup>, 导热系数3m<sup>2</sup>·月<sup>-1</sup>, 基本组合容许抗压强度4.29MPa, 特殊组合5MPa, 控制拉应力1.2MPa。

坝基参数为: 容重26kN/m<sup>3</sup>, 弹模8GPa—10GPa, 泊松比0.23, 线膨胀系数0.85×10<sup>-5</sup>/°C;

### (二) 坝肩滑动模式分析及参数

根据前述地层结构情况, 经分析, 左坝肩岩体抗滑稳定底滑面倾向下游、倾角15°~20.95°的岩层层面, 侧滑面主要为N45°E方向裂隙面; 右坝肩岩体抗滑稳定底滑面倾下游、倾角11°~20.95°岩层层面, 侧滑面: 主要为N10°E方向裂隙面。

根据现场钻孔取芯检测试验成果, 结合经验及相关规范, 综合结合开挖地质编录, 综合确定坝肩滑裂面参数见表3。

表1 坝址裂隙特征统计表

组别	裂隙产状	裂宽 (cm)	充填情况	一般长度 (m)	平均线密度		连通率 (%)		性质
					条/m	强风化	弱风化		
I	N65°~85°W/NE∠50°~65°	0.1~1.0, 局部闭合	局部方解石脉充填	3~6	0.2	40~60	15~18		剪性
II	N60°~80°E/NW∠70°~80°	0.2~1.5	局部黏土碎石充填	2~5	0.3	40~50	12~18		张性
III	N25°~45°E/NW∠60°~80°	0.1~1.0, 局部闭合	局部方解石脉、黏土充填	2~3	0.5	35~45	15~20		剪性
IV	N20°~40°W/SW∠60°~70°	0~0.5	充填黏土局部方解石脉	4~6	0.2	30~40	10~15		剪性
V	N10°~15°E/NW∠60°~80°	0.1~2.0	局部黏土充填	2~10	0.2	80	35		张性及卸荷

表2 坝址区层间软弱夹层统计表

夹层编号	发育位置	夹层上部层位	夹层间距 (m)	夹层厚度 (cm)	夹层特征
		夹层下部层位			
j <sub>1</sub>	河床及左右岸	∈ <sub>2-3</sub> 1s <sup>3-5-2</sup>	22	10~20	j <sub>1</sub> 、j <sub>2</sub> 、j <sub>3</sub> 、j <sub>4</sub> 夹层均分布于各岩层的分界线上, 主要成分为钙质泥岩、极薄层白云质灰岩夹燧石结核条带及透镜体。呈波浪形接触, 起伏差一般5cm~15cm。地表沿层面风化形成凹槽, 为连续分布的软弱夹层
		∈ <sub>2-3</sub> 1s <sup>3-5-1</sup>			
j <sub>2</sub>	河床及左右岸	∈ <sub>2-3</sub> 1s <sup>3-5-1</sup>	19.8	30~80	
		∈ <sub>2-3</sub> 1s <sup>3-4-3</sup>			
j <sub>3</sub>	河床及左右岸	∈ <sub>2-3</sub> 1s <sup>3-4-2</sup>	16.2	1~3	
		∈ <sub>2-3</sub> 1s <sup>3-4-1</sup>			
j <sub>4</sub>	河床及左右岸	∈ <sub>2-3</sub> 1s <sup>3-4-1</sup>	9.8	1~3	
		∈ <sub>2-3</sub> 1s <sup>3-3-3</sup>			
j <sub>5</sub>	左右岸	∈ <sub>2-3</sub> 1s <sup>3-3-3</sup>	12.3	2~4	
		∈ <sub>2-3</sub> 1s <sup>3-3-2</sup>			
j <sub>6</sub>	左右岸	∈ <sub>2-3</sub> 1s <sup>3-3-1</sup>	19.5	1~5	j <sub>3</sub> ~j <sub>6</sub> 为不连续分布夹层主要成分为钙质页岩, 在层间呈波浪形或镶嵌状不稳定产出, 起伏差一般为1cm~5cm。夹层在强风化带内经后期风化、侵蚀、溶蚀后多变成含碎石土, 其强度较低; 当进入弱风化带后其厚度逐渐变薄, 一般厚0.5cm~2cm, 其强度相对较高, 近似于砂页岩本身的强度
		∈ <sub>2-3</sub> 1s <sup>3-2-3</sup>			

表3 坝肩稳定滑裂面参数表

高程 (m)	左岸侧滑面参数		左岸底滑面参数		右岸侧滑面参数		右岸底滑面参数	
	f'	c' (MPa)	f'	c' (MPa)	f'	c' (MPa)	f'	c' (MPa)
620	0.5	0.24	0.39	0.08	0.47	0.19	0.39	0.07
604	0.6	0.37	0.55	0.19	0.46	0.18	0.45	0.08
593	0.6	0.38	0.54	0.19	0.51	0.24	0.58	0.17
582	0.59	0.36	0.53	0.18	0.54	0.27	0.62	0.2
571	0.57	0.34	0.5	0.15	0.49	0.21	0.53	0.16
560	0.69	0.46	0.47	0.13	0.61	0.36	0.53	0.18
549	0.72	0.47	0.5	0.16	0.63	0.38	0.54	0.19

(三) 坝肩稳定计算

根据《混凝土拱坝设计规范》(SL282—2018)的规定,拱座抗滑稳定安全系数取值为:基本荷载组合抗剪断安全系数K'为3.0,特殊组合抗剪断安全系数K'为2.5。

平面分层计算公式为:

$$K' = \frac{\sum (Nf' + c'A)}{\sum T}$$

平面分层累计法核算计算公式如下:

$$K_c = [f_1'(R_1 - u_1) + c_1'A_1 + f_2'(R_2 - u_2) + c_2'A_2] / P_y$$

$$R_1 = P_x / \sin \delta \quad R_2 = (W + P_z) - R_1 \cos \delta$$

式中 N及S—由拱端传来的轴向推力H<sub>a</sub>和剪力V在侧向滑移面上的法向力及滑移力;

W—抗滑岩体的重量, kN;

γ—岩体容重, kN/m<sup>3</sup>;

γ<sub>0</sub>—水容重, kN/m<sup>3</sup>;

L—滑移面的长度, m;

H<sub>ai</sub>—第i层单位高程拱圈处坝端沿拱轴向作用的合力, t;

V<sub>i</sub>—第i层单位高程拱圈处坝端沿拱径向作用的合力, t;

G<sub>i</sub>—第i及i-1层坝端单位宽度梁的平均铅直力, t;

U<sub>1</sub>、U<sub>2</sub>—分别为侧滑面、底滑面扬压力;

f<sub>1</sub>、f<sub>2</sub>—分别为侧滑面、底滑面抗剪断摩擦系数;

c<sub>1</sub>、c<sub>2</sub>—分别为侧滑面、底滑面抗剪断凝聚力;

θ—侧滑面与拱端夹角, °;

δ—陡倾角结构面倾角, °;

φ—铅直向与基岩面夹角, °;

ΔH—滑移面的平均水头, m;

A—底滑面面积, m<sup>2</sup>。

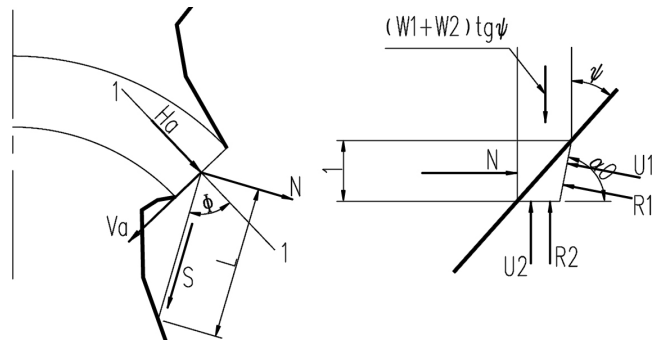


图1 坝基稳定计算示意图

按照拱坝坝型采用中国水利水电科学研究院“ADASO”程序计算出拱端力系后,各高程拱端抗滑稳定计算结果见表4。

由以上计算成果可知:571m和582m高程分层稳定安全系数不满足规范要求,但整体稳定满足规范要求,坝肩稳定满足规范要求。

四、结语

芙蓉江清溪水电站建成多年,运行稳定。本次结合施工期开挖试验资料,通过钻勘试验验证,对坝肩地质参数基础资料作了大量的研究,确定出合理参数,采用刚体极限平衡的方法分析芙蓉江清溪水电站大坝坝肩稳定,计算成果满足规范要求,与现场情况相符。

参考文献

- [1] 潘家铮、黎展眉. 拱坝坝头稳定分析。
- [2] 潘家铮. 建筑物抗滑稳定和滑坡分析。
- [3] 王毓泰. 拱坝坝肩岩体稳定分析。

表4 坝肩分层抗滑稳定复核计算成果表

高程 (m)	正常+温降工况 (基本组合)		校核+温升工况 (特殊组合)		备注
	左岸	右岸	左岸	右岸	
620.00	14.59	9.33	7.12	5.55	
604.00	5.61	4.15	5.63	3.62	
593.00	3.50	3.0	3.63	2.88	
582.00	2.47	2.61	2.51	2.56	
571.00	2.18 (3.03)	1.67 (3.82)	2.18 (3.09)	1.62 (2.86)	
560.00	3.66	3.07	2.69	3.04	
549.00	3.69	4.23	3.85	4.35	

备注: 括号内为各高程以上分层累计安全系数。