

岗曲河一级水电厂溃坝洪水计算及影响分析

王熹

中国电建集团江西省电力设计院有限公司

摘要:本工程以岗曲河一级水电站为例,结合大坝的布置、结构、水位和入库流量等条件,拟定F1、F2、F3等三种不同的溃坝洪水计算方案。以圣维南方程组为基础,建立洪水演进数学模型。采用一维和二维相结合的方法计算洪水在河道中的演进,编制洪水演进程序,得出任一时刻的水位和流量;从而分析对下游沿岸城镇及工程建筑物的影响。

关键词: 电站; 溃坝; 洪水计算

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.23.070

一、项目概况

岗曲河一级水电站位于云南省迪庆藏族自治州香格里拉县格咱乡木鲁村附近,是岗曲河流域规划开发6级方案中的第5级电站(干流上的第1级),岗曲河一级水电站为III等工程。岗曲河一级水电站位于落差比较集中的河道,无航运、过木要求,电站下游无防洪对象,也无灌溉供水要求。本项目位于岗曲河流域,坝址以上流域面积1984km²;厂址距离坝址下游约8km,流域面积2091km²。

二、计算方法

对于山区河道,宜采用一维数学模型计算溃坝洪水演进^[1]。但根据溃坝洪水模拟技术规程,地形图1:10000时,采用二维数学模型模拟溃坝洪水^[2]。综合考虑本工程所处河段特性和规程要求,本研究采用一维和二维相结合的方法计算洪水在河道中的演进^[3]。

(一) 基本方程

一维洪水波采用圣维南方程进行计算,圣维南方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial Q}{\partial y} + \frac{\partial(A+A_0)}{\partial t} - q = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e\right) = 0 \end{cases}$$

式中:

Q ——流量,当计算向下游演进时, Q 即为坝址处的下泄流量;

A ——有效过水断面面积;

A_0 ——非河槽蓄水的断面面积(滩地面积);

x ——顺水流方向的距离;

t ——时间;

q ——沿河道单位距离的侧向入流或出流;

g ——重力加速度;

$$S_f \text{——摩阻比降 } S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{2.214^2 R^{4/3}}$$

$$S_e \text{——局部损失 } S_e = \frac{k\Delta(Q/A)^2}{2g\Delta x}$$

h ——水面高程;

k ——收扩系数,收缩时取正值,扩张时取负值,否则为0。

二维洪水演进采用的守恒型二维浅水方程描述,该方程为:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S(U, x, y)$$

其中, $U = (h, q_x, q_y)^T$, 为守恒型变量组成的向量, h 为水深, $q_x = uh$ 、 $q_y = vh$, 分别为 x 方向和 y 方向单宽流量, (u, v) 为水深平均速度 u 在 (x, y) 坐标上分量, 矢量通量 F 、 G 分别为:

$$F = \left(q_x, \frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2, \frac{q_x q_y}{h} \right)^T$$

$$G = \left(q_y, \frac{q_x q_y}{h}, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \right)^T$$

公式中, g 为重力加速度, $\frac{1}{2}gh^2$ 是根据静水压强分布假设计算出的沿水深方向每个控制体的通量, 源项 S 包含了由于壁面摩擦作用, 床面以上水深压力产生的切向力

$$S = (0, gh(S_{0x} - S_{fx}), gh(S_{0y} - S_{fy}))^T$$

河床附件的床面坡降计算公式如下

$$S_{0x} = -\frac{\partial z_b}{\partial x}, S_{0y} = -\frac{\partial z_b}{\partial y}$$

河床的切应力计算根据曼宁摩阻法则计算:

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$$

其中, n 为曼宁糙率。

(二) 初始条件和边界

1. 初始条件

求解非恒定流方程时, 首先必须知道初始时刻($t=0$)各断面的水位 h 和流量 Q , 本模型假定初始时刻为恒定非均匀流, 各断面的初始流量由下式计算:

$$Q_i = Q_{i-1} + q_{i-1} \quad i=2, 3, \dots, N$$

初始时刻的水位由下式计算:

$$\frac{\left(\frac{Q^2}{A}\right)_{i+1} - \left(\frac{Q^2}{A}\right)_i}{\Delta x_i} + g \left[\frac{A_i + A_{i+1}}{2} \right] \left[\frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta x_i} + \frac{n^2(Q_i + Q_{i+1})^2(B_i + B_{i+1})^4}{2(A_i + A_{i+1})^{10/3}} \right] = 0$$

2. 边界条件

上游边界条件：用水库出流过程线 $Q(t)$ 来表示，在计算洪水波向下游演进时， $Q(t)$ 为已知值。

下游边界条件：可用水位~流量关系曲线来表示，若下游末端流量由河道控制，可由曼宁方程计算：

$$Q_N = \frac{1}{n} A_N^{5/3} B_N^{2/3} \left[\frac{h_{N-1} - h_N}{\Delta x_{N-1}} \right]^{1/2}$$

若下游末端流量由建筑物（如大坝）控制，则可用以下关系式作为下游边界条件：

$$Q_N = Q_b + Q_s$$

3. 计算参数确定

为了克服计算上的问题，需要合理地选择时间步长 Δt 和距离步 Δx 。

数学模型建议对较长河道初始计算的时间步长 Δt 按下式确定：

$$\Delta t = 0.5t \leq \tau - 0.5$$

$$\Delta t = \frac{t_p}{20t} > \tau - 0.5$$

距离步长按以下公式选择：

$$\Delta x \approx C \Delta t$$

三、溃坝洪水计算

(一) 溃坝方案

大坝的溃决形式主要取决于坝的类型、坝的基础和溃坝的原因。本电站坝型主坝为面板堆石坝，大坝基础建在基岩上。水压力通过坝直接传到坝基而保持坝体的稳定，若水压力一旦超过坝体的稳定条件及应力极限，就可能出现溃坝，由于本电站大坝主要以闸门拦水形成，因此如果发生溃坝，考虑为瞬时溃坝。

溃口尺寸则根据规模上假设为最不利情况全部溃决。根据岗曲一级水库的运行方式，溃决水位考虑了校核洪水位（0.1%）2584.18m、设计洪水位（1%）2583.09m、正常蓄水位2580m 三种水位工况。

综合岗曲一级水库的溃决水位及溃口尺寸等因素的组合情况，最终拟定了3种溃坝洪水计算方案，各方案的参数详见表3-1。

表 3-1 溃坝方案

溃决方案	溃口形状	入库流量 (m ³ /s)	溃时水位	溃口底高程 (m)	溃决历时	溃决因素
F1	梯形	1000 年一遇洪水过程	校核洪水位 2584.18m	2513	0.2h	洪水、启闭异常、上游溃坝、地震、战争、恐怖袭击
F2	梯形	100 年一遇设计洪水过程	设计洪水位 2583.09m	2513	0.25h	
F3	梯形	30 年一遇洪水过程	正常蓄水位 2580.00m	2513	0.4h	

(二) 溃坝洪水计算及成果分析

1. 溃口最大流量计算

根据数值计算成果，F1~F3 方案溃口最大流量见表3-2。

表 3-2 F1 ~ F3 各个方案溃口最大流量（单位：m³/s）

溃决方案	F1	F2	F3
溃口最大流量	1467	1736	1944

根据溃口最大流量可见，校核洪水全溃方案溃口处最大洪峰流量最大，达到1944m³/s，是校核洪水（1000年一遇）流量747m³/s的2.6倍；100年一遇洪水全溃方案下最大洪峰流量为1736m³/s；30年一遇洪水全溃方案下最大洪峰流量为1467m³/s

2. 溃坝洪水流量沿程变化

根据数值计算成果，F1~F3方案坝下游沿程各个断面最大洪峰流量计算结果如下：

(1) 各种溃坝方案下，溃口处最大洪峰流量最大，随后逐渐减小。1000年一遇校核洪水和100年设计洪水下F1、F2这2种方案沿程各个断面最大洪峰流量基本不变。30年一遇洪水对应的F3溃坝方案，沿程各个断面最大洪峰流量逐渐减小。

(2) 不同溃坝方案下，同一断面最大洪峰流量随

着入库洪水减小而减小。F1方案在8km处最大洪峰流量约为溃口最大洪峰流量的88%；F2方案在8km处最大洪峰流量约为溃口最大洪峰流量的82%；F3方案在8km处最大洪峰流量约为溃口最大洪峰流量的54%；

(3) F1、F2和F3三种全溃方案下，入库洪水越大，同一断面峰现时间越早。同一溃坝方案下，沿程各个断面峰现时间依次滞后。

3. 沿程最高洪水位

根据数值计算成果，F1~F3方案坝下游沿程各个断面最高洪水位计算结果如下：

(1) 随着溃口流量在下游的衰减和河床底部高程变化，坝下游沿程各个断面最高洪水位均呈现减小趋势，减小幅度随着距坝距离的增加而减小。

(2) 根据最高水位变化可见水面平均比降约为0.19%。

(3) F1溃坝方案，8km断面最高洪水位在482.1m，略低于岗曲一级水电站50年一遇设计洪水位482.92m。

4. 最大水面宽度

根据数值计算成果，F1~F3方案坝下游沿程各个断面最宽水面宽度计算结果如下：

(1) 坝下游沿程各个断面水面宽度直接和地形地

貌相关，规律性不强，各个断面最大水面宽度变化较大。其中1km、6km~7km之间，最大水面宽度均比较大，在750m~1040m之间。

(2) 同一断面，随着溃坝流量减小，断面最大水面宽度依次减小。其中坝下游1km左右，各种方案下最大水面宽度在800m~930m之间。

四、结论

(一) 溃坝影响下游对象

大坝或左岸副坝溃坝均会对下游造成很大破坏，水库溃坝洪水对导致下游木鲁村、尺鲁村、少量农田及上桥头水文站淹没。

(1) 木鲁村，距坝3.5km左右木鲁村至上桥头村入江口段河流流向转为SW向。两岸地面高差1000m~1500m。该段为高山峡谷区，谷坡陡峻，河谷狭窄，河流湍急，河谷宽度50m~200m。河谷形态呈较对称的“V”字型，右岸谷底发育有漫滩，部分被开垦为农田。

(2) 次卡村，距坝4km左右。次卡村临近木鲁村，此流域两岸地面高差1000m~1500m。该段为高山峡谷区，谷坡陡峻，河谷狭窄，河流湍急，河谷宽度50m~200m。河谷形态呈较对称的“V”字型，右岸谷底发育有漫滩，部分被开垦为农田。

(3) 尺曲村，距坝8km左右。尺曲村属于香格里拉市北部，在岗曲河右岸山腰处，此段流域平直，河流较平顺，河谷形态呈较对称的“V”字形，左岸较右岸平坦。

(二) 溃坝洪水影响范围

(1) F1正常蓄水位溃坝方案：洪水演进过程中除了会对两岸河漫滩地形成的河谷林地带造成淹没以外，淹没范围内主要涉及沿岸公路和桥梁。坝址下游左岸木鲁村(阿莫)和次卡村位于沿岸山脉，高程较高，高于2576m，距坝址处3.5~4.5km，淹没水深在9~12m，水面最大高程2502~2510m，木鲁村与次卡村免于受灾。坝址下游右岸尺曲村位于岗曲河右岸，距坝址8~9km，最低高程高于2534m，高于淹没水面高程2472~2474m，免于受灾。

(2) F2设计洪水水位溃坝方案：洪水演进过程中除了会对两岸河漫滩地形成的河谷林地带造成淹没以外，淹没范围内主要涉及沿岸公路和桥梁。坝址下游左岸木鲁村和次卡村位于沿岸山脉，高程较高，高于2576m，距坝址处3.5~4.5km，淹没水深在10~13m，水面最大高程2503~2512m，木鲁村与次卡村免于受灾。坝址下游右岸尺曲村位于岗曲河右岸，距坝址8~9km，最低高程高于2534m，高于淹没水面高程2473~2475m，免于受灾。

(3) F3校核洪水水位溃坝方案：洪水演进过程中除了会对两岸河漫滩地形成的河谷林地带造成淹没以外，淹没范围内主要涉及沿岸公路和桥梁。坝址下游左岸木鲁村(阿莫)和次卡村位于沿岸山脉，高程较高，高于2576m，距坝址处3.5~4.5km，淹没水深在11~14m，水面

最大高程2504~2513m，木鲁村与次卡村免于受灾。坝址下游右岸尺曲村位于岗曲河右岸，距坝址8~9km，最低高程高于2534m，高于淹没水面高程2474~2479m，免于受灾。

表 4-1 3种溃坝方式沿河各断面最高洪水位统计表

序号	地物名称	距坝里程 (km)	最高洪水位 (m)		
			F1 溃坝	F2 溃坝	F3 溃坝
1	阿莫(木鲁)断面	3.5	2510.9	2512	2512.9
2	次卡断面	4.5	2502.4	2503	2504.4
3	尺曲断面	8.5	2472.3	2473.6	2474.5

(三) 溃坝洪水对下游沿岸城镇及工程建筑物的影响

(1) 木鲁村。木鲁村村位于大坝左岸，距离坝址距离较近，高程位置较高，初始溃坝洪水较大，会对靠近河道侧公路产生部分淹没。

1) F1溃坝方案洪水行进至此，最大洪峰流量约为1024m³/s，最高洪水位会达到2510.93m，大于1000年一遇洪水，对于20年一遇防洪标准设计的防洪堤会产生洪水威胁。

2) F2设计洪水全溃坝方案洪水行进至此，最大洪峰流量约为1198m³/s，最高洪水位会达到2512.06m，大于1000年一遇洪水，对于20年一遇防洪标准设计的防洪堤会产生洪水威胁。

3) F3校核洪水全溃方案下，洪水行进至此，最大洪峰流量约为1372m³/s，最高洪水位会达到2512.89m，大于1000年一遇洪水，对于20年一遇防洪标准设计的防洪堤会产生洪水威胁。

(2) 次卡村。次卡村位于大坝左岸，距离坝址距离较近，F3溃坝方案，最大洪峰流量衰减至1301m³/s，最高洪水位2504.47m，岗曲一级大坝溃坝后会抬高库水位，但次卡村与河道之间有山脉阻隔，洪水不会对次卡村造成影响。

(3) 尺曲村。尺曲村位于岗曲一级大坝右岸，较坝址处较远，洪水演进到此处时，洪峰流量以衰减。F3校核洪水溃坝方案，最大洪峰流量衰减至997m³/s，最高洪水位2466.43m，对尺曲村产生的影响较小。

参考文献

[1] 赵健, 孙毅. 横泉水库溃坝与下游区间洪水及其演进分析[J]. 海河水利, 2022, (05): 56-60.
 [2] 罗琳, 郭术芳, 黄吉奎. 基于MIKE11模拟的玉水水库工程溃坝洪水计算及影响分析[J]. 陕西水利, 2021, (11): 61-64.
 [3] 杨宝林, 邱熠晨. 水库溃坝洪水计算及影响分析——以礼亨水库为例[J]. 广东水利水电, 2022, (01): 47-51.

作者简介: 王熹(1990-), 男, 江西九江人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事电力设计、电力水文气象、环水保等分析研究。