

# 三江电站溢流式厂房上部结构设计

四川省水利水电勘测设计院 雷 声

## 一、工程概况

三江电站位于巴河中游大濠滩，距巴中县城22公里，为发电、通航的综合利用工程。电站装机容量6800千瓦，年发电量3050万度，主要用于提灌、粮棉油加工、农机修配等。船闸年通航能力为21.2万吨。

巴河属渠江支流，源于南江县小巴山，流经南江、巴中、平昌，至渠县三汇镇汇入渠江，全长350公里，流域面积18,000平方公里。河道平均坡降0.11%。

巴河大濠滩段长约1公里，河道顺直，河床比降平缓，河谷断面呈U形，宽约180米。坝址附近基岩裸露，属白垩系剑门关组长石石英砂岩，厚80余米，质地坚硬。左岸坡度 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ，右岸呈台阶状地形，坡度 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。

当地5月至10月多雨，洪水常发生在7到10月，一次洪水历时3至7天，涨落较快。坝址处校核洪水位与枯水位（多年平均最小流量 $4.34\text{米}^3/\text{秒}$ 时的水位）的差值达33.8米。

本工程主要建筑物包括船闸、溢流重力坝、溢流厂房、综合廊道及付厂房等项。船闸单级闸室宽12米，长60米，上引航道长80米，下引航道长226米；溢流坝长110米，最大坝高17.3米，坝顶高程334.3米；溢流厂房长57.8米，宽41.9米，高30.72米，最高顶高程340.54米；综合廊道长100米，坡度1:2，进口高程363.0米。付厂房布置在左岸361.5米高程上，长33.6米，宽10.2米。枢纽布置见图1。

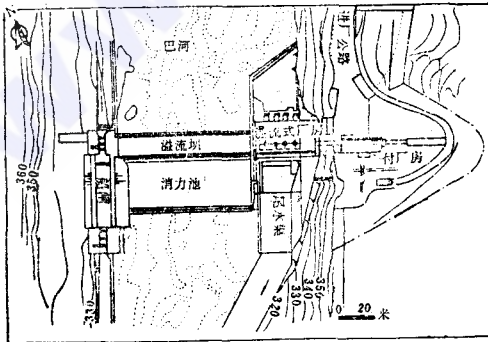


图1 枢纽平面图

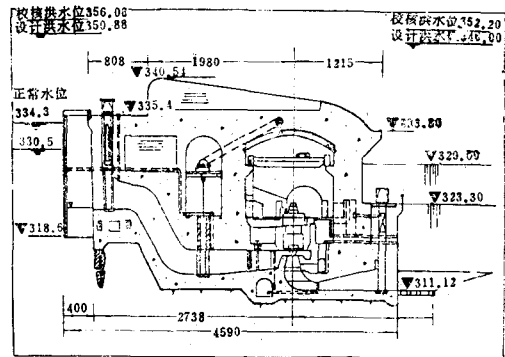


图2 厂房横剖面图

土建施工及机组安装均由巴中县负责，1977年10月动工，1980年12月建成。

## 二、溢流式厂房设计

坝址处洪枯水位相差悬殊，经过各种方案比较后，选定了溢流式厂房方案（图2）。其特点是：事故闸门的安装、启闭和检修，均在厂内进行。在流量为 $4100\text{米}^3/\text{秒}$ 时，厂顶开始溢流；当流量大于 $14,000\text{米}^3/\text{秒}$ 时，整个厂房即潜没于水下。为了摸清洪水期厂区流态、厂坝过流能力及水流脉动特性，前后作了两次水工模型试验——半整体模型与整体模型试验。应用电算与手算，论证了厂房自振特性及厂房上部结构应力分布。

### （一）模型试验\*

半整体模型试验在1.5米宽玻璃水槽内进行，模型比尺1:60，截取溢流坝长30米，厂房长43米（3台机组）。从图3可看出：厂房上游出现侧收缩。由于厂顶与坝顶高差6米而形成横向流，加上过坝水流的影响，最后汇成一股沿厂房坪壁向上翻滚的螺旋水流，严重地冲刷坝脚；厂房下游出现反向回流；厂顶发生水跃，最大振幅1.004米，最大双倍振幅1.445米，最高主频率15次/秒。

考虑到半整体模型难以反映真实情况，决定在半整体模型基础上做整体模型试验，修改如下：

1. 改变厂顶曲面形状，将下游厂顶适当提高；
2. 在厂房上游加设导墙，长35米，将厂房下游导墙增长30米；
3. 将安装间厂顶曲面形状，改为与主厂房厂顶一致；
4. 溢流坝下游改为低坝，适当加高下游消力坎；

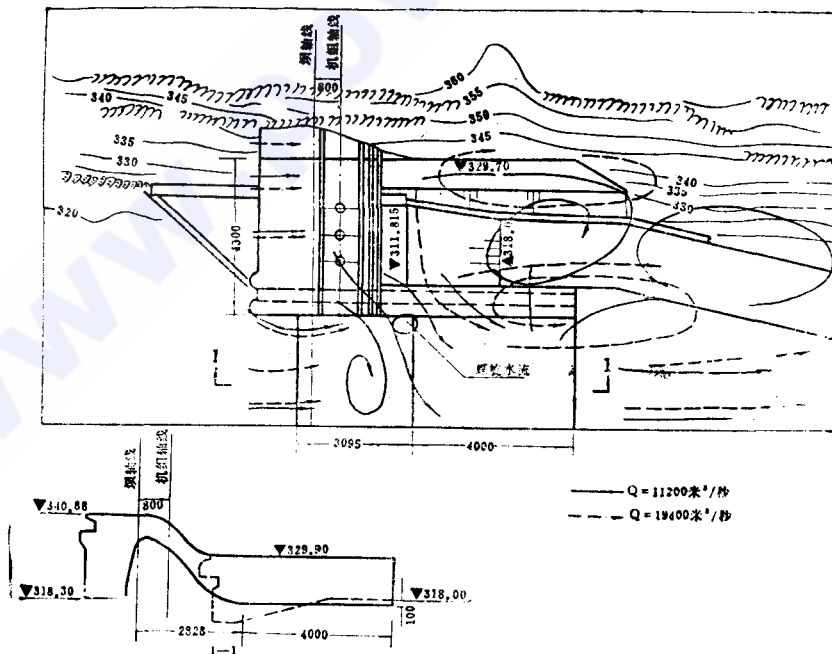


图3 半整体模型试验布置及流态示意图

\* 本电站水工模型试验，由水电部成都勘测设计院科研所承担。

5. 修改厂房岸边接头, 使之衔接平顺;

6. 厂内增装一台机组, 厂房长57.8米。

整体模型比尺1:85。由于受供水能力限制, 最大流量仅为19,360米<sup>3</sup>/秒。

试验表明: 水流条件较好; 流量为11,200米<sup>3</sup>/秒时, 厂房下游由原淹没面流变为混合面流, 水跃被推向下游(图4); 未出现螺旋水流, 下游回流现象有显著减弱, 厂坝间横向流

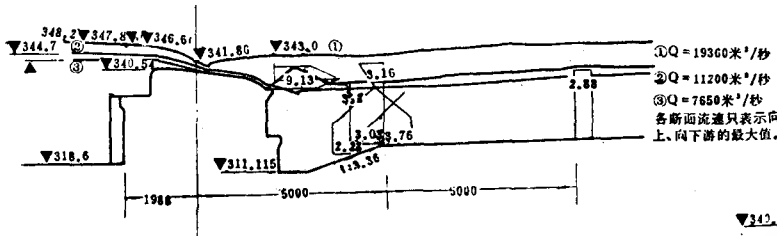


图4 厂顶、厂房下游水面线及流速分布

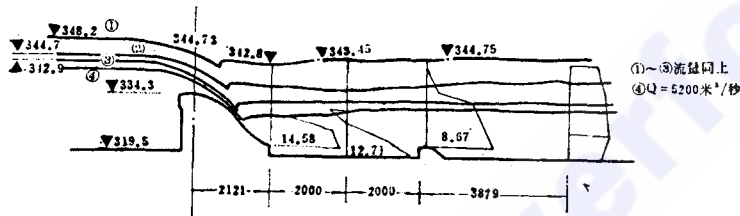


图5 溢流坝顶、下游水面线及流速分布

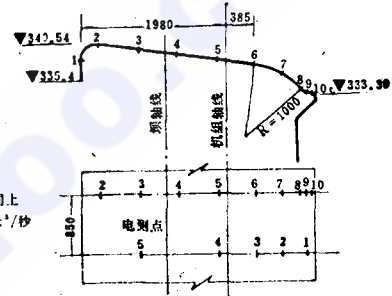


图6 厂顶测压管布置

表1 整体模型试验厂顶时均压力表

测点	高程 米	测点压力 (米)		
		7650米 <sup>3</sup> /秒	11200米 <sup>3</sup> /秒	19360米 <sup>3</sup> /秒
1	338.64	4.44	6.29	8.29
2	340.54	1.59	2.34	3.14
3	339.77	1.41	2.61	5.11
4	339.00	1.08	2.13	4.68
5	338.23	0.90	1.85	4.15
6	337.48	1.52	1.50	5.05
7	336.31	0.10	-0.55	4.37
8	334.00	1.68	2.78	9.63
9	333.49	2.24	3.64	10.24
10	333.30	2.62	5.68	11.28

有所改善，各种特征流量下，厂顶各点的脉动压力（表1）和振幅值（表2）均比原来减少甚多，各点频率值有所增加；在各种流量下，溢流坝下游均为淹没底流，消能效果比原来好。

表2 厂顶脉动压力统计分析成果

流量 米 <sup>3</sup> /秒	上游水位 (米)	下游水位 (米)	测点	最大振幅 (米)	最大双倍振幅 (米)	主振幅 (米)	主频率 (次/秒)	主频机率 (N%)
19360	348.20	344.26	1	0.26	0.37	0.27	2.5~5	46.2
			2	0.50	0.71	0.52	5~10	30
11200	344.70	337.80	1	0.25	0.36	0.24	20~25	20
7650	342.90	334.20	1	0.22	0.32	0.22	5~10	36

### (二) 厂房自振特性计算\*

按两种不同厂房结构型式的模型试验分别计算了厂房自振特性（表3）。计算通过电子计算机进行，采用以迭代法为基础的“直接滤频法”计算程序。

表3 厂房自振特性计算结果

振型及 $\eta_{\min}$	半整体模型的 厂房结构型式	整体模型的 厂房结构型式
第一振型	36 (赫芝)	71 (赫芝)
第二振型	47	143
$\eta_{1\min}$	2.4	2.84
$\eta_{2\min}$	3.13	5.72

从上表可看出，厂房不会发生共振现象。整体模型的厂房结构型式其抗振性能更好。

### (三) 厂房上部结构应力计算

#### 1. 荷载组合分两种情况：

(1) 洪水水流脉动压力 + 上下游水压力 + 结构自重；

\* 参加厂房自振特性计算及上部结构应力计算的有梁春华、吴桐椿、赖家桂和周秀芳同志。

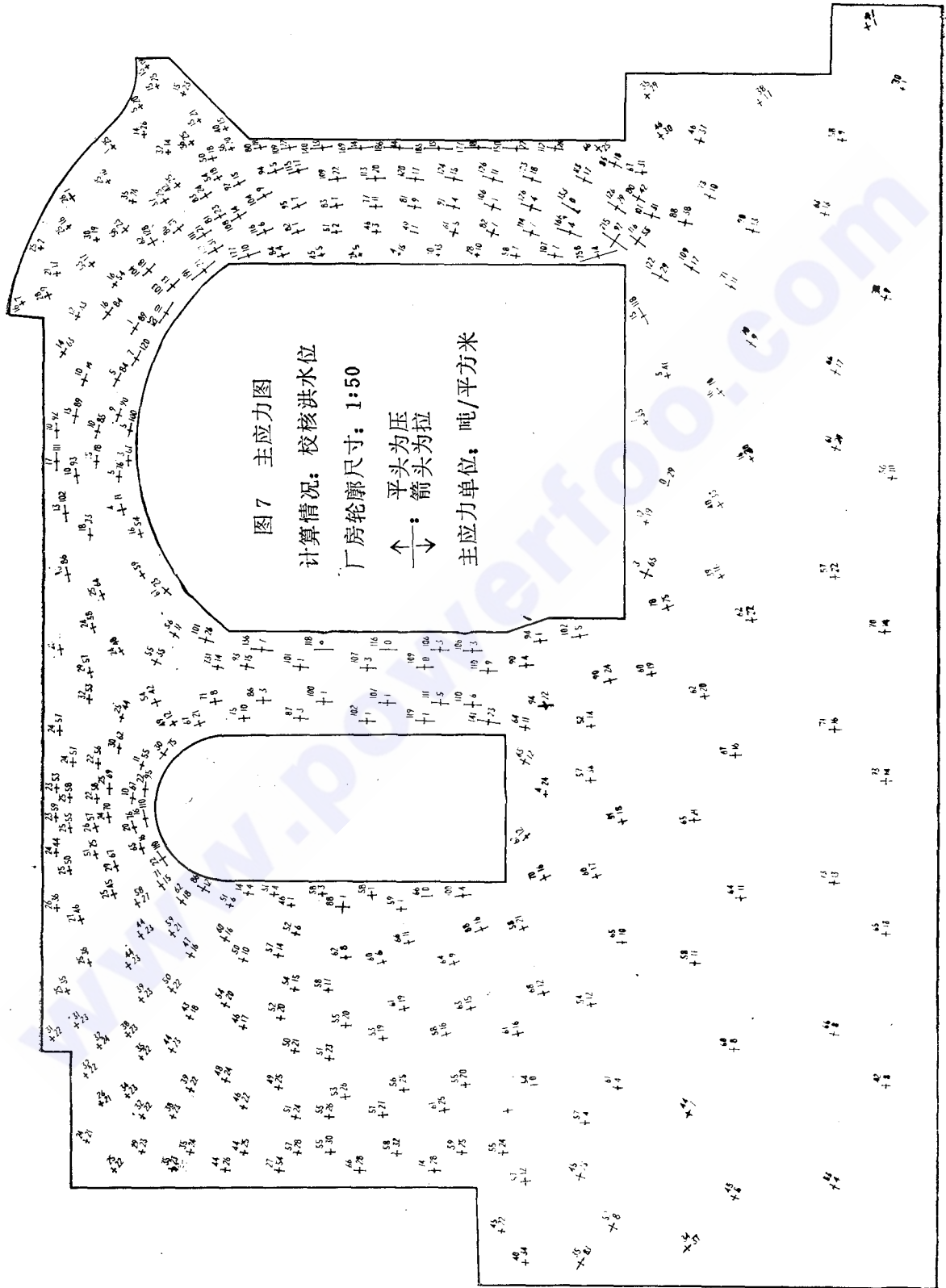
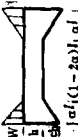


表4 净跨形载常数计算公式

杆件及荷载图	形常数	计算公式
	$\delta_{11}$	$\frac{l}{2EJ} \left\{ 2(1-2\alpha) + \frac{2\alpha}{C} \left[ 1 - \frac{1}{(1+C)^2} \right] \right\}$
	$\delta_{12}$	$\frac{1}{2} \delta_{11} l$
	$\delta_{22}$	$\frac{l^3}{2EJ} \left\{ \frac{2}{3} - 2\alpha + 2\alpha^2 - \frac{4}{3}\alpha^3 + \frac{\alpha(1-\alpha)^2}{C} \left[ 1 - \frac{1}{(1+C)^2} \right] + \frac{2\alpha^2(1-\alpha)}{(1+C)^2} \right\} + C^2 - 2C - \frac{2C+3C^2}{(1+C)^2} - \frac{1}{4} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \left[ 2(1-2\alpha) + \frac{4\alpha}{C} \ln(1+C) \right] \right\}$
	$\Delta_{1P}$	$-\frac{ql^3}{4EJ} \left\{ \frac{2}{3} - 2\alpha + 2\alpha^2 - \frac{4}{3}\alpha^3 + \frac{\alpha(1-\alpha)^2}{C} \left[ 1 - \frac{1}{(1+C)^2} \right] + \frac{2\alpha^2(1-\alpha)}{(1+C)^2} \right\} + \left( \frac{\alpha}{C} \right)^3 \left[ 4\ln(1+C) + C^2 - 2C - \frac{2C+3C^2}{(1+C)^2} \right] \right\}$
	$\Delta_{2P}$	$-\frac{ql^4}{4EJ} \left\{ \frac{1}{2} - 2\alpha + 3\alpha^2 - 2\alpha^3 + \frac{\alpha(1-\alpha)^3}{C} \left[ 1 - \frac{1}{(1+C)^2} \right] + \frac{3\alpha^2(1-\alpha)^2}{(1+C)^2} \right\} + 3(1-\alpha) \left( \frac{\alpha}{C} \right)^3 \left[ 2\ln(1+C) - \frac{2C+3C^2}{(1+C)^2} \right] + \left( \frac{\alpha}{C} \right)^4 \left[ 6C\ln(1+C) - 4C - 3C^2 \right] + C^3 + \frac{4C+5C^2}{(1+C)^2} + \frac{1}{2} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \left[ 1 - 2\alpha + \frac{2\alpha}{C} \ln(1+C) \right] \right\}$
	$\Delta_{1P}$	$-\frac{Wl^3}{12EJ} \left\{ 3\alpha - 8\alpha^2 + 4\alpha^3 + \left( \frac{\alpha}{C} \right)^3 \left[ 8 - 3C - 2C^2 - \frac{12\ln(1+C)}{C} + \frac{4+5C+4C^2+3C^3}{(1+C)^2} + \frac{3C^2}{\alpha} - \frac{3C^2}{\alpha(1+C)^2} \right] \right\}$
	$\Delta_{2P}$	$-\frac{Wl^4}{12EJ} \left\{ \left\{ 2\alpha - 7\alpha^2 + 8\alpha^3 - 4\alpha^4 + \left( \frac{\alpha}{C} \right)^4 \left[ 2C^3 - 5C^2 + C + 6 + 12C\ln(1+C) - 6\ln(1+C) - \frac{6+7C+6C^2+9C^3}{(1+C)^2} \right] \right\} + \left( \frac{\alpha}{C} \right)^3 (1-\alpha) \left[ \frac{3C^2}{\alpha} - \frac{3C^2}{\alpha(1+C)^2} + \frac{4+5C+4C^2+3C^3}{(1+C)^2} + 2 - 4C^2 - \frac{6\ln(1+C)}{C} \right] + \frac{3\alpha^3 - 4\alpha^4}{1+C^2} \right\} + \frac{3}{2} \left( \frac{h}{l} \right)^2 \left\{ \alpha - 2\alpha^2 + \frac{\alpha^2}{C} \ln(1+C) + 2\frac{\alpha^2}{C^2} (1+C) \ln(1+C) - 2\frac{\alpha^2}{C} + \frac{\alpha^2}{C^3} [\ln(1+C) - (1+C)^2 \ln(1+C) + 2C^2] \right\} \right\}$

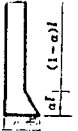
	形 常 数	$\delta_{11}$	$\frac{l}{2EJ} \left\{ 2(1-\alpha) + \frac{\alpha}{C} \left[ 1 - \frac{1}{(1+C)^2} \right] \right\}$
		$\delta_{12}$	$\frac{l^2}{2EJ} \left( 1 - \alpha^2 + \frac{\alpha^2}{1+C} \right)$
		$\delta_{22}$	$\frac{l^3}{2EJ} \left\{ \frac{2}{3}(1-\alpha^3) + \left(\frac{\alpha}{C}\right)^3 \left[ 2 \ln(1+C) - 2C + C^2 \right] + \frac{1}{4} \left(\frac{h}{l}\right)^2 \left[ 2(1-\alpha) + \frac{\alpha}{C} 2 \ln(1+C) \right] \right\}$
		$\Delta_{1P}$	$-\frac{ql^3}{4EJ} \left\{ \frac{2}{3}(1-\alpha^3) + \left(\frac{\alpha}{C}\right)^3 [2 \ln(1+C) - 2C + C^2] \right\}$
			$-\frac{ql^4}{4EJ} \left\{ \frac{1}{2}(1-\alpha^4) + \left(\frac{\alpha}{C}\right)^4 [6(1+C) \ln(1+C) - 6C - 3C^2 + C^3] + \right.$
		$\Delta_{2P}$	$\left. \frac{1}{2} \left(\frac{h}{l}\right)^2 \left[ 1 - \alpha^2 + 2 \left(\frac{\alpha}{C}\right)^2 (1+C) \ln(1+C) - 2C \left(\frac{\alpha}{C}\right)^2 \right] \right\}$
		$\Delta_{1P}$	$-\frac{Wl^8}{12EJ} \left\{ \frac{1}{2}(1-\alpha^4) + \left(\frac{\alpha}{C}\right)^4 [6(1+C) \ln(1+C) - 6C - 3C^2 + C^3] \right\}$
			$-\frac{Wl^4}{12EJ} \left\{ \frac{2}{5}(1-\alpha)^5 + \left(\frac{\alpha}{C}\right)^5 [12(1+C)^2 \ln(1+C) + C^4 - 4C^3 - 18C^2 - 12C] \right.$
		$\Delta_{2P}$	$\left. \frac{1}{2} \left(\frac{h}{l}\right)^2 \left[ 1 - \alpha^3 + 3 \left(\frac{\alpha}{C}\right)^3 (1+C)^2 \ln(1+C) - 4.5C^2 \left(\frac{\alpha}{C}\right)^3 - 3C \left(\frac{\alpha}{C}\right)^3 \right] \right\}$
		$\delta_{11}$	$\frac{l}{2EJ} \left\{ 2(1-\alpha) + \frac{\alpha}{C} \left[ 1 - \frac{1}{(1+C)^2} \right] \right\}$
		$\delta_{12}$	$\frac{l^2}{2EJ} \left\{ (1-\alpha)^2 + \frac{\alpha}{C} (1-\alpha) \left[ 1 - \frac{1}{(1+C)^2} \right] + \frac{\alpha^2}{(1+C)^2} \right\}$
		$\delta_{22}$	$\frac{l^3}{2EJ} \left\{ \frac{2}{3}(1-\alpha)^3 + \frac{2(1-\alpha)\alpha^2}{(1+C)^2} + \frac{\alpha}{C} (1-\alpha)^2 \left[ 1 - \frac{1}{(1+C)^2} \right] + \left(\frac{\alpha}{C}\right)^3 \left[ 2 \ln(1+C) - \frac{2C+3C^2}{(1+C)^2} \right] \right.$
			$\left. + \frac{1}{2} \left(\frac{h}{l}\right)^2 \left[ 1 - \alpha + \frac{\alpha}{C} \ln(1+C) \right] \right\}$

表5 杆件净跨抗挠刚度  $S_{AB}$ 、相干系数  $T_{AB}$ 、抗推刚度  $J_{AB}$ 、传递系数  $C_{AB}$ 、固端力距  $M_{AB}^F$ 、固端剪力  $Q_{AB}^F$  算式表

$S_{AB}$	$T_{AB}$	$J_{AB}$	$C_{AB}$	$M_{AB}^F$	$Q_{AB}^F$	备注
$\frac{\delta_{22}}{K}$	$\frac{\delta_{12}}{K}$	$\frac{\delta_{11}}{K}$	$\frac{\delta_{12}}{\delta_{22}} - 1$	$\frac{\Delta_{2P}\delta_{12} - \Delta_{1P}\delta_{22}}{K}$	$\frac{\Delta_{2P}\delta_{11} - \Delta_{1P}\delta_{12}}{K}$	$K = \delta_{11}\delta_{22} - \delta_{12}^2$

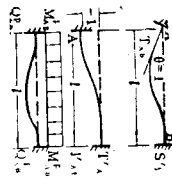
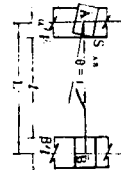


表6 节点跨度抗挠刚度  $\overline{S_{AB}}$ 、传递系数  $\overline{C_{AB}}$ 、分配系数  $\gamma_{AB}$ 、固端力距  $\overline{M_{AB}^F}$  算式表

$\overline{S_{AB}}$	$\overline{C_{AB}}$	$\gamma_{AB}$	$\overline{M_{AB}^F}$	备注
$2\alpha'(1+\alpha')S_{AB} + (1+\alpha')^2 S_{AB}$	$\frac{(1+\alpha' + \beta' + 2\alpha'\beta')S_{AB}C_{AB} + \beta'(1+\alpha')S_{AB} + \alpha'(1+\beta')S_{AB}}{S_{AB}}$	$\frac{\overline{S_{AB}}}{\sum \overline{S_{AB}}}$	$\overline{M_{AB}^F} + Q_{AB}^F \alpha' l$	$S_{AB}C_{AB} = S_{BA}C_{BA}$





(2) 温降+结构自重。

2. 第一种情况计算:

厂顶脉动压力, 采用试验提供的时均压力乘以放大系数1.2后作为静荷载计算。厂房下游水流脉动影响甚微, 略去不计。计算分电算与手算。

电算按平面问题有限元法, 在DJS-6型计算机上进行。应力计算成果见图7。

手算按考虑杆件剪切变形及节间刚度影响的变截面刚架计算方法。

杆件净跨形载常数是积分法推导的, 计算公式列于表4。杆件净跨抗挠劲度、相干系数、抗推劲度、传递系数及固端力矩等计算公式列于表5。杆件节点跨度抗挠劲度、传递系数、分配系数及固端力矩等计算公式列于表6。

表4中, 凡带有  $h/l$  项者, 即为剪切变形影响值。三江电站溢流式厂房上部结构的最小  $h/l$  为0.25; 最大  $h/l$  为0.877。剪切变形影响值占形载常数  $\delta_{2,2}$  的6.7%~38%, 占均布荷载载常数  $\Delta_{2,P}$  的5.2%~43%, 占三角形荷载载常数的49%, 可见当  $h/l$  较大时, 剪切变形的影响不可忽略。

计算步骤如下:

- (1) 计算杆件净跨形载常数;
- (2) 计算杆件净跨抗挠劲度、相干系数、抗推劲度、传递系数、分配系数及固端力矩;
- (3) 力矩分配及侧移修正;
- (4) 计算切力及轴向力;
- (5) 绘制M、Q图。

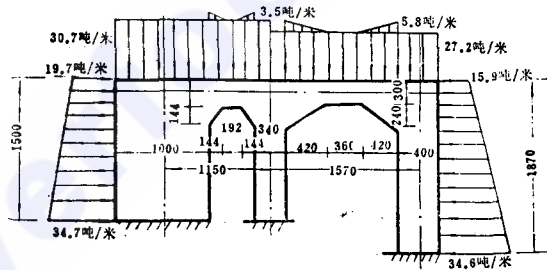


图8 厂房上部结构及荷载计算图

厂房上部结构及荷载分布如图8所示。将荷载划分成图9(A)和图9(B), 图9荷载对结构只产生轴向力。计算出的力矩和切力见图10(A)、10(B)。

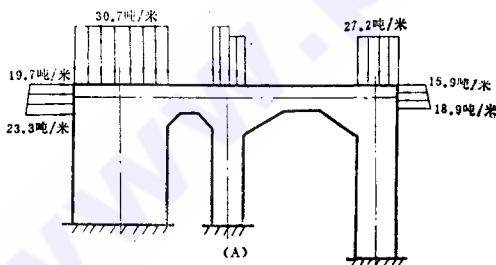


图9(A) 荷载划分一

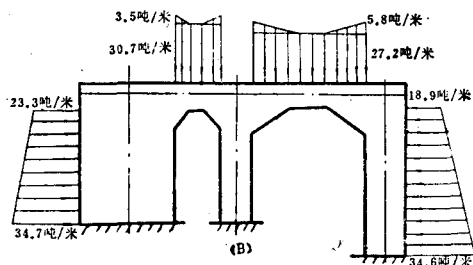


图9(B) 荷载划分二

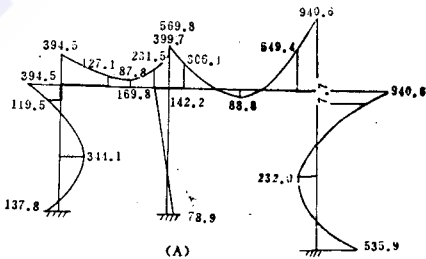


图10(A) M图

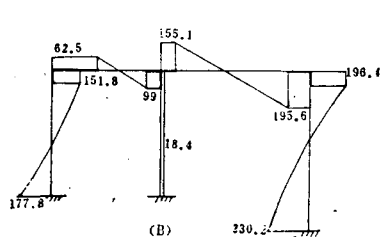


图10(B) Q图

### 3. 第二种情况计算

计算条件如下:

- (1) 混凝土浇筑时温度 $20^{\circ}\text{C}$ ;
- (2) 冬季室外温度 $5^{\circ}\text{C}$  (1月份平均气温);
- (3) 冬季室内温度 $15^{\circ}\text{C}$ ;
- (4) 夏季室内、外温度 $27^{\circ}\text{C}$  (7月份平均气温);
- (5) 混凝土干缩相当于温降 $10^{\circ}\text{C}$ ;
- (6) 夏季温升可不计算, 只计算冬季温降。温度应力按等截面计算。

第二种情况计算的结果见图11(A), 图11(B)。

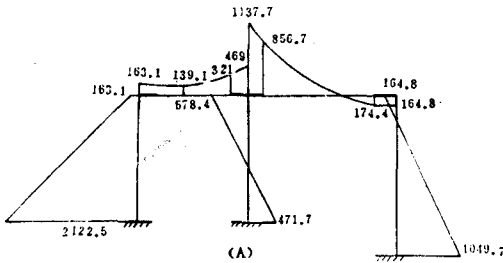


图11(A) M图

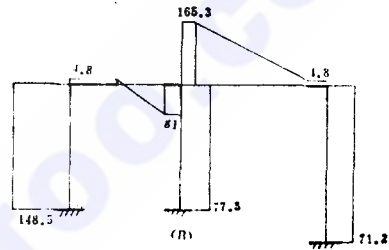


图11(B) Q图

## 三、结 语

本文介绍的溢流式厂房, 是一种洪水潜没式厂房。在进行这类厂房设计时, 应特别注意厂坝衔接处的横向流、水流侧收缩、厂房下游回流、尾水渠反向流速以及岸边冲刷等问题。

应用本文推荐的计算公式, 可进行考虑杆件剪切变形及节间刚性影响的变截面刚架计算。

1980年8月20日厂房土建接近完工时, 该厂房曾遭遇到一次洪水, 洪峰流量达 $17,000\text{米}^3/\text{秒}$ , 接近历史实测最大流量, 水流情况与模型试验基本吻合, 厂内无振动现象。

三江电站溢流坝单宽流量达 $180\text{米}^3/\text{秒}$ , 厂顶最大单宽流量为 $100\text{米}^3/\text{秒}$ , 厂顶最大溢流水深达 $15.52\text{米}$ 。这种情况, 对我们来说还是初次碰到, 由于缺乏经验, 设计中难免有不当之处。

笔者由于水平所限, 文中会存在不少缺点, 请读者予以批评指正。

## 参 考 资 料

- 1、三江电站工程技术总结, 四川省水利水电勘测设计院, 1980年7月。
- 2、三江电站厂房顶溢流方案水工模型试验阶段报告, 水利电力部成都勘测设计院研究所, 1978年4月。
- 3、三江电站厂房顶溢流方案整体模型试验报告, 水利电力部成都勘测设计院研究所, 1979年9月。
- 4、潘家铮: 水工结构计算 水利电力出版社, 1958年3月。