

# 藤子沟水电站 工程设计与技术研究

TENGZIGOU SHUIDIANZHAN

GONGCHENG SHEJI YU JISHU YANJIU

郑 军 付 欣 胡顺志 谭志军 编著



黄河水利出版社

# 藤子沟水电站 工程设计与技术研究

郑 军 付 欣 胡顺志 谭志军 编著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

## 内 容 提 要

藤子沟水电站工程位于重庆市石柱土家族自治县境内,长江右岸一级支流龙河的上游河段,是龙河流域上游最大的水利枢纽,也是龙河梯级开发方案中的龙头骨干工程。该工程由混凝土双曲拱坝、坝顶泄洪孔、水垫塘、引水隧洞、上下管桥和地面发电厂房等建筑物组成。本书详细介绍了该水电站工程各建筑物的设计理念、设计过程及设计方法,并结合试验研究,对结构设计进行复核和优化。

本书可为广大水利水电工程设计者提供借鉴,尤其对双曲拱坝设计和管桥设计,具有较高的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

藤子沟水电站工程设计与技术研究/郑军等编著. —郑州:黄河水利出版社,2018.5

ISBN 978-7-5509-2037-8

I. ①藤… II. ①郑… III. ①水力发电站-工程设计  
IV. ①TV7

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第095545号

策划编辑:杨雯惠 电话:0371-66020903 E-mail:yangwenhui923@163.com

出版社:黄河水利出版社

网址:www.yrcp.com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南新华印刷集团有限公司

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:18

字数:416千字

印数:1—1 000

版次:2018年5月第1版

印次:2018年5月第1次印刷

定价:98.00元

# 前 言

藤子沟水电站位于重庆市石柱土家族自治县境内,长江右岸一级支流龙河的上游河段,是龙河流域上游最大的水利枢纽。藤子沟水电站采用混合式开发方式,其工程由挡水建筑物、泄洪消能建筑物、引水系统和厂房系统组成。

藤子沟水电站 2005 年并网发电,至今已正常运行 13 年,经过大小洪水考验,运行状况良好。为总结工程设计经验并为设计者提供参考,编者对藤子沟水电站工程各建筑物设计进行了整编,并收纳了结构设计相关的试验研究内容。本书在编写过程中收到了该工程设计者提供的宝贵资料和宝贵意见,在此表示衷心感谢。

本书结合相关试验研究详细介绍了混凝土双曲拱坝、坝顶泄洪孔、水垫塘及二道坝消能建筑物、引水系统(包括进水口、引水隧洞、上下管桥、调压井和压力管道五部分)和地面发电厂房的布置及设计过程,并针对工程中的关键技术进行了专题研究。本书摘录了五部分内容,分别是双曲拱坝整体稳定地质力学模型试验研究、双曲拱坝整体稳定三维非线性有限元研究、大坝混凝土温度控制研究、引水隧洞上下管桥结构研究和泄洪消能整体水工模型试验研究,供广大设计者参考。

由于编者的学识和水平所限,本书尚存疏漏和不足之处,敬请广大读者指正。

编 者  
2018 年 3 月

# 目 录

## 前 言

|                        |      |
|------------------------|------|
| 1 工程概况 .....           | (1)  |
| 1.1 工程地理位置 .....       | (1)  |
| 1.2 工程枢纽概况 .....       | (1)  |
| 2 双曲拱坝设计 .....         | (2)  |
| 2.1 体型设计 .....         | (2)  |
| 2.2 坝体应力分析 .....       | (7)  |
| 2.3 坝基河床稳定分析 .....     | (17) |
| 2.4 坝肩平面抗滑稳定分析 .....   | (25) |
| 2.5 坝肩岩体三维抗滑稳定分析 ..... | (32) |
| 2.6 坝体构造 .....         | (37) |
| 2.7 基础开挖及地质缺陷处理 .....  | (39) |
| 2.8 导流底孔封堵设计 .....     | (44) |
| 2.9 温度控制设计 .....       | (45) |
| 3 泄洪消能建筑物设计 .....      | (54) |
| 3.1 泄水建筑物设计 .....      | (54) |
| 3.2 水垫塘设计 .....        | (56) |
| 4 引水系统设计 .....         | (63) |
| 4.1 进水口设计 .....        | (63) |
| 4.2 引水隧洞设计 .....       | (67) |
| 4.3 上下管桥设计 .....       | (70) |
| 4.4 调压井设计 .....        | (72) |
| 4.5 压力管道设计 .....       | (73) |
| 4.6 施工支洞封堵设计 .....     | (75) |
| 4.7 水力学计算 .....        | (77) |
| 5 厂房设计 .....           | (80) |
| 5.1 概 述 .....          | (80) |
| 5.2 厂址选择 .....         | (80) |
| 5.3 厂区布置 .....         | (80) |
| 5.4 厂内布置 .....         | (81) |
| 5.5 厂房稳定计算 .....       | (85) |
| 5.6 厂房结构设计 .....       | (87) |
| 5.7 厂内止水排水设计 .....     | (89) |

|      |                          |       |
|------|--------------------------|-------|
| 5.8  | 厂房浇筑分层分块设计 .....         | (89)  |
| 5.9  | 厂房基础处理设计 .....           | (90)  |
| 5.10 | 厂房主要结构计算 .....           | (90)  |
| 6    | 双曲拱坝整体稳定地质力学模型试验研究 ..... | (95)  |
| 6.1  | 研究目的 .....               | (95)  |
| 6.2  | 研究技术路线 .....             | (95)  |
| 6.3  | 模型试验的设计 .....            | (95)  |
| 6.4  | 试验成果分析 .....             | (102) |
| 6.5  | 结 论 .....                | (116) |
| 7    | 双曲拱坝整体稳定三维非线性有限元研究 ..... | (117) |
| 7.1  | 工程概况及研究内容 .....          | (117) |
| 7.2  | 计算分析方法 .....             | (119) |
| 7.3  | 有限元计算模型 .....            | (128) |
| 7.4  | 有限元计算成果 .....            | (130) |
| 7.5  | 结论与建议 .....              | (149) |
| 8    | 大坝混凝土温度控制研究 .....        | (150) |
| 8.1  | 基本资料及设计参数 .....          | (150) |
| 8.2  | 混凝土施工期温升及稳定应力分析 .....    | (152) |
| 8.3  | 结 论 .....                | (155) |
| 9    | 引水隧洞上下管桥结构研究 .....       | (157) |
| 9.1  | 概 述 .....                | (157) |
| 9.2  | 桥梁跨中设置支承环必要性分析论证 .....   | (166) |
| 9.3  | 计算荷载和计算方法 .....          | (173) |
| 9.4  | 管桥伸缩节布置方案研究 .....        | (179) |
| 9.5  | 上管桥结构分析 .....            | (193) |
| 9.6  | 采用整体模型论证跨中支座的必要性 .....   | (196) |
| 9.7  | 伸缩节设计参数计算 .....          | (201) |
| 9.8  | 下管桥结构整体计算与分析 .....       | (205) |
| 9.9  | 上管桥整体结构计算与分析 .....       | (213) |
| 9.10 | 结论与建议 .....              | (221) |
| 10   | 泄洪消能整体水工模型试验研究 .....     | (224) |
| 10.1 | 概 述 .....                | (224) |
| 10.2 | 试验内容和要求 .....            | (225) |
| 10.3 | 试验设备及测试仪器 .....          | (225) |
| 10.4 | 模型设计 .....               | (226) |
| 10.5 | 试验成果及分析 .....            | (226) |
| 10.6 | 结 论 .....                | (279) |
|      | 参考文献 .....               | (280) |

# 1 工程概况

## 1.1 工程地理位置

龙河是长江的一级支流,位于重庆市石柱土家族自治县与丰都县境内,东经  $107^{\circ}38'$  ~  $108^{\circ}32'$  和北纬  $29^{\circ}33'$  ~  $30^{\circ}10'$  之间。河源分为两支,北源位于方斗山山脉东南麓,南源位于七曜山山脉西北麓,两源汇于石柱县桥头镇后,自东北向西南流经石柱县城,至丰都县廖家坝折向西北流,于丰都县城对岸注入长江。河流全长 161 km,流域面积  $2\,810\text{ km}^2$ ,河道平均比降为  $4.8\text{‰}$ 。龙河上源与磨刀溪和清江接壤,北邻长江,南邻乌江。整个流域略呈东北、西南向长条形,平均宽 30 km,长约 80 km。流域周界高山环绕,河谷深切,两岸支流支沟坡度陡、汇流迅速。

## 1.2 工程枢纽概况

藤子沟水电站工程位于重庆市石柱土家族自治县境内,长江右岸一级支流龙河的上游河段。坝址距上游桥头乡 5 km 左右,距下游石柱县城 27 km。现有公路可通到永和乡与桥头乡,交通条件尚好。

藤子沟水电站工程是龙河流域上游最大的水利枢纽,也是龙河梯级开发方案中的龙头骨干工程。本工程以发电为主,兼有梯级调节、防洪、养殖等综合利用效益。电站建成后,供电给重庆统调电网,主要作用是承担电网的调峰、调频和短时紧急事故备用,是重庆市电网的主力调峰电源之一。同时,藤子沟水电站工程还可以为其下游在建的鱼剑口水电站和已建的石板水水电站增加保证出力,使电网的供电质量得到了提高。藤子沟水电站工程采用混合式开发,其工程由挡水建筑物、泄洪消能建筑物、引水系统和厂房系统组成。挡水建筑物为混凝土双曲拱坝,泄洪建筑物为坝顶泄洪孔,消能建筑物由水垫塘和二道坝组成,拦河坝最大坝高 124 m(其中垫座混凝土 7 m,拱坝基本体型高度 117 m),坝顶高程 777 m,坝顶长度 339.475 m;堰顶高程 764 m,溢流孔尺寸  $12\text{ m} \times 11.5\text{ m}$ 。引水系统由进水口、上下管桥、调压井和压力管道组成,引水洞长 4 834.82 m,圆形断面,内径 4.3 m;厂区系统由主厂房、副厂房、尾水渠和变电站等组成,地面式厂房,主厂房尺寸为  $42.1\text{ m} \times 17.9\text{ m} \times 38.12\text{ m}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高)。

藤子沟水库坝址以上流域面积  $591\text{ km}^2$ ,占全流域面积的 21%。水库正常蓄水位 775 m,死水位 723 m,调节库容  $1.49 \times 10^8\text{ m}^3$ ,为多年调节水库。根据工程规模,该水库大坝采用 100 年一遇设计标准(设计频率  $P=0.1\%$ ),设计洪水位 775.35 m,校核洪水位 776.72 m,水库总库容  $1.93 \times 10^8\text{ m}^3$ 。水电站装两台立式混流机组,总装机容量 70 MW,保证出力 17.5 MW,多年平均发电量  $1.92 \times 10^8\text{ kWh}$ ,年利用小时数 2 740 h。

## 2 双曲拱坝设计

拱坝是一个空间壳体结构,主要通过拱梁的作用将外荷载传递至两岸山体,依靠坝体混凝土的强度和两岸坝肩岩体的支承,保证拱坝的稳定。拱坝设计主要内容为体型设计、坝体应力分析、坝基和坝肩稳定分析、坝体构造、基础开挖及地质缺陷处理、导流底孔封堵设计、温度控制设计等。

### 2.1 体型设计

#### 2.1.1 设计原则

##### 2.1.1.1 充分适应地形地质条件

坝址为不对称“V”形峡谷,龙河于  $N20^{\circ}W$  流入坝址上游藤子沟口转呈近  $SN$  向,至坝址下游大沟口转为  $N20^{\circ}W$  流出坝址。坝址区库水面高程  $668.4 \sim 665.5$  m 时,谷宽  $60 \sim 70$  m,水深  $0.5 \sim 1.5$  m,河床基岩面高程  $650 \sim 660$  m,覆盖层厚  $8 \sim 11$  m。坝轴线附近两岸山坡坡度  $60^{\circ}$  左右,由此向上游至藤子沟口,右岸为陡崖,左岸为下陡上缓。两岸山顶高程均高于  $940$  m,相对高差  $275$  m 以上,坝址处岩层走向与河流流向间夹角为  $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。

坝址区出露底层为侏罗统中统上砂溪庙组 ( $J_{2s}$ ) 上亚组  $6 \sim 10$  层,岩层产状走向  $NE20^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ,倾向  $NW$ ,倾角  $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ ,右岸多为逆向坡,呈陡崖,左岸多为顺向坡,呈缓坡。岩石类型为泥质粉砂岩、泥岩互层、长石石英砂岩。长石石英砂岩岩体较硬,湿抗压强度  $60 \sim 80$  MPa,岩体抗剪断系数  $f' = 1.0 \sim 1.2$ ,抗剪凝聚力  $c' = 1.0 \sim 1.2$  MPa;粉砂质泥岩强度相对较低,湿抗压强度  $20 \sim 25$  MPa,岩体抗剪断摩擦系数  $f' = 0.65 \sim 0.7$ ,抗剪凝聚力  $c' = 0.3 \sim 0.5$  MPa。坝址区与拱坝设计相关的不利地形地质条件主要有:

(1)两岸地形为不对称“V”形峡谷,右岸较陡,多为陡崖,左岸下陡上缓。左岸不对称地分布有二、三级阶地。

(2)两岸地形在  $775$  m 高程以上(特别是左岸)呈倒喇叭形。

(3)两岸岩层呈不对称分布。左岸岸坡岩体卸荷较严重,右岸岩体卸荷不明显。坝轴线附近左岸  $777$  m 高程以下为  $J_{2s}^{7(5)}$  以下各层岩层;右岸  $740$  m 高程以下为  $J_{2s}^{7(5)}$  以下各层岩体,以上为  $J_{2s}^8$  岩体, $J_{2s}^8$  岩体变形模量小。因此,两岸的变形模量有差异,左岸好于右岸。

(4)左岸拱座存在  $F_1, f_2, f_3, f_4$  断层破碎带。两岸基岩中有多层软弱夹层。

从不利条件(1)、(2)看,拱坝中心线宜偏向左岸,势必造成右岸上部地形等高线与拱端切线夹角变小,不利于抗滑稳定;不利条件(3)、(4)对拱坝中心线的要求正好相反,经综合考虑拱坝中心线偏向左岸一些。

坝基中的软弱夹层对综合变形模量的影响很难客观评价,这就要求拱坝体型应能适应坝基综合变形模量的变化。较大的拱端厚度对坝基综合变形模量的敏感性影响较小,故拱

端厚度不宜太小。

2.1.1.2 便于布置泄洪消能建筑物

坝址区位于“V”形峡谷河段上,河床较窄。为减轻泄洪对下游两岸及河床的冲刷,泄洪中心线位置及走向宜与下游河流走势相协调。如前所述,地形地质条件要求拱坝中心线偏向左岸一些,而泄洪中心线则偏向右岸较为有利,两者夹角太大不仅造成泄洪孔口不对称布置引起的坝体不利应力分布,而且还会给坝体结构布置带来困难。

为便于坝顶泄洪设备布置及坝顶交通,坝顶厚度不宜太薄。

综合考虑地形地质条件及泄洪建筑物布置要求,拱坝体型优化的几何约束条件如下:

- (1)拱坝中心线方位为 NW342°00'00"(与泄洪中心线交角为 2°29'10")。
- (2)坝顶厚度≥5 m。
- (3)拱冠梁凸点以上下游倒悬度≤0.3(水平比铅直)。
- (4)拱圈的半中心角≤50°。
- (5)拱圈的中心角≤95°。

2.1.1.3 尽量减少坝体混凝土量和坝基岩体开挖工程量

坝体体型优化设计的目标是寻求一个既满足坝肩稳定、坝体应力要求及其他约束条件而坝体造价又最小的合理体型。坝基的开挖量难以反映在优化函数中,它可以根据地形地质条件及坝体下游拱端的水平拱向嵌入深度和梁向开挖深度,初拟各特征高程坝体下游端至拱坝中心线的距离,本次体型优化设计在保证坝肩稳定的基础上,提出各特征高程坝体下游端至拱坝中心线的距离见表 2-1-1。

表 2-1-1 坝体下游拱端至拱坝中心线距离 (单位:m)

| 高程 | 777    | 764    | 745    | 726   | 707  | 688   | 669   | 650   |
|----|--------|--------|--------|-------|------|-------|-------|-------|
| 左岸 | 149.2  | 133.9  | 112.2  | 96.10 | 80.0 | 64.30 | 46.20 | 29.50 |
| 右岸 | 137.20 | 122.50 | 103.20 | 92.10 | 80.0 | 40.0  | 53.80 | 32.00 |

2.1.1.4 控制坝体倒悬度

为有利于坝体施工,须控制坝体倒悬度。梁向底部上游面倒悬度≤0.3(水平比铅直)。

2.1.1.5 坝体应力满足控制标准

坝体应力力求分布均匀,满足应力控制标准的要求。

2.1.1.6 稳定安全系数满足控制标准

以刚体极限平衡法为坝肩抗滑稳定分析的基本方法,稳定安全系数满足控制标准的要求。

2.1.2 拱坝体型选择

根据坝址河谷形状、地质条件、泄洪消能布置和施工条件,该拱坝采用椭圆形拱圈双曲拱坝(拱圈轴线为椭圆线),水平拱采用左、右非对称椭圆拱,拱冠梁剖面受上、下游曲线坝面连续条件及坝体纵向曲率因素控制,采用三次多项式拱冠梁剖面,以此获得较好的应力分布条件。

优化设计选定的坝体体型为:顶拱坝体拱冠梁厚度 5.0 m,左拱端 5.954 m,右拱端 5.878 m;顶拱右半拱圈中心线长半轴为 2 426.669 m,短半轴为 528.006 m,左半拱圈长半轴为 2 571.654 m,短半轴为 703.273 m。拱冠梁基础厚度 20.01 m。最大拱冠梁高度 117 m,拱坝厚高比 0.171。拱坝体型见图 2-1-1、图 2-1-2。

各高程拱圈平切图

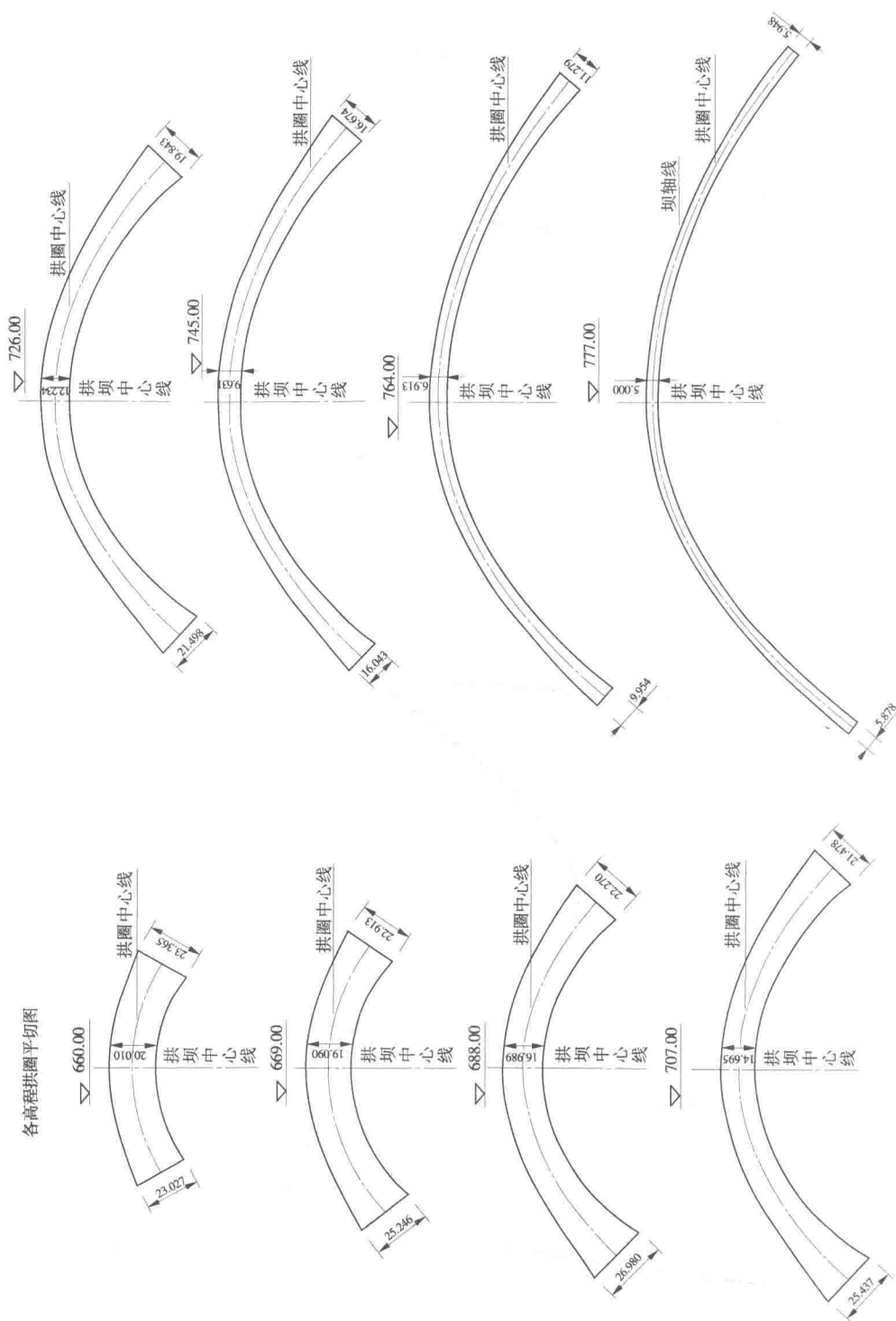
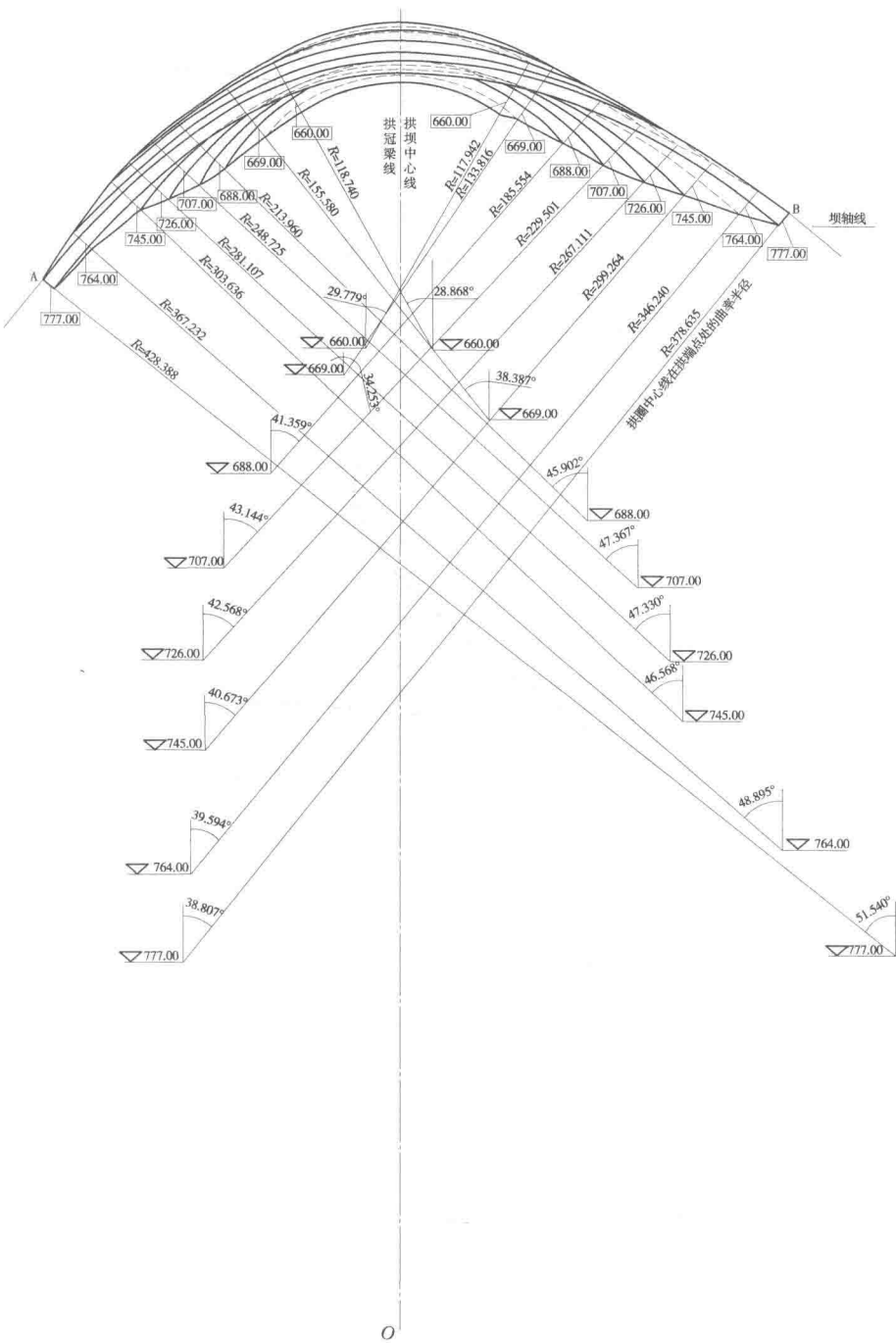


图 2-1-1

拱坝体型平面图



续图 2-1-1



2.2 坝体应力分析

2.2.1 计算依据、荷载及荷载组合

2.2.1.1 计算依据

1) 计算方法

以拱梁分载法作为设计应力分析的基本方法。以刚体极限平衡法作为体型设计时坝肩稳定分析的基本方法。

该拱坝体型设计及应力分析采用中国水利水电科学研究院结构材料所编制的“拱坝体型优化程序(ADASO)”进行,该程序获国家科技进步二等奖,并被列为国家“八五”重点推广项目。为了复核选定体型的坝体应力,又采用了中国水利水电科学研究院抗震所编制的三维有限元程序(ADAP)进行坝体应力计算。

2) 材料参数

(1) 混凝土。

容重:24 kN/m<sup>3</sup>;

弹性模量:20.0 GPa;

泊松比:0.167;

线性温度膨胀系数:0.952 × 10<sup>-5</sup>/℃;

导温系数:3.0 m<sup>2</sup>/月。

(2) 坝基岩体。

坝址区工程岩体物理力学参数见表 2-2-1。

采用伏格特地基进行坝体应力计算,坝基基岩采用的岩体变形参数设计值见表 2-2-2。

表 2-2-1 坝址区工程岩体物理力学参数

| 岩石名称                                 |                     | 长石石英砂岩<br>(J <sub>2s</sub> <sup>7(1)</sup> 、J <sub>2s</sub> <sup>7(3)</sup> 、J <sub>2s</sub> <sup>7(5)</sup> ) | 泥质粉砂岩、<br>泥岩类岩石<br>(J <sub>2s</sub> <sup>7(2)</sup> 、J <sub>2s</sub> <sup>7(4)</sup> 、J <sub>2s</sub> <sup>8</sup> ) | 泥质粉砂岩、<br>泥岩类岩石(J <sub>2s</sub> <sup>6</sup> ) |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 密度<br>(g/cm <sup>3</sup> )           | 烘干密度 r <sub>s</sub> | 2.55                                                                                                           | 2.59                                                                                                                 | 2.59                                           |
|                                      | 湿密度 r <sub>d</sub>  | 2.60                                                                                                           | 2.66                                                                                                                 | 2.66                                           |
| 岩体单轴<br>抗压强度<br>R <sub>c</sub> (MPa) | 干                   | 70 ~ 80                                                                                                        | 28 ~ 35                                                                                                              | 28 ~ 35                                        |
|                                      | 湿                   | 60 ~ 70                                                                                                        | 20 ~ 25                                                                                                              | 20 ~ 25                                        |
| 岩体变形<br>(GPa)                        | 变形模量                | 12 ~ 14                                                                                                        | 3.5 ~ 4.3                                                                                                            | 3.5 ~ 4.3                                      |
|                                      | 弹性模量                | 16 ~ 18                                                                                                        | 4.5 ~ 5.0                                                                                                            | 4.5 ~ 5.0                                      |

续表 2-2-1

| 岩石名称            |            | 长石石英砂岩<br>( $J_{2S}^{7(1)}$ 、 $J_{2S}^{7(3)}$ 、 $J_{2S}^{7(5)}$ ) | 泥质粉砂岩、<br>泥岩类岩石<br>( $J_{2S}^{7(2)}$ 、 $J_{2S}^{7(4)}$ 、 $J_{2S}^8$ ) | 泥质粉砂岩、<br>泥岩类岩石( $J_{2S}^6$ ) |
|-----------------|------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 岩体抗剪<br>参数      | $f'$       | 1.1~1.2(底滑面)<br>2.0(侧滑面)                                          | 0.65~0.70                                                             | 0.45(综合层面)<br>0.35~0.40(完全层面) |
|                 | $c'$ (MPa) | 1.1~1.3(底滑面)<br>2.0(侧滑面)                                          | 0.30~0.50                                                             | 0.2(综合层面)<br>0.10(完全层面)       |
| 混凝土(岩体)<br>抗剪参数 | $f'$       | 1.0~1.1                                                           | 0.65                                                                  | 0.65                          |
|                 | $c'$ (MPa) | 1.0~1.1                                                           | 0.4                                                                   | 0.4                           |
| 泊松比 $\mu$       |            | 0.15~0.20                                                         | 0.25~0.30                                                             | 0.25~0.30                     |
| 说明              |            | 微新岩体                                                              | 微新岩体                                                                  |                               |

表 2-2-2 岩体变形参数

| 高程(m) | 变形模量(GPa) |    | 泊松比  |
|-------|-----------|----|------|
|       | 右岸        | 左岸 |      |
| 777   | 4.3       | 8  | 0.3  |
| 764   | 4.3       | 12 | 0.3  |
| 745   | 12        | 12 | 0.25 |
| 726   | 12        | 12 | 0.25 |
| 707   | 12        | 12 | 0.25 |
| 688   | 12        | 12 | 0.25 |
| 669   | 12        | 12 | 0.25 |
| 660   | 8         | 8  | 0.30 |

注：本表仅适用于伏格特地基拱梁分载法。

2.2.1.2 荷载

1) 静水压力

藤子沟水电站水库运行期特征水位、流量值见表 2-2-3。

表 2-2-3 藤子沟水电站水库运行期特征水位、流量值

| 项目           | 洪峰流量<br>( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 调节下泄<br>流量( $\text{m}^3/\text{s}$ ) | 坝前水位<br>( $\text{m}$ ) | 下游水位<br>( $\text{m}$ ) | 说明     |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|--------|
| $P=0.1\%$ 洪水 | 4 610                             | 3 286                               | 776.72                 | 676.21                 | 大坝校核洪水 |
| $P=1\%$ 洪水   | 3 110                             | 2 756                               | 775.35                 | 675.29                 | 大坝设计洪水 |
| 正常蓄水位        |                                   |                                     | 775.00                 |                        |        |
| 死水位          |                                   |                                     | 723.00                 |                        |        |

2)泥沙压力  
水库运行 50 年时,坝前泥沙淤积高程为 700.7 m,淤沙浮容重  $6.0\text{ kN}/\text{m}^3$ ,内摩擦角  $14.0^\circ$ 。

3)温度荷载  
(1)温度特征值。  
多年平均气温:  $16.4\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
气温年变幅(温降):  $10.6\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
气温年变幅(温升):  $10.1\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
库表年均水温:  $18.5\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
变温水层深度:  $70.0\text{ m}$ ;  
库底水温:  $11.0\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
尾水表面平均水温:  $16.0\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
日照对年平均气温的影响:  $2.0\text{ }^\circ\text{C}$ ;  
日照对气温年变幅的影响:  $1.0\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(2)温度荷载计算时间。  
初相位 6.5 月(7 月中旬),温降计算时间 1.5 月(2 月中旬),温升计算时间 7.5 月(8 月中旬)。

(3)坝体封拱温度。对运行期坝体应力有较大影响,根据藤子沟的实际情况及有关资料,本次坝体体型优化设计时,采用的封拱温度见表 2-2-4。

表 2-2-4 坝体封拱温度

| 高程( $\text{m}$ )         | 777  | 764  | 745   | 726   | 707  | 688  | 669  | 650  |
|--------------------------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|
| 封拱温度( $^\circ\text{C}$ ) | 16.0 | 14.5 | 12.50 | 11.50 | 11.0 | 11.0 | 11.0 | 11.0 |

4)坝体自重  
混凝土容重为  $24.0\text{ kN}/\text{m}^3$ 。

5)扬压力  
由于设计采用薄拱坝(厚高比 0.171),坝体应力计算时未考虑扬压力的影响。

6)地震荷载  
藤子沟拱坝属 2 级水工建筑物,坝区地震基本烈度为 6 度,根据《水工建筑物抗震设

计规范》(SL 203—1997),拱坝的设计烈度为 6 度,故可不进行抗震计算。

### 2.2.1.3 荷载组合

#### 1. 基本组合

组合 1:正常蓄水位上下游静水压力(上游水位 775.00 m,下游水位 663.00 m) + 设计温降 + 自重 + 泥沙压力。

组合 2:正常蓄水位上下游静水压力(上游水位 775.00 m,下游水位 663.00 m) + 设计温升 + 自重 + 泥沙压力。

组合 3:水库死水位上下游静水压力(上游水位 723.00 m,下游无水) + 设计温升 + 自重 + 泥沙压力。

#### 2. 特殊组合

组合 4:校核洪水位上下游静水压力(上游水位 776.72 m,下游水位 676.21 m) + 设计温升 + 自重 + 泥沙压力。

组合 5:分期施工、分期蓄水工况。

为分析分期施工、分期蓄水对坝体应力的影响,我们对坝体分期施工、分期蓄水过程近似分两期进行混凝土浇筑、分两期进行接缝灌浆、分两期蓄水到 775 m。具体过程如下:首先坝体混凝土浇筑到 726 m 高程,此时 726 m 高程以下自重应力由悬臂梁承担,然后坝体封拱灌浆至 726 m 高程,蓄水至 726 m 高程。在此基础上,大坝混凝土由 726 m 高程浇筑到 777 m 高程,然后封拱灌浆到 777 m 高程,蓄水至 775 m 高程。这种情况下,726 m 高程以上坝体混凝土自重荷载作用在已经封拱的 726 m 高程以下的坝体上。显然,该部位自重荷载在低拱坝上必须由拱梁分担。其荷载组合如下:

组合 5-1:正常蓄水位上下游静水压力(上游水位 775.00 m,下游水位 663.00 m) + 设计温降 + 自重(考虑分期) + 泥沙压力。

组合 5-2:正常蓄水位上下游静水压力(上游水位 775.00 m,下游水位 663.00 m) + 设计温升 + 自重(考虑分期) + 泥沙压力。

### 2.2.2 坝体应力分析

#### 2.2.2.1 拱梁分载法程序(ADASO)坝体应力计算分析

##### 1) 不考虑开孔时的坝体应力分析

用拱梁分载法程序(ADASO)计算坝体应力特征值及其部位见表 2-2-5。

由表 2-2-5 可知:坝体基本荷载工况上游面最大主压应力为 5.22 MPa,在容许范围内,最大主拉应力为 1.10 MPa,满足规范要求( $1.10 \leq [\alpha] = 1.2$  MPa);下游面最大主压应力为 5.79 MPa,在容许范围内,最大主拉应力为 1.17 MPa,满足规范要求( $1.17 \leq [\alpha] = 1.2$  MPa)。坝体特殊荷载工况上游面最大主压应力为 3.91 MPa,在容许范围内,最大主拉应力为 1.17 MPa,满足规范要求( $1.17 \leq [\alpha] = 1.5$  MPa);下游面最大主压应力为 5.94 MPa,在容许范围内,最大主拉应力为 1.03 MPa,满足规范要求( $1.03 \leq [\alpha] = 1.5$  MPa)。

表 2-2-5 坝体应力特征值及其部位

(单位:MPa)

| 项目  |        | 荷载组合             |                  |                 |                  |
|-----|--------|------------------|------------------|-----------------|------------------|
|     |        | 组合 1             | 组合 2             | 组合 3            | 组合 4             |
| 上游面 | 最大主压应力 | 5.22             | 3.70             | 2.86            | 3.91             |
|     | 部位     | 726 m 高程<br>拱冠偏左 | 726 m 高程<br>拱冠偏左 | 660 m 高程<br>左拱端 | 726 m 高程<br>拱冠偏左 |
|     | 最大主拉应力 | 0.95             | 1.10             | 0.91            | 1.17             |
|     | 部位     | 726 m 高程<br>右拱端  | 707 m 高程<br>右拱端  | 726 m 高程<br>拱冠  | 707 m 高程<br>右拱端  |
| 下游面 | 最大主压应力 | 5.36             | 5.79             | 3.13            | 5.94             |
|     | 部位     | 688 m 高程<br>左拱端  | 688 m 高程<br>左拱端  | 688 m 高程<br>拱冠  | 688 m 高程<br>左拱端  |
|     | 最大主拉应力 | 1.17             | 1.04             | 1.13            | 1.03             |
|     | 部位     | 660 m 高程<br>左拱端  | 660 m 高程<br>左拱端  | 726 m 高程<br>左拱端 | 660 m 高程<br>左拱端  |

## 2) 考虑开孔时坝体应力分析

考虑开孔时坝体应力特征值及其部位见表 2-2-6。

表 2-2-6 坝体应力特征值及其部位

(单位:MPa)

| 项目  |        | 荷载组合             |                  |                 |                  |
|-----|--------|------------------|------------------|-----------------|------------------|
|     |        | 组合 1             | 组合 2             | 组合 3            | 组合 4             |
| 上游面 | 最大主压应力 | 5.25             | 3.74             | 2.86            | 3.95             |
|     | 部位     | 726 m 高程<br>拱冠偏左 | 726 m 高程<br>拱冠偏左 | 660 m 高程<br>左拱端 | 726 m 高程<br>拱冠偏左 |
|     | 最大主拉应力 | 0.96             | 1.11             | 0.67            | 1.17             |
|     | 部位     | 726 m 高程<br>右拱端  | 707 m 高程<br>右拱端  | 707 m 高程<br>左拱端 | 707 m 高程<br>右拱端  |
| 下游面 | 最大主压应力 | 5.37             | 5.80             | 3.13            | 5.94             |
|     | 部位     | 688 m 高程<br>左拱端  | 688 m 高程<br>左拱端  | 688 m 高程<br>拱冠  | 688 m 高程<br>左拱端  |
|     | 最大主拉应力 | 1.16             | 1.04             | 1.13            | 1.03             |
|     | 部位     | 660 m 高程<br>左拱端  | 660 m 高程<br>左拱端  | 726 m 高程<br>左拱端 | 660 m 高程<br>左拱端  |

由表 2-2-6 可知:坝体基本荷载工况上游面最大主压应力为 5.25 MPa,在容许范围内;最大主拉应力为 1.17 MPa,在容许范围内;满足规范要求;下游面最大主压应力为 5.94 MPa,在容许范围内;最大主拉应力为 1.16 MPa,满足规范要求( $1.16 \leq [\alpha] = 1.2$  MPa)。坝体特殊荷载工况上游面最大主压应力为 3.95 MPa,在容许范围内;最大主拉应力为 1.17 MPa,满足规范要求( $1.17 \leq [\alpha] = 1.5$  MPa);下游面最大主压应力为 5.94 MPa,在容许范围内;最大主拉应力为 1.03 MPa,满足规范要求( $1.03 \leq [\alpha] = 1.5$  MPa)。

## 2.2.2.2 有限元法程序(ADAP)坝体应力计算成果分析

有限元法程序(ADAP)应力计算时,除了计算荷载组合 1~4 坝体应力,还计算了分期施工、分期蓄水对坝体应力的影响,所有荷载组合均未考虑坝体开表孔情况。应力计算网格剖分示意图见图 2-2-1。坝体应力特征值及其部位见表 2-2-7。