

# 杨房沟拱坝电梯井结构配筋研究

叶甜<sup>1</sup>, 王鸽<sup>2</sup>, 戴永琪<sup>3</sup>, 么伦强<sup>1</sup>, 陆高明<sup>1</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610000; 3. 河海大学, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 笔者根据拱坝整体模型计算分析结果, 得到电梯井子模型与大坝整体模型接触面上的节点位移, 将接触面上的节点位移作为约束条件加在电梯井子模型上, 加上其他荷载共同计算电梯井子模型应力。根据电梯机房、电梯井、电梯缓冲坑在静力工况下的第一、第三主应力分布情况, 采用应力图形法计算得到承载能力极限状态下电梯井周边混凝土单位厚度最大配筋量, 结合工程类比确定电梯机房、电梯井、电梯缓冲坑的配筋方案。

**关键词:** 电梯井; 有限元分析; 应力; 配筋

**中图分类号:** TV642.4+2; TU755.3; A715

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2021)03-0083-05

## Research on Structural Reinforcement of Elevator Shaft of Yangfanggou Arch Dam

YE Tian<sup>1</sup>, WANG Ge<sup>2</sup>, Dai Yongqi<sup>3</sup>, YAO Lunqiang<sup>1</sup>, LU Gaoming<sup>1</sup>

1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang, 311122;

2. Yalong River Hydropower Development Corporation Limited, Chengdu, Sichuan, 61005;

3. Hohai University, Nanjing, Jiangsu, 210024)

**Abstract:** According to the calculation and analysis results of the whole arch dam model, the node displacement on the interface between the elevator shaft sub model and the whole dam model is obtained. The node displacement on the interface is added to the elevator shaft sub model as a constraint condition, and other loads are added to calculate the stress of the elevator shaft sub model. According to the first and third principal stress distribution of elevator machine room, elevator shaft and elevator buffer pit under static condition, the maximum reinforcement per unit thickness of concrete around elevator shaft under ultimate bearing capacity state is calculated by stress graph method, and the reinforcement scheme of elevator machine room, elevator shaft and elevator buffer pit is determined by combining with engineering analogy.

**Key words:** elevator shaft; finite element analysis; stress; reinforcement

## 0 引言

拱坝可以借助拱的作用将坝前水压力全部或部分传递给两岸山体, 在地质条件满足要求的情况下, 拱坝比重力坝和当地材料坝更具经济性和安全性。本世纪以来, 中国建设了多座高拱坝, 如构皮滩水电站、拉西瓦水电站、溪洛渡水电站、小湾水电站的大坝坝高均超过了 200 m, 锦屏一级水电站的拱坝坝高高达 305 m。电站运行需要对大坝进行日常管理和维护, 高拱坝的廊道高程范围大, 通过设置电梯可以大幅度减少通行时间。通常采用在拱坝内部预留相关井道形成电梯井,

因此, 电梯井周边混凝土将产生应力集中现象, 需要利用配筋加以解决。

## 1 工程概况

杨房沟水电站是我国首个以 EPC 模式建设的百万千瓦级大型水电工程, 水电站位于四川省凉山彝族自治州木里县境内的雅砻江中游河段上, 是规划中该河段的第 6 级水电站, 工程的开发任务为发电。水库总库容为 5.125 亿 m<sup>3</sup>, 总装机容量为 1 500 MW, 杨房沟水电站为一等工程, 工程规模为大(1)型。枢纽主要建筑物由挡水建筑物、泄洪消能建筑物及引水发电系统等组成, 主要水工建筑物为 1 级建筑物。

收稿日期: 2021-03-17

挡水建筑物采用抛物线型混凝土双曲拱坝,最大坝高155 m,河床建基面高程1 947 m,坝顶高程2 102 m。拱坝内共布置2部电梯用作通行,分别为2 102~2 005 m高程电梯和2 005~1 955 m高程电梯,其中2 102~2 005 m高程电梯为高速电梯。笔者研究对象为2 102~2 005 m高程电梯对应的电梯井,电梯井按结构特征从上到下可分为电梯机房、电梯井、电梯缓冲坑。

## 2 有限元子模型法

首先进行整体计算,整体计算后可以得到子模型与整体模型接触面上的节点位移。子结构取出之后,将接触面上的节点位移作为约束条件加在脱离体上,加上其他荷载共同计算子模型应力<sup>[1-3]</sup>。子模型计算示意图见图1。

### (1) 子模型位移边界。

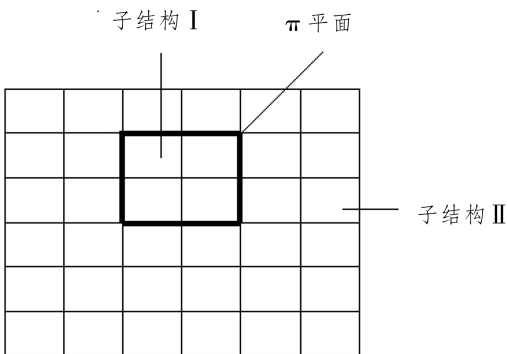


图1 子模型计算示意图

整体计算时,按照一般的有限元计算方法,子结构I、II共同参与计算,得到I、II接触面 $\pi$ 上的节点位移时程。设 $\pi$ 截面上的面单元节点数为 $m$ 。每个节点在计算时段内在 $xyz$ 坐标系下,某一时刻 $\pi$ 截面上的节点位移分量为:

$$\delta_i(t) = \{\delta X_i(t) \delta Y_i(t) \delta Z_i(t)\} \quad (1)$$

假设每个面单元内任意一点的位移由节点的位移分量通过单元形函数插值而得。

$$\delta X(t) = \sum_{i=1}^m N_i \delta X_i(t) \quad (2)$$

$$\delta Y(t) = \sum_{i=1}^m N_i \delta Y_i(t) \quad (3)$$

$$\delta Z(t) = \sum_{i=1}^m N_i \delta Z_i(t) \quad (4)$$

将子结构I单独取出并加密, $\pi$ 平面上的新增节点的位移通过面单元形函数由 $\pi$ 平面上的已知节点位移插值得到。

### (2) 子模型有限元计算方法。对于给定的结

构体系,施加相应的约束边界条件后的有限元方程为:

$$K\delta = F \quad (5)$$

式中  $K$  为结构刚度矩阵; $\delta$  为未知节点位移向量; $F$  为荷载列阵。

对某一结构系统,若用给定的截面 $\pi$ 将结构分为I和II两个子结构,并对这两个子结构在该指定截面上施加一组大小相等、方向相反的约束内力,则可建立与方程(5)完全等价的另一组方程<sup>[3]</sup>:

$$\begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ic} \\ k_{ci} & k_{cc} \end{bmatrix}_{I,II} \begin{Bmatrix} \delta_i \\ \delta_{c I,II} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_i \\ F_c + f_c \end{Bmatrix}_{I,II} \quad (6)$$

式中  $C$  为 $\pi$  截面上的节点; $i$  为非 $\pi$  截面上的节点; $F_i$  为非 $\pi$  截面上的节点荷载向量; $F_c$  为 $\pi$  面上节点荷载向量; $f_c$  为 $\pi$  截面上I、II两子结构间的约束内力。

初步计算和加密时得到截面 $\pi$ 上的节点位移 $\delta_c$ ,对于子结构I,方程(6)可以简化为:

$$[k_{ii}]_I \{\delta_i\} = \{F_i\} \quad (7)$$

按照一般有限元方法即可得到加密后子结构内部节点的位移,从而计算内部节点的应力。

## 3 电梯井配筋计算数值模拟

### 3.1 数值模型及岩土体参数取值

图2为杨房沟水电站轴视图,即拱坝整体计算模型;图3为拱坝2 102~2 005 m高程电梯井子模型。首先对拱坝整体模型计算分析,得到电梯井子模型与大坝整体模型接触面上的节点位移,将接触面上的节点位移作为约束条件加在电梯井子模型上,加上其他荷载共同计算电梯井子模型应力。整体模型中,地基沿上坝面与建基面交线最低点往下取1.5倍坝高,坝前取2倍,坝后取3倍,大坝两侧取1倍坝高。整体有限元模型节点数为109 984,单元数为94 161。

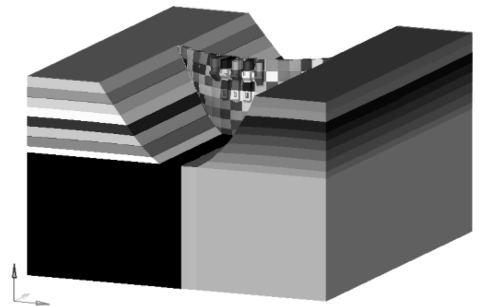


图2 杨房沟水电站轴视图

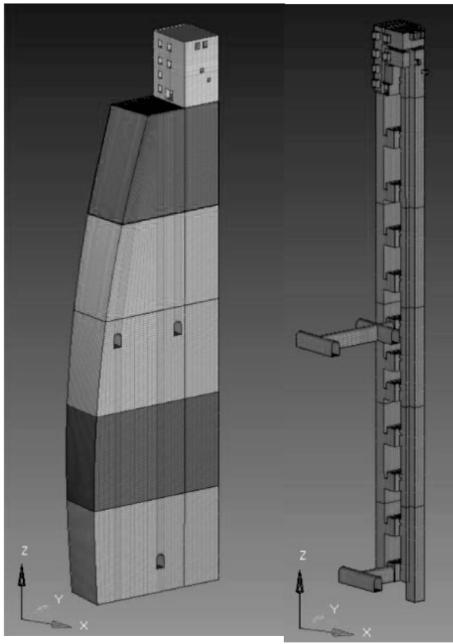


图 3 高程电梯井子模型

### 3.2 边界条件

基岩上下游边约束水平顺河向位移,底边全约束,左右两侧边约束沿坝轴线(横河向)水平位移。基岩假定为各向同性、均匀连续的弹性体,坝体混凝土假定为不透水体,水压力均只作用在相关面上。

### 3.3 特征水位

杨房沟水电站水库上、下游特征洪水位见表 1。

表 1 水库上、下游特征洪水位

洪水标准	上游水位 /m	下游水位 /m
正常蓄水位	2 094.00	1 998.50
淤沙高程	2 016.36	

### 3.4 材料参数

(1)淤沙参数。淤沙浮容重: $0.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;淤沙内摩擦角: $0^\circ$ 。

(2)坝体混凝土材料参数。拱坝主要采用  $C_{180}30$ 、 $C_{180}25$  混凝土,闸墩和孔口部位采用  $C30$  混凝土,闸墩颈部及支撑大梁混凝土采用  $C40$ 。拱坝坝体及闸墩混凝土材料物理力学参数见表 2。

(3)钢筋材料参数。结构钢筋采用 HRB400E 钢筋,抗拉强度设计值采用  $360 \text{ N/mm}^2$ ,预应力闸墩处钢绞线采用  $1 \times 7$  类型,公称直径  $15.2 \text{ mm}$ ,抗拉强度标准值为  $1 860 \text{ N/mm}^2$ ,抗拉强度设计值为  $1 320 \text{ N/mm}^2$ 。

表 2 拱坝坝体及闸墩混凝土材料物理力学参数

项目	C40	$C_{180}30$	$C_{180}25$
容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$		24	
弹性模量 /GPa		22	
泊松比		0.167	
导热系数( $10^{-3} \text{ m}^2/\text{h}$ )		3.0	
线胀系数( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )		10.0	
抗压强度标准值 ( $\text{N/mm}^2$ )	40	30	25
抗拉强度标准值 ( $\text{N/mm}^2$ )	3.2	2.4	2.0

(4)分项系数。

结构重要性系数  $\gamma_0 = 1.1$ ;

荷载分项系数  $\gamma_Q = 1.1$ ;

结构系数  $\gamma_d = 1.2$ ;

持久状况系数为  $\psi = 1.0$ 。

(5)坝基材料参数。拱坝坝基综合变模设计取值见表 3。

表 3 拱坝坝基综合变模设计取值

高程 /m	左岸		右岸	
	综合变模 /GPa	泊松比	综合变模 /GPa	泊松比
2 102	10.4	0.25	10.7	0.25
2 060	11.7	0.24	12.1	0.24
2 020	12.5	0.23	12.6	0.23
1 980	14.7	0.21	13.6	0.22
1 947	15.0	0.20	13.9	0.21

### 3.5 计算荷载

根据结构设计要求,所有荷载都按《水工建筑物荷载设计规范》<sup>[4]</sup>和《水工混凝土结构设计规范》<sup>[5]</sup>要求取荷载标准值计算。

(1)自重。自重计算公式为:

$$G_i = \gamma_m \times V_i \quad (8)$$

式中  $G_i$  为计算单元的自重(kN); $\gamma_m$  为计算单元混凝土重度( $\text{kN/m}^3$ ); $V_i$  为计算单元的相应体积( $\text{m}^3$ )。

(2)静水压力。静水压力计算公式为:

$$P_{wr} = 0.5 \times \gamma_w \times H^2 \quad (9)$$

式中  $\gamma_w$  为水体的重度,计算中取  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ ;  $H$  为作用水头(m)。计算中全部静水压力按照分布面力施加在相应的作用面上。

(3)温度荷载。拱坝各特征高程温度荷载见表 4。

### 3.6 计算工况

表4 拱坝各特征高程温度荷载

高程 /m	温度荷载	
	Tm /℃	Td /℃
2 102	-2.17	0.00
2 060	-0.09	1.09
2 020	0.48	3.43
1 980	0.00	3.93
1 947	-0.05	2.86

注: Tm 为均匀温升, Td 为线性温差。正值为温升, 负值为温降  
在有限元静、动力计算中, 主要考虑以下工况组合, 见表 5。

表5 工况组合表

荷载			
上游水位	温降	自重	淤沙
正常蓄水位	✓	✓	✓

## 4 配筋计算结果与分析

### 4.1 电梯井应力分析

静力工况下电梯井子模型应力云图见图 4。静力工况下电梯井周边混凝土应力峰值见表 6。可以看出: (1) 电梯井子模型主拉应力最大值为 5.49 MPa, 发生在电梯井底部。(2) 电梯井子模型主压应力最大值为 20.80 MPa, 发生在坝体底部下游侧。

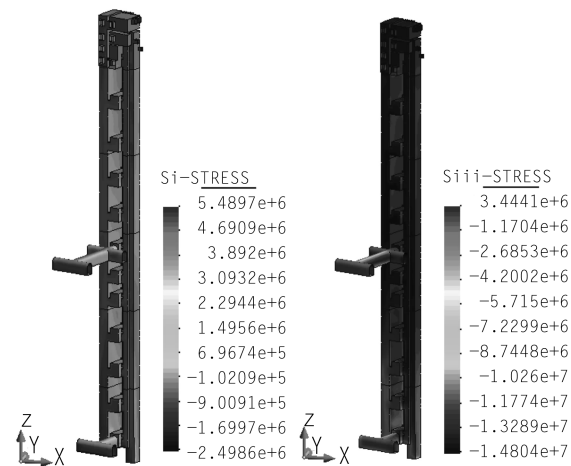


图4 电梯井电梯井子模型应力云图第一(左)第三(右)主应力(Pa)

### 4.2 电梯井配筋计算

根据电梯井各部位应力计算结果, 采用混凝土承载力极限状态配筋<sup>[4-5]</sup>。截取相应的截面, 并对截面切取适量的线, 从而得到拉应力图形, 由混凝土结构的应力图形进行承载力极限

状态配筋计算, 确定钢筋用量<sup>[6]</sup>。

(1) 电梯机房配筋计算。静力工况下电梯机房的第一、三主应力分布情况见图 5、6。

表6 静力工况电梯井周边混凝土应力峰值

部位	分 项		
	S1 /MPa	S3 /MPa	
电梯机房	max	0.18	0.02
	min	-0.05	-0.50
电梯井	max	4.39	0.29
	min	-2.50	-14.8
缓冲坑	max	5.49	0.25
	min	-3.54	-20.8

注: 正值为拉应力, 负值为压应力



图5 静力工况下电梯机房第一主应力(Pa)

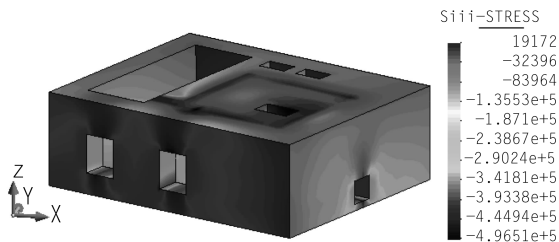


图6 静力工况下电梯机房第三主应力(Pa)

水平向控制应力为 0.108 MPa, 承载力极限状态下单位厚度最大配筋量为 1 279 mm<sup>2</sup>。径向控制应力为 0.050 MPa, 承载力极限状态下单位厚度最大配筋量为 1 279 mm<sup>2</sup>。

(2) 电梯井配筋计算。静力工况下电梯井的第一、三主应力分布情况见图 7、8。

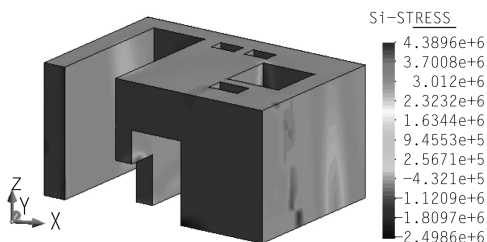


图7 静力工况下电梯井第一主应力(Pa)

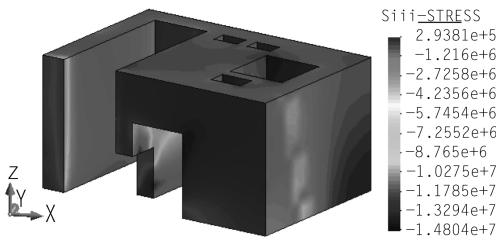


图 8 静力工况下电梯井第三主应力(Pa)

水平向控制应力为 0.343 MPa, 承载能力极限状态下单位厚度最大配筋量为 480 mm<sup>2</sup>。径向控制应力为 0.619 MPa, 承载能力极限状态下单位厚度最大配筋量为 4 176 mm<sup>2</sup>。

(3) 电梯缓冲坑配筋计算。静力工况下电梯缓冲坑的第一、三主应力分布情况见图 9、10。

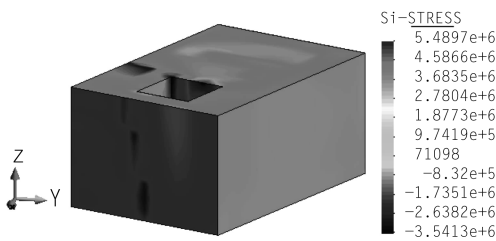


图 9 静力工况下电梯缓冲坑第一主应力(Pa)

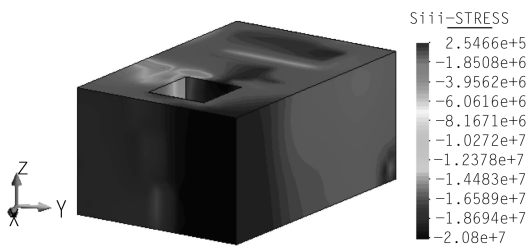


图 10 静力工况下电梯缓冲坑第三主应力(Pa)

水平向控制应力为 0.817 MPa, 承载能力极限状态下单位厚度最大配筋量为 5 996 mm<sup>2</sup>。径向应力主要为压应力, 按构造配筋。

(4) 配筋设计及其他工程配筋类比。根据本节(1)~(3)的静力工况进行电梯井结构应力计算和配筋设计, 并考虑留有 50% 以上的安全裕度, 拟定电梯井配筋方案为: 配筋直径为 28 mm、两层、间排距为 20 cm 的配筋方案, 相应单位宽度配筋面积为 6 154.4 mm<sup>2</sup>。根据部分高拱坝电梯井配筋设计参数统计(表 7), 杨房沟水电站电梯井配筋设计与同类工程类比, 电梯井的配筋设计与国内同类混凝土高拱坝基本相当。

表 7 部分高拱坝电梯井配筋设计参数统计表

名称	坝高 /m	地震设防烈度	配筋直径 /mm	配筋高差 /cm	配筋间排距 /cm
乌东德	270	Ⅷ	25/28/32	20	20(一层)
白鹤滩	289	Ⅷ	32/28	20	20(两层)
周公宅	125.5	Ⅵ	25/20	25	25(一层)
杨房沟	155	Ⅷ	28	20	20(两层)

### 5 结 语

采用有限单元数值分析方法, 考虑自重、静水压力、淤沙压力、温度荷载的作用, 对杨房沟 2 102~2 005 m 高程电梯井进行应力及配筋计算分析, 并结合其他类似工程的设计经验, 拟定配筋方案。根据电梯机房、电梯井、电梯缓冲坑在静力工况下的第一、三主应力分布情况, 采用应力图形法计算得到承载能力极限状态下电梯井周边混凝土单位厚度最大配筋量, 结合工程类比确定电梯机房、电梯井、电梯缓冲坑的配筋方案。

### 参考文献:

- [1] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 水利水电出版社, 2009.
- [2] Bathe, K. J. Finite Element Procedures[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- [3] 李同春, 温召旺. 拱坝应力分析中的有限元内力法[J]. 水力发电学报, 2002.
- [4] 水工建筑物荷载设计规范: DL/T5077-1997[S].
- [5] 水工混凝土结构设计规范: DL/T5057-2009[S].
- [6] 石广斌. 弹性应力配筋法的探讨及应用[J]. 水电站设计, 2003.

### 作者简介:

叶 甜(1990-), 男, 江西上饶人, 工程师, 硕士研究生, 从事水工结构方面工作;  
 王 鸽(1984-), 男, 湖北天门人, 高级工程师, 硕士研究生, 从事水电建设管理方面工作;  
 戴永琪(1996-), 女, 江苏扬州人, 河海大学, 硕士研究生在读, 水工结构工程;  
 么伦强(1990-), 男, 安徽灵璧人, 工程师, 硕士研究生, 从事水工结构方面工作;  
 陆高明(1991-), 男, 杭州富阳人, 工程师, 硕士研究生, 从事水工结构方面工作。

(责任编辑: 吴永红)