

# 拱坝滑雪道式溢洪道进口闸首 的应力研究

程心恕

(土建系)

## 提 要

本文主要根据东江拱坝滑雪道式溢洪道进口闸首三维有限元电算及结果分析,对拱坝溢洪道进口闸首的应力规律进行探讨。还对拱坝设置滑雪道进口闸首对拱坝坝体应力的影响进行初步分析;并对进口闸首的结构和布置提出了改进意见。

**关键词:** 拱坝, 溢洪道, 进口闸首, 应力

## 一、前 言

高拱坝采用滑雪道式溢洪道这一形式已日益趋多,但这种形式的进口闸首应力规律以及对拱坝坝体应力的影响目前研究甚少,而且没有常规计算方法可借鉴,同时模型试验亦很困难(特别是闸首与坝体联合作用,模型边界条件很难模拟)。东江拱坝坝高157米,是我国最高拱坝之一,该坝在靠近左右两岸坝内各开设两孔。孔口宽10米、高10米(坝轴线处),进口底板高程在坝顶以下28米。闸道边墩厚3米,中墩厚6米,闸墩顶部顺水流方向全长46.5米,下游伸出坝体以外左墩最长约27米,中墩约26米,右墩约24.6米,(见图1)。我们对闸首连同部分坝体采用三维有限单元法,使用8~21结点等参或次参单元231个<sup>[8]</sup>,边界单元243个,结点总数1329个。与坝体共同作用通过边界单元结点在不同荷载组合下的位移来反映。

本文通过三维有限单元法对闸首进行应

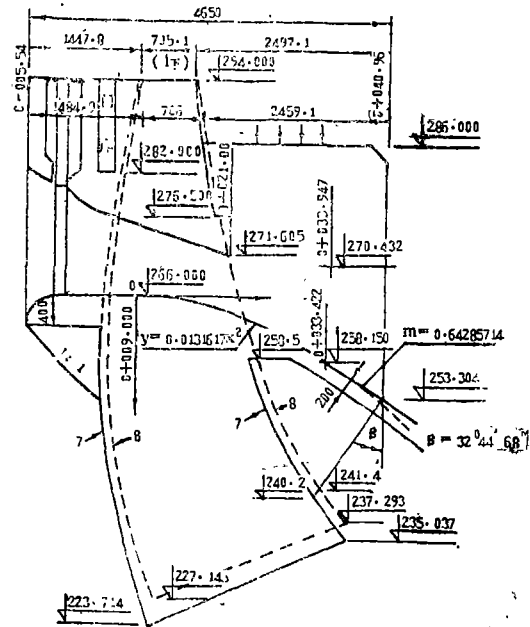


图 1

本文1987年1月12日收到。

力分析并参考有关光弹试验<sup>[2]</sup>，以及其它坝闸首的有限元应力分析<sup>[3,4]</sup>，以期理出应力分布规律。在进行综合分析时，将有限元计算时考虑的各种荷载组合（温度、自重、水压等）除地震荷载特别另加分析外，其余各种组合的应力规律主要按应力包络图的概念加以综合，着重分析综合应力分布规律。

## 二、牛腿处闸墩应力分布规律

对于牛腿侧边墩的应力（离边界稍远处）的控制性荷载是闸门传给牛腿的集中力——该三维有限元分析得出的应力分布规律与一般水闸等牛腿附近应力分布规律相近<sup>[6]</sup>，最大主拉应力的指向和牛腿轴线方向基本一致，牛腿上游应力集中影响区主拉应力方向呈以牛腿轴线为轴之椭圆状走向，向外幅射递减。这一点还可从以下数值看出：在不同荷载组合下（如自重、正常高压、温降和自重、设计水位、温升）最大主拉应力相差右墩约15%、左墩为15.7%而亦中墩约6%。

但是由于拱坝进口闸首亦是坝体的一部分，由于坝体的联合作用使其与一般闸墩的应力分布规律又有所不同。

总的说来，边墩牛腿轴线方向牛腿受力面与墩面交点处将产生较大的应力集中，并且三向正应力均为拉应力，最大值（顺水利方向） $\sigma_{y_{max}} = 31.6$ 公斤/厘米<sup>2</sup>，沿牛腿轴线方向应力集中逐渐消减。距牛腿受力面一倍牛腿宽处，虽然仍然是三向受拉，但最大正应力已减少约25%，到距离一倍牛腿高处则应力已减少了约三分之二。从牛腿附近正闸墩面主应力分布情况来看（图2）也是如此。但应注意，综合各种可能的荷载组合的应力包络图可以发现：沿牛腿轴线距牛腿受力面2—3倍牛腿高处的主拉应力一般还有10~12公斤/厘米<sup>2</sup>，垂直轴线方向离轴线一倍牛腿高仍然有7~10公斤/厘米<sup>2</sup>主拉应力（见图3）；并且左右边墩牛腿侧应力分布基本对称，最大主拉应力为33公斤/厘米<sup>2</sup>，第二主拉应力6.6公斤/厘米<sup>2</sup>（见图2）

以上情况与牛路岭溢流坝边墩应力分布比较可看出牛腿处应力集中数量级相近（牛路岭正常挡水时最大主拉应力为28.5公斤/厘米<sup>2</sup><sup>[6]</sup>）。但是牛路岭应力集中消减快、范围小，而拱坝滑雪式溢洪道进口闸首牛腿处边墩应力集中影响区域要更大些，一般高度和长度均应考虑三倍牛腿高度的范围，因此工程上应考虑将一部分拉筋伸到坝体中去。

边墩的牛腿侧背面，牛腿区附近墩面产生小压力区。

中墩牛腿附近墩面应力分布规律与左、右边墩相似，但是数值约小一半，对称关闭时最大主拉应力分别为15.0公斤/厘米<sup>2</sup>和15.5公斤/厘米<sup>2</sup>基本对称。闸门不对称开启时最大主应力为19.3公斤/厘米<sup>2</sup>。

横荷向地震荷载对牛腿附近墩面应力分布规律影响不大：中墩差值为-0.4~+1.7公斤/厘米<sup>2</sup>，右墩约1.8公斤/厘米<sup>2</sup>，左墩约4公斤/厘米<sup>2</sup>。

## 三、闸墩与坝面和溢流板交界附近应力分布

由三维有限元分析可知交界面附近应力分布规律（除地震荷载组合外）主要影响因素是拱坝变形以及坝体各高程之间相对扭转和剪切变位；由此，右墩交界面附近应力有左拉右压之趋势；左面大主拉应力平行溢流面，最大值约10公斤/厘米<sup>2</sup>，小主应力压应力近乎垂直；右

面大主压应力垂直于溢流板最大值22.3公斤/厘米<sup>2</sup>，小主拉应力平行溢流面。中墩除右侧在近墩顶与坝面交界附近有较大拉应力（14.5公斤/厘米<sup>2</sup>）外，左右基本对称。左墩则明显有右拉左压之趋势，方向趋于平行于溢流面，右侧最大主拉应力17公斤/厘米<sup>2</sup>，左面最大主压应力为12.1公斤/厘米<sup>2</sup>（两个主应力均为压应力）。

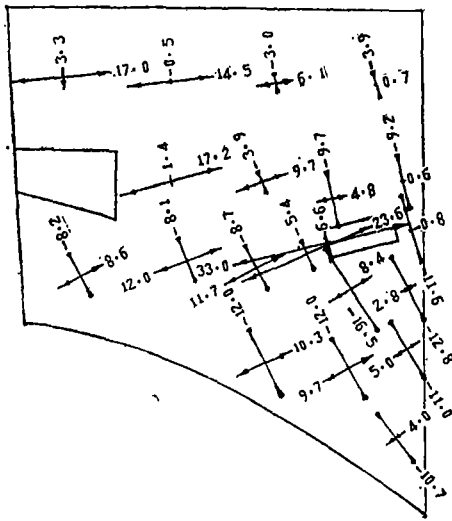


图2 右岸左墩右面主应力图

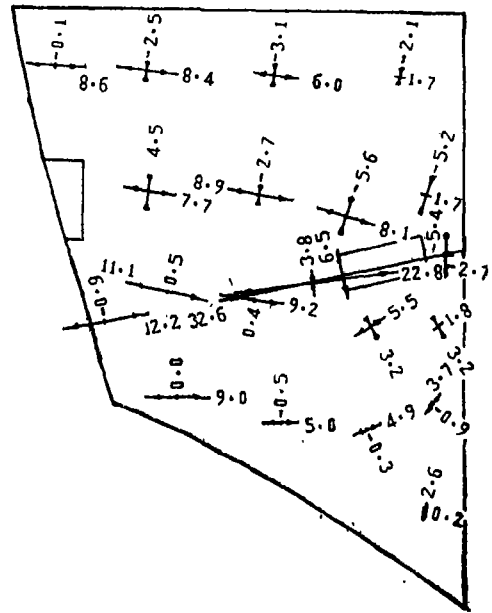


图3 右岸右墩左面主应力图

对于交界附近的应力地震荷载起控制性的影响。当叠加了横河向地震考虑地震惯性力方向指向河中时，整个应力规律和上述的其他荷载组合时完全不同，从右墩到左墩均产生右拉左压之明显规律(指大主应力)。其中右墩右面墩中部边界处最大拉应力达24.1公斤/厘米<sup>2</sup>方向近乎平行于溢流板。左墩左面中部边界最大主出应力为24.8公斤/厘米<sup>2</sup>方向亦平行于溢流面，左墩右面主拉应力最大为17公斤/厘米<sup>2</sup>。交界处的应力用三维有限元来分析是比较方便的，而用三维光弹则难度很大，我们将有限元的自重水压应力与光弹试验值相比较尚较接近<sup>[2]</sup>，因此有限元应力是可信的，由此推出的规律是可靠的。

#### 四、溢流板以下墩体应力分布

如图5所示的溢流板以下墩体靠下游侧A、B、C三点各有一主应力指向与墩体边缘大致平行(在A点近乎垂直溢流板，C点近垂

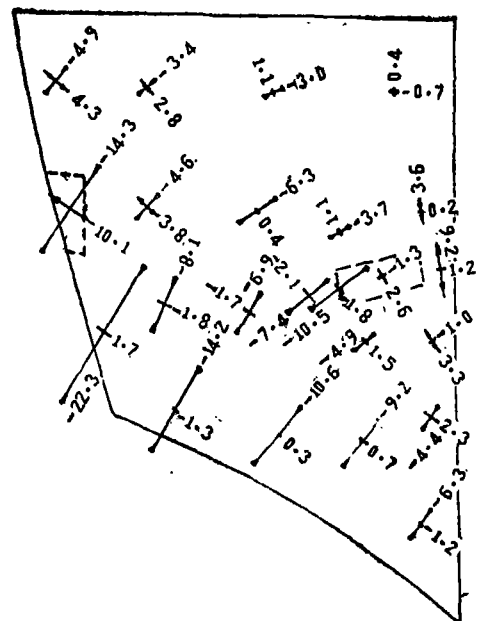


图4 右岸右墩右面主应力图

直坝面)，几种不同荷载组合都大致有此规律。

以上A、B、C点应分布规律可以这样分析：沿A、B、C切出单宽条柱，其上部弹性约束，下部刚性约束。结构产生的侧向位移主要是由于溢流板高程处拱圈受荷载后产生转角，使板下墩体下游边上部比联接坝体的下部产生较大的水平位移（A点比C点位移约大3毫米）。

## 五、溢流板

坝体变形特别是拱圈角变位对溢流板应力及其分布规律起绝对控制作用，因此其应力分布远非一般人们所认为的三边固结一边自由板的应力状态。所谓的三个固结边有挤压剪切溢流板的趋势，因此有如下特点：

首先使得溢流板垂直水流方向正应力 $\sigma_x$ 均为压应力，最大约24公斤/厘米<sup>2</sup>从上游向下游逐渐减小。

其次使得溢流板剪应力数值较大；左面板靠近坝下游面附近 $\tau_{xy}$ 最大达16.2公斤/厘米<sup>2</sup>，沿厚度变化不同， $\tau_{zx}$ 最大为10.2公斤/厘米<sup>2</sup>。而右面板中剖面靠近坝面附近剪应力 $\tau_{xy}$ 则上大下小，甚至变号。 $\tau_{zx}$ 则上小下大。

顺水流方向的正应力 $\sigma_y$ 在大部分厚度为2米的板内上拉下压绝对值不大（最大拉应力3公斤/厘米<sup>2</sup>）。但在靠近拱坝下游面加厚部位沿厚度方向全断面受拉，右面板平均8公斤/厘米<sup>2</sup>，而最大为9公斤/厘米<sup>2</sup>，左面板平均3.5公斤/厘米<sup>2</sup>。

## 六、闸首对坝体应力的影响以及闸首结构和布置的改进

闸首的刚度对坝体应力有相当的影响，由图1可以看出闸首处闸墩与坝段高度相近这与一般拱坝开中孔（如欧阳海拱坝<sup>[4]</sup>）的情况大不相同，后者仅仅在孔口周围较小范围有影响，而前者会影响闸首处坝段梁和拱的刚度。

由表1可看出位于闸首中墩位置的拱坝坝体梁向应力 $\sigma_x$ ，上游面和下游面差值较闸首以外坝体 $\sigma_x$ 差值大得多，这是由于闸首使拱坝这部分梁向刚度增大造成的。

由表2亦可看出闸首附近拱向应力在靠近右岸坝肩部位下游面相当一部分出现拉应力，最大为2.4公斤/厘米<sup>2</sup>，还有一部分也趋向受拉（压应力 $<1.0$ 公斤/厘米<sup>2</sup>）。上游面亦有部分出现拉应力，由此有部分坝体拱向应力沿厚度有全受拉之趋势。这说明闸首的刚度对坝体靠岸坝段的应力有不利的影响。

用三维有限元和光弹试验均可看出中墩应力近乎边墩的一半，因此说明中墩为边墩厚度的2倍是不合理的，可以将中墩做成比边墩厚1米即可，这样布置对整体应力均化无好处。此外，适当加厚拱坝相接部分的溢流板厚度对闸首应力亦有好处。

拱坝开中孔设置滑雪道式溢洪道这种布置方式是十分可取的，考虑到闸首刚度对坝体应力影响，宜尽量将闸墩向下游延伸的长度缩短，尽量减小其高度。因此采用平板闸门似乎更有利于缩小闸首尺寸，由此坝体应力的影响也将减小，这一点从欧阳海拱坝中孔应力分析<sup>[4]</sup>也可看出。

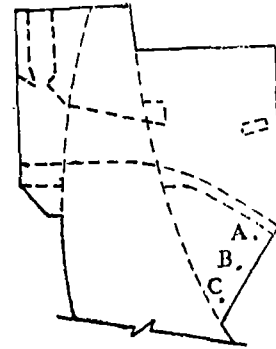


图5

表1 闸首附近拱坝坝体 $\sigma_z$ (垂直正应力)公斤/厘米<sup>2</sup>

高 程	闸首右坝体		中墩处坝体		闸首左坝体	
	上 游	下 游	上 游	下 游	上 游	下 游
1	-0.7	-1.1	3.3	-1.8	0.1	-0.5
2	-1.9	-2.5	-3.0	-3.5	-1.6	-1.8
3	-2.7	-3.2	2.5	-4.3	-2.5	-3.4
孔口 中心 4	-4.8	-3.2	-1.9	-6.6	-4.1	-5.8
5	-6.6	-4.2	-1.5	-0.1	-5.7	-6.7
6	-6.2	-5.4	-4.4	-4.8	-8.7	-7.6
7	-6.3	-5.6	-9.5	-11.9	-12.7	-11.1
$\Sigma$	-29.2	-25.2	-14.5	-33	-35.2	-36.3

表2 闸首附近拱坝坝体应力 $\sigma_x$ (横向正应力)公斤/厘米<sup>2</sup>

高 程	闸首右坝体		中墩处坝体		闸首左坝体	
	上 游	下 游	上 游	下 游	上 游	下 游
1	-3.6	-2.4	-17.4	-10.9	-15.9	-15.0
2	-4.3	2.4	-9.8	-8.8	-17	-14.2
3	-4.0	1.3	-10.6	-5.1	-17.8	-13.3
孔口 中心 4	-2.2	0.5	-0.7	-1.7	-19	-13.8
5	-0.3	-0.4	-10.4	-4.1	-20.1	-13.9
6	1.6	-0.6	-13.5	-2.4	-27.0	-4.8
7	0.5	-0.8	-13.8	0.8	-11.6	-30.2

参 考 文 献

- [1] 池元、程心恕、岑书龙, 东江溢洪道右岸闸首部分三维有限元电算应力成果分析报告, 福州大学土建系印, (1986)。
- [2] 陈日齐, 东江水电站滑雪道式溢洪道光弹性实验报告, 福州大学土建系印, (1986)。
- [3] 华东水利学院, 水利水电工程应用电子计算机资料选编, 水利出版社, (1979)。
- [4] 朱伯芳等, 高拱坝学术讨论会论文选集, 电力工业出版社, (1980)。
- [5] 华东水利学院等, 水工钢筋混凝土结构, 下册, 水利电力出版社, 326~331, (1975)。

- [6] 蔡志中, 牛路岭溢流坝闸墩三维有限元电算成果, 水电部中南勘测设计院印, (1984)。
- [7] Azevedo, Maria Cruz; Ferreira, M. J. Esteves, Influence of the Spillways on the safety of arch dams, Int. Comm. on Large Dams, Paris, Vol. P. 621—634, (1979).
- [8] 程心恕, 福州大学学报, (3), (1987)。

## Study on Stress of Intake Head in Ski-jump Spillway of Arch Dam

Cheng Xinshu

(Department of Civil and Architectural Engineering)

### Abstract

According to the computations and analytic results of the three-dimensional finite element method, the stress distribution of intake head in ski-jump spillway of arch dam is discussed. By using the three-dimensional finite element method, the preliminary study is made of the effect on stress of the arch dam due to intake head of ski-jump spillway, and some methods for improvement on the structure and layout of the intake head are proposed.

**Keywords:** arch dam, spillway, intake head, stress