

# 冲砂洞工作闸门静力及地震时程分析

李云龙<sup>1</sup>, 顾晓峰<sup>2</sup>, 胡友安<sup>1</sup>

(1. 河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022;

2. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215128)

**摘要:**巴基斯坦 Dasu 水电站将 1 条导流洞改造成 2 条冲砂洞, 为了验证冲砂洞工作闸门的安全性, 基于有限元软件 ANSYS, 建立工作闸门的有限元模型, 综合考虑静水压力、波浪压力、淤沙压力、重力等主要荷载, 对闸门在最大设计水头进行闭门工况下的静力分析和地震时程分析, 得出闸门的应力和变形情况, 对闸门的强度和刚度进行校核, 评估闸门的安全性。结果表明: 冲砂洞工作闸门满足强度和刚度要求, 该研究为同类闸门安全性的评估提供参考。

**关键词:** 高压闸门; ANSYS; 淤沙压力; 附加质量; 动力时程法

**中图分类号:** TV675      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1007-7839(2019)05-0054-05

## Analysis on the static of service gate and earthquake time – process of sand flushing tunnel

LI Yunlong<sup>1</sup>, GU Xiaofeng<sup>2</sup>, HU Youan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Hohai University, Changzhou, 213022;

2. Jiangsu Taihu Planning and Design Institute of Water Resources Co., Ltd, Suzhou 215128, Jiangsu)

**Abstract:** The Dasu hydropower station in Pakistan transformed one diversion tunnel into two sand flushing tunnels. In order to verify the safety of the service gate of the sand flushing tunnel, a finite element model of the service gate was established based on the finite element software ANSYS. Considering the main loads such as hydrostatic pressure, wave pressure, silt pressure, gravity and so on, the static analysis and earthquake time – process analysis of the gate under closed working conditions of maximum design head were carried out, and the stress and deformation of the gate were obtained. The strength and stiffness of the gate were checked to evaluate the safety of the gate. The results showed that the service gate of sand flushing tunnel met the requirements of strength and stiffness, and this study could provide a reference for the safety evaluation of similar gates.

**Key words:** high pressure gate; ANSYS; silt pressure; added mass; dynamic time history method

## 1 概述

本工程冲砂洞工作闸门孔口尺寸 4.0 m × 9.5 m, 最大承压水头 154.269 m, 泥沙淤积高度 9.5 m, 因此需要通过有限元模型对闸门及腰箱结构进行静力安全分析, 提出满足结构强度和刚度要求的最优闸门结构及腰箱结构布置方案。

此外, 巴基斯坦 Dasu 水电站所在地区的地震基本设计烈度等级高, 本工程冲砂底孔工作闸门按照基本参数及招标文件所提供的地震加速度数据进行设计。因此, 在闸门结构静力分析基础上, 还需进行地震荷载作用下的结构动力分析计算, 确保闸门的安全可靠运行。

收稿日期: 2018-11-19

基金项目: 大孔径双扉平面钢闸门研究 (2018014)

作者简介: 李云龙 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工钢结构。

2 闸门的计算模型及材料参数

Dasu 水电站冲砂洞工作闸门采用潜孔平面闸门,门宽 4.76 m,高 10.0 m。闸门面板采用变截面设计,最厚处 0.253 m,最薄处 0.104 m。闸门背面设有 5 个浮箱,两侧各布置 5 个侧面滑块和 1 个背面滑块。闸门的结构几何模型图见图 1,有限元模型见图 2。

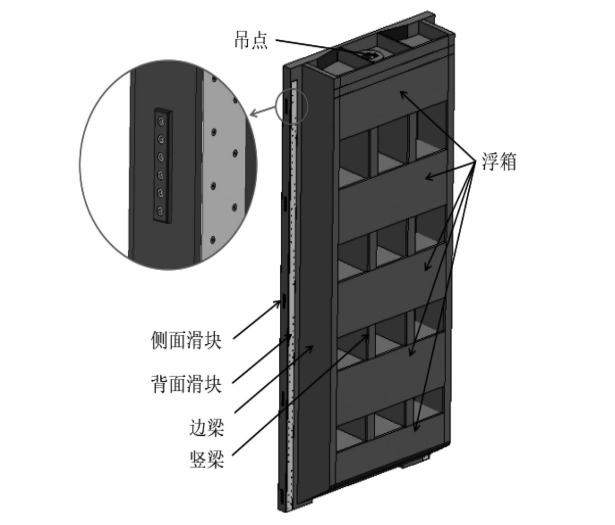


图 1 工作闸门结构几何模型

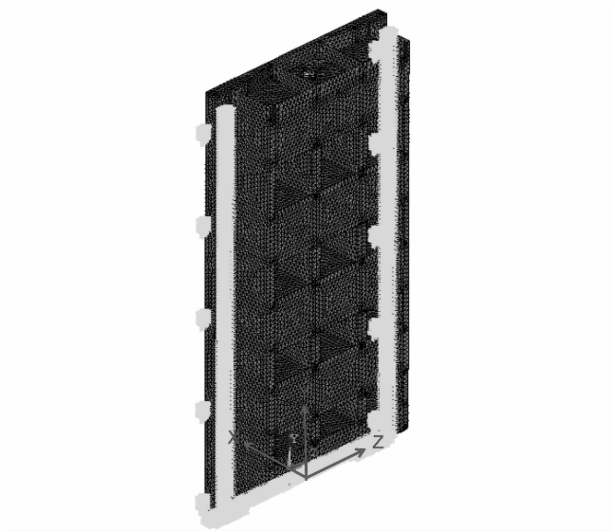


图 2 工作闸门有限元模型

闸门采用(A572/572M-01)ASTM材料,其弹性模量 $E=2.1\times10^{11}$ Pa,泊松比 $\nu=0.3$ ,密度 $\sigma=7850\text{ kg/m}^3$ 。

基于ANSYS有限元软件在笛卡尔直角坐标系下建立的闸门有限元模型如图2。其中,面板采用Solid186单元模拟,其余结构采用Shell181单元模拟,网格划分结束之后,整个闸门被划分成107209个单元和146855个节点。

闸门全闭时的约束形式:在闸门侧面滑块安装位置约束闸门Z方向自由度,在闸门背面滑块安装位置约束闸门X方向自由度,在闸门面板底部约束闸门X方向自由度。

3 强度和刚度判定标准

3.1 许用应力

由招标文件可知,冲砂洞工作闸门的材料是A572/572M-01( ASTM),屈服应力为450 MPa。

闸门整体结构的应力通过组合应力来校核,其许用应力可在轴向拉伸和弯曲应力的基础上增加50%,同时,在任何工况下闸门的组合应力都不允许超过材料屈服应力的90%。综上,许用应力应满足以下公式:

$$[\sigma] = 1.5\sigma_a \tag{1}$$

$$[\sigma] = 0.9\sigma_y \tag{2}$$

式中:[ $\sigma$ ]表示许用应力, $\sigma_y$ 表示屈服应力。  
 $\sigma_a$ 表示轴向拉伸和弯曲应力,其计算公式为:

$$\sigma_a = k_a \times \sigma_y/2 \tag{3}$$

式中: $\sigma_a$ 为轴向拉伸和弯曲应力, $\sigma_y$ 为材料的屈服应力, $K_a$ 为表1中规定的系数。

经计算,静力工况下的许用应力为 $[\sigma]=337.5\text{ MPa}$ ,地震工况下的许用应力为 $[\sigma]=405\text{ MPa}$ 。

在ANSYS中,组合应力使用Von Mises应力,计算公式如下:

$$\sigma_g = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \times \sigma_2 + 3\tau^2)^{0.5} \tag{4}$$

式中: $\sigma_g$ 为等效应力, $\sigma_2$ 为环向应力(拉压考虑在内), $\sigma_1$ 为轴向应力, $\tau$ 为切应力。

许用应力系数参考值见表1。

表 1 许用应力系数

设备	$k_a$	
	正常工况条件	过载工况 OBE 地震工况
溢洪道闸门	1.0	1.5
溢洪道启闭机		
LLO 检修闸门		
LLO 事故闸门		
LLO 工作闸门		
LLO 桥式起重机	1.15	1.7
冲砂洞出口闸门		
溢洪道检修门		
冲砂洞检修门		

### 3.2 容许挠度

根据招标文件规定,水电站设备各部件的容许挠度不得超过表 2 中的容许值。

表 2 不同构件的容许挠度

结构部件	最大挠度标准
溢洪道弧形闸门、LLO 检修闸门	支承跨度的 1/800
溢洪道检修门、冲沙洞检修门	支承跨度的 1/600
LLO 事故闸门、LLO 工作闸门、冲沙洞工作闸门	支承跨度的 1/2000
溢洪道启闭机、运行设备的基础框架、LLO 桥式起重机	支承跨度的 1/1000
其他结构部件	支承跨度的 1/1000,或者取工厂设计的许用挠度

由表 2 可知,冲沙洞工作闸门的最大容许挠度为支承跨度的 1/2000,支承跨度为 4.5 m,经计算工作闸门容许挠度为 2.25 mm。

## 4 特殊荷载计算及地震时程分析

### 4.1 淤沙压力

根据《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL74-2013)规定,作用在闸门上的水平淤沙压力计算式为:

$$P_n = \frac{1}{2} \gamma_n h_n^2 \tan^2(45^\circ - \varphi/2) B \quad (5)$$

式中: $P_n$ 表示淤沙压力, $\gamma_n$ 表示淤沙浮容重, $H_n$ 表示淤沙深度, $\varphi$ 表示淤沙内摩擦角, $B$ 表示淤沙宽度。本文取  $\gamma_n = 1.82 \text{ T/m}^3$ ,  $\varphi = 30^\circ$ 。

### 4.2 动水压力

由于水体的动力作用和质量点的惯性力类似,因此可以将水体简化成离散的质量点施加在闸门面板上,根据 Westergaard 理论<sup>[1]</sup>,流体和固体交界面上单位面积的动水压力计算式为:

$$P_i = a_i \ddot{v}_i(t) \quad (6)$$

$$a_i = \frac{7}{8} \rho \sqrt{H_i(H_i - Z_i)} \quad (7)$$

式中: $p_i$ 表示面板和水体交界面上的动水压力, $a_i$ 表示单位面积上的质量, $\rho$ 表示水体密度, $H_i$ 表示水头高度, $Z_i$ 表示质量点  $i$  距离闸门底槛的高度, $\ddot{v}_i(t)$ 表示质量点  $i$  沿面板法向的加速度。

在 ANSYS 中,可以将离散的质量点施加到面板上的每个节点处。节点  $i$  对应的相关面积  $A_i$  可以用 `arnode(i)` 命令进行读取,面板和水体交界面上每个

单元最终对应的附加质量为:

$$M_i = \frac{7}{8} \rho A_i \sqrt{H_i(H_i - Z_i)} \quad (8)$$

在 ANSYS 中采用 `apdl` 参数化设计命令进行附加质量的循环施加。附加质量用 `Mass21` 单元进行模拟,`Mass21` 是三维单元,由于在计算时主要考虑面板法向的动水压力,故只需定义面板法向的附加质量即可<sup>[2]</sup>。

### 4.3 地震时程分析

时间历程分析法是根据选定的地震波和结构恢复力特征曲线,采用逐步积分法直接积分动力方程,得到在地震过程中每个时刻的结构变形和应力,观察结构在地震载荷作用下从变形到断裂破坏的过程<sup>[3-4]</sup>。在地震响应分析中,地震波以加速度时程形式表示,本文采用加速度一致激励时程分析法。

根据有限单元法原理将结构进行离散化之后,依据 D'Alembert 原理就可以得到结构体系的运动方程为<sup>[5]</sup>:

$$[M] \ddot{x} + [C] \dot{x} + [K]x = -M \ddot{x}_k \quad (9)$$

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 为结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,均为  $n \times n$  方阵; $x$ 、 $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$  为结构相对地面的位移、速度和加速度矩阵,均为  $n \times 1$  列阵; $\ddot{x}_k$  为地面运动加速度( $k = x, y, z$ ),本文采用对应的地震时程加速度记录。在 ANSYS 中,地震加速度直接用 `ACEL` 命令施加。

本文阻尼矩阵采用瑞雷阻尼<sup>[6]</sup>,公式如下:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (10)$$

式中: $M$ 为结构的质量矩阵, $K$ 为结构的刚度矩阵系数, $\alpha$ 为质量阻尼系数, $\beta$ 为刚度阻尼系数。

通过模态的正交性,可以计算得到以下的关系式:

$$\alpha = \frac{4\pi\xi f_i f_j}{f_i f_j} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\pi(f_i + f_j)} \quad (12)$$

式中: $\xi$ 为结构阻尼比,此处取为 0.05; $f_i$ 、 $f_j$ 分别为结构第  $i$ 、 $j$  阶自振频率,本文取  $i=1$ 、 $j=2$ 。

地震加速度采用招标文件提供的加速度数据。图 3 为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的加速度时程曲线图。

## 5 计算结果与分析

### 5.1 静力计算结果分析

冲砂洞工作闸门最大承压水头 154.269 m,在

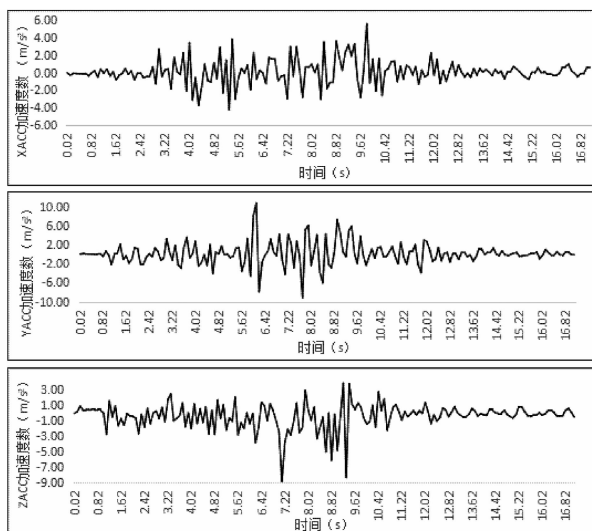


图3 加速度时程曲线

注:XACC为垂直于面板顺水流方向加速度,YACC为从闸门右侧指向左侧的加速度,ZACC为垂直于闸门底槛方向的加速度。

静力计算中,综合考虑了静水压力、波浪压力、淤沙压力和重力,图4、图5分别为闸门在最大水头下的应力分布云图和变形分布云图。

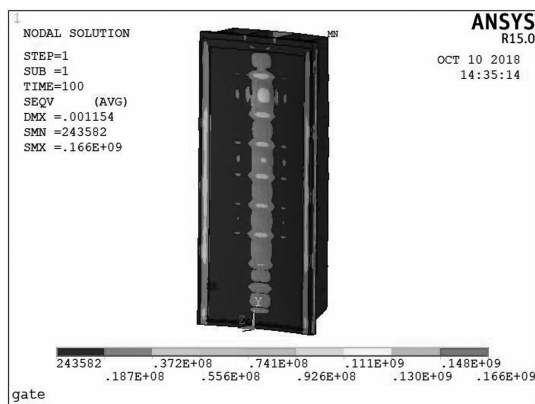


图4 闸门应力分布云图

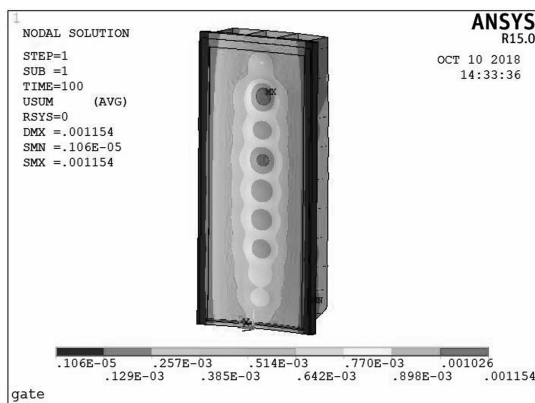


图5 闸门变形分布云图

从图4中可以看出闸门的最大 Von Mises 应力为 166 MPa,远远小于闸门的许用应力,闸门结构满

足强度要求;从图5中可以看出闸门最大变形为 1.15 mm,小于闸门的容许挠度,闸门结构满足刚度要求。

## 5.2 闸门结构动力响应分析

### 5.2.1 闸门结构应力分析

在静力分析的基础上,增加了动水压力,然后打开时间积分进行地震时程分析。图6为最大 Von Mises 应力时程曲线,表3提取了地震过程中前5项最大应力及其对应时刻,图7、图8所示是和表3对应的前2项最大应力云图。

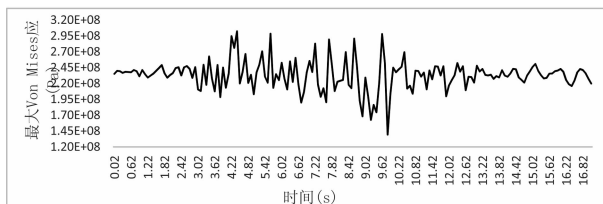


图6 最大 Von Mises 应力时程曲线表

表3 前5项最大应力及对应时间

Von Mises 应力 (Pa)	3.02E +08	2.98E +08	2.98E +08	2.95E +08	2.91E +08
时间 (s)	4.42	5.62	9.62	4.22	8.62

从图6和表3可知最大应力发生在 4.42 s,最大值为 302 MPa,小于地震工况下的许用应力,满足强度要求。

### 5.2.2 闸门结构变形分析

图7、图8分别为闸门最大总变形时程曲线和 X 方向最大变形时程曲线。

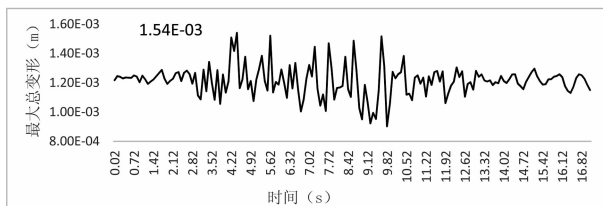


图7 最大总变形时程曲线

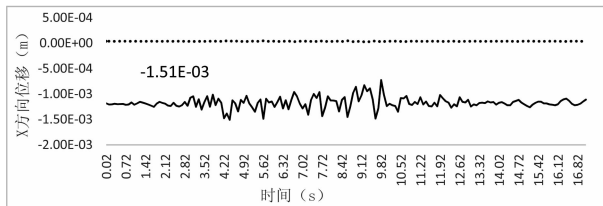


图8 X方向最大变形时程曲线

从图7、图8可知,最大总位移为 1.54 mm,X 方向最大位移 1.51 mm,方向为顺水流方向,最大位移均小于最大容许挠度,满足刚度要求,闸门在地震

工况下可以安全工作。

## 6 结语

通过有限元静力分析和地震加速度时程分析,可知冲砂洞工作闸门在最大设计水头及设计地震工况下可以满足强度和刚度要求,能够安全运行,对类似的潜孔高压闸门的设计校核有一定的参考价值。

### 参考文献:

[1] 姬锐敏.长沙枢纽弧形闸门静动力特性研究[D].长

沙:长沙理工大学,2013.

[2] 沈安磊.大型平开弧门静动力学数值分析[D].南京:河海大学,2017.

[3] 马新宇,梅善文.结构地震反应时的时程分析法[J].建筑工程技术与设计,2017(10):4797.

[4] 张阳.溢洪道闸墩非线性地震反应研究[D].西安:西安理工大学,2014.

[5] 杨璐,陈虹,岳永志,等.反应谱法与时程分析法抗震分析对比[J].沈阳工业大学学报,2016,38(3):331-336.

[6] 王德铎,张艳平,闫军,等.多体结构瑞利阻尼系数的确定[J].机械设计与制造,2010(1):230-231.

