

深孔弧形闸门在不同运行开度下的结构应力状态

周春天 ,吕家才 ,孙小鹏 ,曾剑辉

(河海大学水利水电工程学院 ,江苏 南京 210098)

摘要 通过深孔弧形钢闸门的水弹性模型试验 ,对比分析深孔弧形闸门在不同运行工况下的时均应力状态及其变化规律 .分析结果表明 ,深孔弧门在不同运行开度下的结构应力状态不同 ,其最大应力的位置可因开度变化而发生转移 ,不同弧门的应力状态及其变化规律既有共同性也有差异 .
关键词 泄水孔 ,弧形闸门 ,应力状态 ,模型研究
中图分类号 :TV663+ .2 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2006)06-0650-05

在水电事业的发展中 ,深孔弧形闸门的设计水头越来越高 ,孔口及弧门尺寸越来越大 ,深孔弧门的运行从以往全开全关的单一方式增加了局部开启的运行要求 ,许多设计者创新意识增强 ,对闸门材料强度的利用更为大胆 ,但对深孔大型弧门在制造、施工安装和运行中可能出现的结构应力状态变化了解不多 .目前 ,虽有一些从原体观测和模型试验实践方面对深孔弧门不同支承、不同受力条件和不同运行方式下应力状态的研究^[1-4] ,但仍有许多问题需要进一步深入探讨 .

近年来 ,人们对高水头深孔弧形钢闸门泄水时的流激振动问题已开始重视^[5] ,但对伴随深孔弧门泄水时的时均应力状态及其变化却很少关注 .其实当深孔弧门局部开启泄水时即使流激振动强度不大 ,只要时均应力状态不佳也是不安全的 ,而流激振动事故往往伴随着时均应力状态不佳这个因素 ,因此研究深孔弧形闸门在不同开度下的时均应力状态是非常必要的 ,这对弧门的优化设计、检验计算成果、改进计算方法以及指导运行管理具有一定的现实意义^[6] .

本文以两个深孔弧形钢闸门的模型试验成果为例 ,对比分析深孔弧形闸门在不同情况下运行(包括挡水和不同开度下泄水)时的时均应力状态及其变化规律 ,以供设计人员参考 .

1 工程概况

两深孔弧形工作闸门分别以弧门 A、B 命名 ,其工作水头、弧门结构、制造材料等见表 1 .

表 1 闸门结构及工作水头

Table 1 Gate structure and operating head

弧门	功能	设计水头/m		孔口尺寸 (高×宽)/m ²	门槽类型	运行要求	弧门结构	弧门尺寸(外弧长× 门宽)/mm ²	弧门外 半径/mm	弧门结构 材料
		静水	动水							
A	工作门	165	106	7×5	突扩、突跌	全开全关及 局部开启	双主横梁、直支 臂、圆柱铰	10 200×6 610	15 000	16Mn 钢
B	工作门	83	80	5×4	突扩、突跌	全开全关及 局部开启	双主横梁、直支 臂、圆柱铰	7 350×5 200	9 500	16Mn 钢

注 静水设计为最高挡水水头 ,动水设计为动水操作水头。

2 模型试验方法

试验采用水力模型和结构动力模型合二为一的水弹性结构模型试验方法^[7] ,试验同时满足水力相似(重力相似)和结构动力相似条件 :

$$\alpha_{\rho w} = \alpha_{\rho s} = \alpha_{\gamma s} = 1 \qquad \alpha_E = \alpha_L \qquad \alpha_{\mu} = 1 \qquad \alpha_{\zeta} = 1$$

(1)

式中： α_L ——长度相似常数； α_{ρ_s} 、 α_{ρ_m} ——流体和弧门结构材料的质量密度相似常数； α_{γ_s} 、 α_E 和 α_{μ} ——弧门材料的密度、弹性模量和泊松比相似常数； α_{ζ} ——弧门结构内阻尼比相似常数。

模型比例尺及模型材料物理力学参数见表 2。

表 2 模型比例尺及模型材料物理力学参数

Table 2 Model scale and physical-mechanical parameters of model materials

弧门	α_L	模型材料	模型材料物理力学性能参数				耐水及稳定性
			密度 $\rho_m/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	弹性模量 E_m/MPa	泊松比 μ_m	阻尼比 ζ_m	
A	30	SS4	7.85~7.80	7050	0.24~0.28	0.03~0.05	耐水、稳定
B	20	SS5	7.85~7.80	10640	0.24~0.28	0.03~0.05	耐水、稳定

由于弧门在开度 $n=0$ 时处于挡水的静态受力状态(静水压力作用),开度 $n>0$ 时处于动态受力状态(动水压力作用),因此模型试验采用的应变量测系统是动静态两用的。系统仪器配置包括:微型应变计、YD-28A 动静态应变仪和 CRAS 动态数据采集分析系统等。

弧门在各种水头和开度(包括 $n=0$)下运行时的应力状态是通过在弧门模型上布置应变测点,在测点处粘贴微型应变计并按工况进行放水试验量测应变,再计算应力并换算到原型。

当 $n=0$ 时,弧门模型试验取得的各测点各轴向应变是在静水压作用下的静态应变数据。当 $n>0$ 时弧门在泄水,弧门模型试验取得的各测点各轴向应变是动态的,当水头稳定开度一定时门下流动可视为恒定流动,各测点各轴向动应变可假定为具有各态历经性的平稳随机过程。若以 $\epsilon_{im}(t)$ 表示模型测点 i 轴向动应变,则在上述假定下, $\epsilon_{im}(t)$ 可以表示为

$$\epsilon_{im}(t) = \epsilon_{im} + \epsilon_{0im}(t)$$

(2)

式中： ϵ_{im} —— $\epsilon_{im}(t)$ 的时间平均值(时均值)； $\epsilon_{0im}(t)$ ——均值为零($\epsilon_{0im}=0$)时 $\epsilon_{im}(t)$ 的动态分量。相应的 ϵ_{im} 是 $\epsilon_{im}(t)$ 的静态分量。 $\epsilon_{0im}(t)$ 包含 $\epsilon_{im}(t)$ 的所有动态信息,是分析弧门泄水时流激振动强度、动应力及其特性的依据。 ϵ_{im} 是 $\epsilon_{im}(t)$ 的时均特性,是分析弧门不同开度、不同水头下泄水时结构时均应力状态的依据。

由测点直角三轴向应变的模型量测值 ϵ_{1m} 、 ϵ_{2m} 、 ϵ_{3m} (拉应变为“+”,压应变为“-”)计算原型相应点应力 S_1 、 S_3 和 τ 的平面应力公式为^[8]

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \frac{E_m}{1-\mu_m^2} \alpha_L \alpha_{\gamma_s} (\epsilon_{1m} + \mu_m \epsilon_{3m}) \\ S_3 &= \frac{E_m}{1-\mu_m^2} \alpha_L \alpha_{\gamma_s} (\epsilon_{3m} + \mu_m \epsilon_{1m}) \\ \tau &= \frac{E_m}{2(1+\mu_m)} \alpha_L \alpha_{\gamma_s} [2\epsilon_{2m} - (\epsilon_{1m} + \epsilon_{3m})] \end{aligned} \right\}$$

(3)

式中脚标“ m ”表示模型量。由 S_1 、 S_3 和 τ 计算原型相应点主应力 S_{01} 、 S_{03} 及主方向角 α_0 ：

$$\left. \begin{aligned} S_{01} &= \frac{S_1 + S_3}{2} + \sqrt{\left(\frac{S_1 - S_3}{2}\right)^2 + \tau^2} \\ S_{03} &= \frac{S_1 + S_3}{2} - \sqrt{\left(\frac{S_1 - S_3}{2}\right)^2 + \tau^2} \\ \alpha_0 &= \frac{1}{2} \arctan \frac{-2\tau}{S_1 - S_3} \end{aligned} \right\}$$

(4)

由单轴向应变片测得模型的应变值 ϵ_{1m} ,可按下式计算应力 S_1 ,且一般认为该点的应力 S_1 就是主应力 S_{01} 。

$$S_1 = E_m \alpha_L \alpha_{\gamma_s} \epsilon_{1m}$$

(5)

应该指出, ϵ_{im} 是 $\epsilon_{im}(t)$ 的时均值(量测时段的),因而由式(2)~(5)计算的 S_1 、 S_3 、 τ 、 S_{01} 、 S_{03} 和 α_0 均具有时间平均意义,代表弧门在某运行工况下的时均应力状态。 t_j 瞬时的应力状态可用瞬时应变 $\epsilon_{im}(t_j)$ 代入式(3)~(5)计算 S_{1j} 、 S_{3j} 、 τ_j 、 S_{01j} 、 S_{03j} 、 α_{0j} 。当然式(3)~(5)可直接用于 $n=0$ 弧门挡水时的静态应力计算。

3 试验成果及分析

3.1 试验成果

弧门 A、B 不同工况下时均应力状态的试验成果见表 3 和表 4。

表 3 弧门 A 泄水时部分测点的时均应力(工作水头 106 m)

Table 3 Time-averaged stress at some measuring points of gate A at water discharge(operating head : 106 m)																				
开度 <i>n</i>	面板背水面时均应力/MPa				下主横梁时均应力/MPa						上主横梁		右上支臂门叶端时均应力/MPa							
	下主横梁 上部		下主横梁 下部		下腹板 (下游端)		上腹板 (下游端)		翼板 中轴向		翼板中轴向 时均应力/MPa		外侧		内侧					
	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁ [*]	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁ [*]	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂				
0.15	20.1	6.4	28.9	19.7	55.1	2.5	24.0	-55.6	-3.0	5.8	11.6	6.8	-7.4	-25.8	33.4	10.4				
0.30	31.3	20.2	39.8	33.8	42.4	1.9	25.4	-57.6	-35.8	-11.8	17.6	9.7	-3.0	-8.5	19.9	5.8				
0.45	29.2	17.8	31.2	25.0	32.7	-8.5	13.2	-52.2	-34.3	-12.2	0.8	-1.2	-3.4	-4.2	10.1	5.0				
0.60	55.9	41.8	24.8	18.8	25.5	-7.1	11.5	-35.0	-8.5	6.7	-0.3	-1.5	53.8	0.2	6.3	4.4				
0.70	28.5	6.3	23.8	19.6	20.2	-3.8	11.1	-26.4	-2.5	9.5	-0.7	-1.7	-0.8	-60.0	3.8	-1.5				
0.80	11.5	3.3	51.6	30.0	31.1	-7.9	10.8	-20.8	-27.3	-29.7	-1.6	-2.5	-0.8	-60.0	3.8	-1.5				
开度 <i>n</i>	右上支臂中部时均应力/MPa				右下支臂门叶端时均应力/MPa				右下支臂中部时均应力/MPa				左上支臂中部时均应力/MPa							
	上腹板		下腹板		外腹板		内腹板		外侧		内侧		上腹板		下腹板		外腹板		内腹板	
	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	
0.15	-17.6	-19.6	-19.5	-17.4	-1.8	-38.4	-23.8	-35.5	-20.1	-17.4	-18.6	0	-12.2	-18.0	-17.9	0				
0.30	-5.6	-10.7	-1.7	-11.2	-5.7	-28.8	-26.9	-31.8	-13.8	-19.2	-9.7	-2.4	-5.3	-12.2	-6.3	0				
0.45	-2.5	-7.1	2.2	-7.9	-8.7	-28.2	-28.7	-32.0	-13.9	-15.1	-8.2	-2.6	1.1	-5.9	0.1	0				
0.60	0.4	-8.1	0.7	-4.5	-11.3	-28.2	-29.0	-35.0	-14.7	-11.6	-9.0	-3.3	5.1	-3.1	1.9	0				
0.70	5.7	-5.2	5.6	-2.1	-10.3	-24.1	-33.6	-40.9	-15.4	-11.7	-9.2	-3.9	7.9	-2.5	5.2					
0.80	5.7	-5.2	5.6	-2.1	-10.3	-24.1	-33.6	-40.9	-15.4	-11.7	-9.2	-3.9	7.9	-2.5	4.9					

注 :*S*₁^{*} 的工作水头为 70 m。

表 4 弧门 B 不同开度时部分测点的时均应力(工作水头 80 m)

Table 4 Time-averaged stress at some measuring points of gate B at different gatages (operating head : 80 m)														
开度 <i>n</i>	面板背水面时均应力/MPa				下主横梁时均应力/MPa						上主横梁时均应力/MPa			
	下主横梁下部		下主横梁上部		上腹板(上游端)				上腹板(下游端)		翼板中上边缘	翼板中下边缘	翼板中上边缘	翼板中下边缘
	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ' ₀₁	<i>S</i> ' ₀₂	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁
0	23.1	- 31.3			118.4	82.4	147.7	94.8	205.6	- 57.8	0.5	29.5	62.5	30.9
0.10	21.3	- 26.1	83.7	- 141.4	97.7	57.6	129.3	81.1	108.2	33.9	0.3	14.7	55.9	27.2
0.20	- 0.5	- 44.6	74.4	- 126.0	80.5	53.8	112.3	74.3	115.8	37.2	0.6	19.0	47.9	34.0
0.30	- 20.3	- 57.4			59.4	33.0	110.2	67.8	149.0	- 9.4	- 0.1	15.9	42.0	24.1
0.45	13.5	- 20.0	85.9	- 86.8	55.6	30.0	101.9	62.7	122.0	13.2	- 1.4	4.8	51.6	15.1
0.60	- 46.2	- 79.5	17.6	- 104.0	36.1	18.6	99.6	57.0	145.3	31.7	- 0.5	3.8	0.2	10.4
0.80			- 10.9	- 43.9	73.9	50.2	87.6	32.5	12.7	- 0.3	- 0.9	0.8	42.7	0
开度 <i>n</i>	左上支臂中部时均应力/MPa				左下支臂门叶端时均应力/MPa				左下支臂中部时均应力/MPa					
	外侧板上	内侧板上	外侧板下	内侧板下	内侧		外侧		内侧板上	外侧板上	内侧板下	外侧板上	内侧板下	外侧板下
	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ₀₁	<i>S</i> ₀₂	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁	<i>S</i> ₁
0	- 37.9	- 38.6	- 51.1	- 57.2	- 14.1	- 24.8	- 17.5	- 32.2	- 104.2	- 108.5	- 98.8	- 112.5		
0.10	- 31.3	- 41.4	- 49.5	- 57.4	- 21.7	- 33.2	- 22.2	29.7	- 113.2	- 113.1	- 106.3	- 109.5		
0.20	- 10.6	- 14.3	- 28.4	- 35.5	- 34.0	- 44.7	- 26.2	- 33.6	- 84.9	- 85.9	- 90.8	- 91.9		
0.30	- 12.4	- 29.0	- 33.0	- 43.3	- 38.4	- 44.1	- 40.5	- 62.3	- 80.7	- 80.8	- 83.7	- 86.0		
0.45	4.7	8.3	- 7.5	- 10.3	- 24.1	- 34.5	- 21.3	- 28.6	- 57.7	- 50.6	- 58.5	- 55.1		
0.60	- 5.0	- 6.5	- 15.2	- 16.5	- 32.8	- 41.0	- 33.2	- 39.2	- 47.6	- 40.2	- 50.6	- 45.0		
0.80	- 2.6	- 12.2	- 12.0	- 18.2	- 35.0	- 77.4	- 31.7	- 38.4	- 42.0	- 24.8	- 45.1	- 32.1		

3.2 试验结果分析

表3和表4给出了不同水头和同一水头作用下不同开度弧门A、B各测点时均应力的大小及变化,对比分析表明,不同弧门的应力状态及其变化规律既有共同规律,也有其各自的特点。

a. 水头一定时弧门各测点时均应力状态随开度变化而变化,其变化规律或趋势因测点所处弧门位置的不同而异。例如:位于支臂门叶端的测点最大应力常出现在中大开度($n=0.6$ 等)工况;位于支臂中间部位的测点在 $n=0$ 或小开度($n=0.1, 0.15$)时应力最大,随开度的增大应力逐渐变小;位于主梁翼板跨中和主梁腹板上游端的测点在 $n=0$ 或小开度时应力最大,开度增大测点应力逐渐变小,但有时在大开度时也有反弹现象;面板下部测点一般在中等开度($n=0.3 \sim 0.6$)范围出现较大应力;同一弧门在某开度下当水头增加时弧门各测点的时均应力一般也跟着变化,大多数测点时均应力增大。

b. 水头不变弧门开度变化时弧门最大应力点的位置可能转移。如当开度为零或小开度时弧门最大应力点位置一般在下主横梁腹板的上下游端,而当开度增至大开度时弧门最大应力点位置可能转移至面板下部或支臂门叶端。

c. 弧形闸门虽在结构、材料配置和所受荷载方面一般是左右对称的,但因受制造加工、施工安装和运行操作等影响,实际运行中的弧门应力状态难以左右完全对称。

深孔弧门A、B具有上述应力变化的共同规律是由于它们有着总体上相同的结构型式、启闭方式、基本相同的支承和受力条件等。由于各工程的深孔弧门在结构型式、具体结构、支臂间连接杆系、受力条件、施工安装等方面存在着差异,因此,它们在泄水或挡水($n=0$)时的应力状态也存在着某些差异,这些差异往往是评价不同弧门或同一弧门不同设计以及修改弧门设计的重要依据。就A、B弧门而言,它们的时均应力状态存在以下差异:(a)弧门A的设计水头约为弧门B的2倍,但试验所得最大应力却远较弧门B的最大应力小,说明弧门A的设计安全系数高,材料强度的利用率低;(b)弧门A下主梁翼板跨中应力 S_1 在106m水头动水操作工况下均为压应力,而弧门B相应位置应力 S_1 均为拉应力;(c)分析支臂中间部位的应力状态可知,弧门A支臂四边的受力不够均匀,有的开度支臂中部外侧板出现拉应力,而弧门B支臂四边受力较均匀对称,这与两弧门支臂断面尺寸、支臂间连接杆系设计不同有关;(d)两弧门较大应力点位置也不尽相同,弧门B于下主梁腹板的上游端出现最大拉应力,弧门A于下主梁腹板的下游端和右上支臂的门叶端出现数值相近的最大压应力、于面板上出现最大拉应力。

4 结 语

深孔弧形闸门在挡水和不同开度下泄水时,结构应力状态是不同的,这是由于弧门支承条件和受力条件改变引起的,弧门各部位应力状态随开度变化的趋势或规律不尽相同。不同弧门或同一弧门不同设计方案之间因结构形式、受力条件等具有共性,其应力分布和变化规律也存在共同之处,但因弧门具体结构如支臂间连接杆系等存在差异,因此不同弧门或同一弧门不同设计方案彼此间应力状态也存在差异,这正是评价和优化弧门设计时应加以关注之处。另外,还应注意弧门最大应力点位置的转移以及弧门左右应力实际不完全对称对弧门设计和安全运行的影响。

近年来,钢结构水弹性模型试验技术日趋完善,利用水弹性试验技术(包括模型材料、水中应变量测技术和数据处理等),通过模型试验途径研究深孔弧形闸门在不同运行工况下的应力状态及其变化规律已成为可能,这对于优化弧门设计,充分利用材料强度,提高安全运行管理的科学水平具有现实意义,也可为其他领域(如船舰设计制造及其新结构研究)借鉴。

参考文献:

- [1] 李亚非,袁鹰,宋一乐,等.高坝洲深孔弧门静动力原型试验研究[J].湖北水力发电,2001(43):15-18.
- [2] 徐建光,李长和,王延斌,等.龙羊峡水电站表孔弧形闸门原型试验研究[J].水力发电,2004,30(5):28-31.
- [3] 吴杰芳,张林让,余岭,等.闸门流激振动全水弹性模型试验的原型验证[J].长江科学院院报,2005,22(5):62-64.
- [4] 钟德文,陈文光.弧型闸门动态测试研究[J].广西水利水电,2002(2):64-70.
- [5] 阎诗武.船闸廊道输水阀门振动研究进展[J].河海大学学报,1998,26(2):109-118.

[6]姜文潭.高拱坝泄洪中孔弧形闸门振动试验研究[J].大连理工大学学报,1994,34(1):68-74.
[7]孙小鹏.钢闸门流激振动的模拟试验技术[J].河海大学学报,1998,26(2):8-10.
[8]左东启.模型试验的理论和方法[M].北京:水利电力出版社,1984:279-291.

Structural stress states of radial gates of
deep discharge orifices under different gatages

ZHOU Chun-tian , LÜ Jia-cai , SUN Xiao-peng , ZENG Jian-hui

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :Based on hydroelastic model tests on radial steel gates of deep discharge orifices , a comparative analysis was performed of time-averaged stress states of radial gates and the regularity of their variation under different operating conditions . The result shows that radial gates are in different structural stress states under different operating gatages , that the position of the maximum stress of radial gates changes with operating gatage , and that there are both similarities and differences between stress states and regularities of their variation of different radial gates .

Key words :deep discharge orifice ; radial gate ; stress state ; model study

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊
全国水利系统优秀期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊
《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244 ,CN32-1439/TV ,ISSN1006-7647 ,双月刊)

《水利水电科技进展》由河海大学主办 ,主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境等学科有关的科技论文 ,设有研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目 ,适合与水科学、水工程、水资源、水环境等有关的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读 .

《水利水电科技进展》由邮局发行 ,邮发代号 :28-244 ,2007 年每期定价 8 元 ,全年 6 期共计 48 元 .读者亦可直接向编辑部订阅 .欢迎个人和单位直接汇款订阅或函索订单 .编辑部地址 :210098 南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部 .联系电话 :025-83786335 ,E-mail :jz@hhu.edu.cn ,http ://kkb.hhu.edu.cn .汇款时务请注明“订水利水电科技进展” .