

高拱坝表孔宽尾墩体型参数对泄流能力的影响

练继建, 桑林瀚, 缙文娟, 李会平

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:高拱坝坝顶较薄,表孔溢流坝面较短,导致宽尾墩应用于高拱坝表孔对泄流能力会产生一定的影响,为探究满足表孔泄流能力设计要求的宽尾墩体型,基于东庄水利工程,采用数值模拟方法,研究宽尾墩俯角、收缩比、墩尾折角、始折点位置等体型参数对高拱坝表孔泄流能力的影响以及泄流能力与过堰水流弗劳德数 Fr 的关系。研究表明,表孔泄流能力随着宽尾墩俯角的减小而减小,随着收缩比的减小而减小,随着墩尾折角的减小而增大,随着始折点位置与堰顶水平距离的减小而减小;提出了表征宽尾墩各类体型参数与堰上水头影响的综合影响系数 $k_{综}$,当 $k_{综} \geq 2$ 时,宽尾墩不影响表孔的泄流能力,当 $k_{综} < 2$ 时,随着 $k_{综}$ 值的减小,宽尾墩对表孔泄流能力的影响逐渐增大;过堰水流 Fr 沿程变化曲线在宽尾墩始折点上游存在一个折点,该折点处的 Fr 越大,宽尾墩对表孔泄流能力的影响越小。

关键词:高拱坝;宽尾墩;泄流能力;体型参数;弗劳德数;数值模拟

中图分类号:TV135.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2018)03-0001-07

Effects of flaring gate piers with different shape parameters on discharge capacity of surface spillway in a high arch dam//LIAN Jijian, SANG Linhan, GOU Wenjuan, LI Huiping(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The surface spillway is generally short for high arch dams due to the thin dam crest. Discharge capacity can be affected if flaring gate piers are applied to surface spillway in high arch dams. Numerical simulation was carried out on the basis of the Dongzhuang water conservancy project to explore the flaring gate piers that can meet the design requirements for discharge capacity. The effects of plunge angles, contraction ratios, deflection angles on discharge capacity and the relationship between discharge capacity and Froude number along the surface spillway were studied. The results show that the discharge capacity of surface spillway decreases with the decrease of plunge angles, contraction ratios and the horizontal distance between starting flare and weir crest but it increases with the decrease of deflection angles. A comprehensive influence coefficient $k_{综}$ is proposed to reflect the effect of the shape parameters of flaring gate piers and water head over the weir. For $k_{综} \geq 2$, flaring gate piers have no effect on the discharge capacity of a surface spillway. For $k_{综} < 2$, the effect on discharge capacity is gradually enhanced with a decreasing $k_{综}$. There is a knee point on the curve of Froude number along the surface spillway in the upstream of the starting flare. The discharge capacity is less affected by higher Froude number at the knee point.

Key words: high arch dam; flaring gate piers; discharge capacity; shape parameter; Froude number; numerical simulation

宽尾墩联合消能工是我国首创的新型消能工,到目前为止,宽尾墩已在许多工程中得到广泛的应用^[1-8]。早在 1979 年,林秉南院士就提出在拱坝顶部设置宽尾墩的设想。随着高拱坝的建设^[9-10]和泄洪消能技术的发展,在高拱坝表孔设置宽尾墩的联合泄洪消能方式被提出并得到应用。宽尾墩应用于高拱坝表孔可以增强水舌的纵向扩散和掺气,提高消能效率^[11],但同时也会对表孔溢流堰的泄流能力产生一定的影响。因此当高拱坝表孔采用宽尾墩消能工时,如何选择合适的体型,保证表孔的泄流能力满足设计要求就显得尤为重要。

目前宽尾墩对高拱坝表孔泄流能力影响的研究有限,且多关注宽尾墩单一体型参数的影响。李福田等^[12]对高拱坝表孔宽尾墩的水流流态和泄流能力进行了试验研究,指出当表孔流道内水流处于缓流时,表孔的泄流能力会受到宽尾墩的影响。李乃稳等^[13]通过试验研究指出当表孔水流流态为急流时,宽尾墩体型参数的变化不会影响表孔的泄流能

力,而当流态为缓流时,宽尾墩对表孔泄流能力影响较大。朱新元^[14]根据不同体型表孔宽尾墩泄流能力的实测结果,指出当上游水位上升至某一临界水位时,表孔宽尾墩的流量相比平尾墩开始减小,且该临界水位随宽尾墩收缩比的减小而降低。刘金星^[15]进一步提出用临界堰上水头表征宽尾墩对表孔泄流能力的影响,并研究了临界堰上水头与宽尾墩收缩比、墩尾折角以及坝面俯角的关系。在前人研究成果的基础上,本文基于东庄水利工程,拟采用数值模拟的方法,分别讨论宽尾墩俯角、收缩比、墩尾折角、始折点位置等体型参数对高拱坝表孔泄流能力的影响,并提出一个表征宽尾墩各类体型参数与堰上水头影响的综合影响系数;由于表孔泄流能力与过堰水流流态有关^[12],而水流流态可以通过弗劳德数 Fr 判定,故本文进一步研究了泄流能力与 Fr 的关系。

1 宽尾墩体型与计算工况

东庄水利工程位于泾河干流,挡水建筑物为混凝土双曲拱坝,最大坝高 230 m,坝顶高程 804 m,坝身泄洪建筑物包括 3 个溢流表孔、4 个排沙泄洪深孔和 2 个非常排沙底孔。溢流表孔采用宽尾墩收缩式消能工,堰顶高程 786 m,堰面采用开敞式 WES 实用堰,堰面曲线下接直线段。

为了研究宽尾墩对表孔泄流能力的影响,表 1 列出 13 种宽尾墩体型并分别对其进行数值模拟。宽尾墩几何参数如图 1 所示,主要包括:收缩比 $\beta = \frac{b}{B}$,墩尾折角 $\theta = \arctan \frac{B-b}{2(L+L')}$,直线段俯角 α ,收缩段始折点位置 $\xi_x = \frac{x}{H_d}$ 、 $\xi_y = \frac{y}{H_d}$,其中 B 为表孔进口宽度, b 为表孔出口宽度, L 为宽尾墩收缩段长度, L' 为宽尾墩收缩段向下游延伸的长度, x 和 y 分别为宽尾墩始折点与堰顶的水平距离和竖直距离, H_d 为表孔溢流堰的设计水头, $H_d = 15.5$ m。数值模拟计算工况按照表 2 堰上水头进行。

对照表 1 可知:体型 1~4 保持宽尾墩收缩比和折角不变,收缩段始折点位置一定,研究俯角为 20°、25°、27°、32°时对泄流能力的影响。体型 5、6 相比体型 4,宽尾墩俯角和收缩比保持不变,始折点位置一定,宽尾墩收缩段分别向下游延伸 2.27 m 和 3.27 m,墩尾折角相应减小为 7.52°和 7.23°。体型 7、8 相比体型 4,宽尾墩俯角和收缩比保持不变,折角分别改为 15.00°和 11.63°,收缩段始折点与堰顶的水平距离相应增至 20.18 m 和 16.47 m。体型 9、10 与体型 8 相比,宽尾墩俯角和折角保持不变,收缩比变为 0.3 和 0.5,始折点位置相应改变。体型 11~13 与体型 4 相比,宽尾墩俯角与始折点位置保持不变,通过

表 1 不同体型宽尾墩几何参数

体型	B/m	$\alpha/(\text{^\circ})$	b/m	β	$\theta/(\text{^\circ})$	L/m	x/m	ξ_x	y/m	ξ_y	L'/m
1	11	20	4.4	0.4	8.26	22.73	9.77	0.63	3.30	0.21	0
2	11	25	4.4	0.4	8.26	22.73	9.77	0.63	3.30	0.21	0
3	11	27	4.4	0.4	8.26	22.73	9.77	0.63	3.30	0.21	0
4	11	32	4.4	0.4	8.26	22.73	9.77	0.63	3.30	0.21	0
5	11	32	4.4	0.4	7.52	25.00	9.77	0.63	3.30	0.21	2.27
6	11	32	4.4	0.4	7.23	26.00	9.77	0.63	3.30	0.21	3.27
7	11	32	4.4	0.4	15.00	12.32	20.18	1.30	9.80	0.63	0
8	11	32	4.4	0.4	11.63	16.03	16.47	1.06	7.49	0.48	0
9	11	32	3.3	0.3	11.63	18.70	13.80	0.89	5.82	0.38	0
10	11	32	5.5	0.5	11.63	13.36	19.14	1.23	9.15	0.59	0
11	11	32	3.3	0.3	9.61	22.73	9.77	0.63	3.30	0.21	0
12	11	32	3.85	0.35	8.94	22.73	9.77	0.63	3.30	0.21	0
13	11	32	5.5	0.5	6.90	22.73	9.77	0.63	3.30	0.21	0

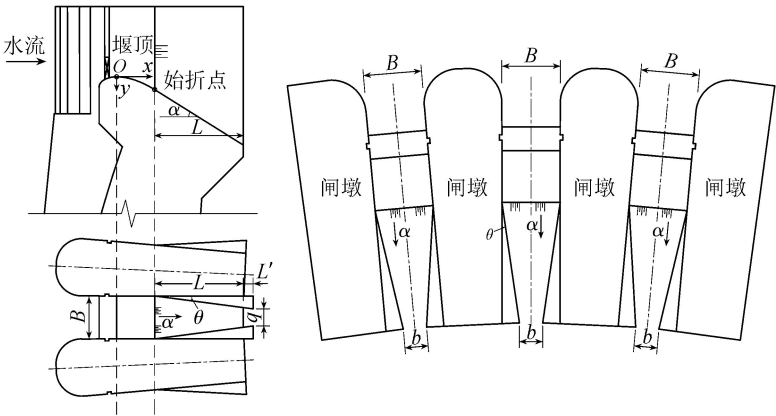


图 1 宽尾墩体型几何参数

表2 数值模拟工况

工况	上游水位 h/m	堰上水头 H/m
1	803.29	17.29
2	799.21	13.21
3	795.00	9.00
4	792.00	6.00
5	789.00	3.00

改变墩尾折角,收缩比相应变为0.3、0.35和0.5。

2 数值计算方法与试验验证

2.1 数值计算方法

采用流体动力学软件 Flow3D 对表孔宽尾墩的泄流能力与水面线进行数值模拟。Flow3D 软件将连续性方程和不可压缩黏性流体运动的 N-S 方程作为流体运动的控制方程,由于软件具有独特的 FAVOR 网格处理技术,并且采用 VOF 法追踪自由表面^[16],因此控制方程中加入体积分数 V_F 和面积分数 $A_x、A_y、A_z$,具体方程如下:

$$\frac{\partial(uA_x)}{\partial x} + \frac{\partial(vA_y)}{\partial y} + \frac{\partial(wA_z)}{\partial z} = 0 \tag{1}$$
$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \end{cases} \tag{2}$$

式中: $u、v、w$ 分别为 $x、y、z$ 方向的流速分量; $A_x、A_y、A_z$ 分别为 $x、y、z$ 方向可流动流体的面积分数; $G_x、G_y、G_z$ 分别为 $x、y、z$ 方向的重力加速度; $f_x、f_y、f_z$ 分别为 $x、y、z$ 方向的黏滞力加速度; t 为时间; V_F 为流体的体积分数; ρ 为流体密度; p 为作用在流体微元上的压力。

紊流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型。与标准 $k-\varepsilon$ 模型相比,该模型方程中的常数均由理论推导得出,而非试验方法确定,通用性较强,且能较好地模拟高速射流的各向异性。 k 方程和 ε 方程如下:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial k}{\partial x} + vA_y \frac{\partial k}{\partial y} + wA_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) = P + G + D_k - \varepsilon \tag{3}$$
$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + vA_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + wA_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = \frac{C_1 \varepsilon}{k} (P + C_3 G) + D_\varepsilon - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

式中: k 为紊动能; P 为由速度梯度引起的紊动能 k 的产生项; G 为由浮力引起的紊动能产生项,对于不可压缩流体取 0; $D_k、D_\varepsilon$ 为紊动扩散项; ε 为紊动扩散率; $C_1、C_2、C_3$ 为无量纲的经验系数。

本文主要研究宽尾墩对表孔溢流堰泄流能力的

影响,研究对象为东庄水利工程拱坝坝身原型 1 : 1 三维几何实体,并在建模时仅构建中间表孔作为坝身泄水建筑物。网格划分采用笛卡儿正交结构网格,网格大小为 0.5 m×0.5 m×0.5 m,网格范围顺水流方向 85 m,垂直水流方向 30 m,水深方向 80 m,将表孔宽尾墩计算体型包含在内。三维实体模型及网格区域见图 2。

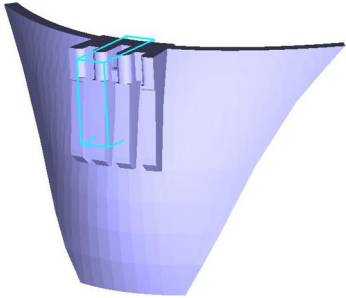
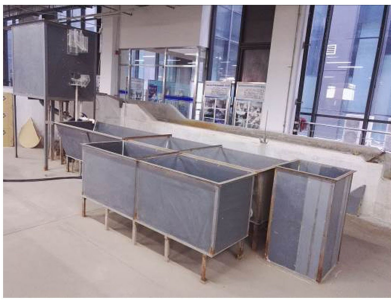


图2 三维实体模型及网格区域

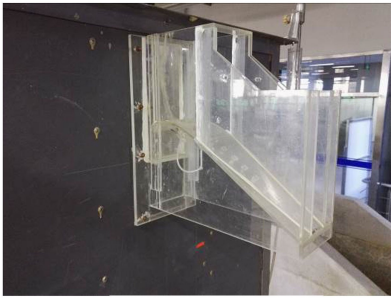
水流上游进口边界条件设为压力进口边界,水位高程为相应的工况水位,下游出口边界设为自由出流边界,其余边界设为对称边界。计算初始时刻在拱坝上游设定初始水体范围,并给定初始水位,压力为静水压。模拟结束条件设定为 200 s,流体设置为不可压缩流体,并采用 GMRES 方法求解离散方程。

2.2 数值计算结果试验验证

利用物理模型试验验证数值计算结果的可靠性。以体型 4 为代表,按照重力相似准则设计试验模型,模型比尺为 1 : 100。为满足模型糙率的要求,并方便观察水流流态,试验模型采用有机玻璃材料制作。整个模型由上游水箱、坝身泄洪表孔、下游水槽、水循环系统组成,模型布置见图 3。



(a) 整体模型



(b) 表孔宽尾墩模型

图3 试验模型布置

试验中分别测量不同上游来流条件下表孔宽尾墩的泄流能力和过流水面线,并与数值计算结果进行比较。表孔泄流流量采用电磁流量计测量,上游水位由测针量取,并选取表孔沿程不同断面测量其泄洪中心线上的水深,得出表孔的过流水面线。

图4给出表孔宽尾墩水位-流量关系的数值模拟与物理模型实测结果,图5给出上游水位分别为803.29 m、799.21 m、795.00 m、792.00 m以及789.00 m时表孔泄洪中心线上的水面线,沿程坐标0 m对应表孔堰顶位置。由此可知,表孔宽尾墩的泄流能力和过流水面线的数值模拟结果与物理模型实测值吻合良好,表明数值模拟方法的准确性较高,计算结果较为可靠。

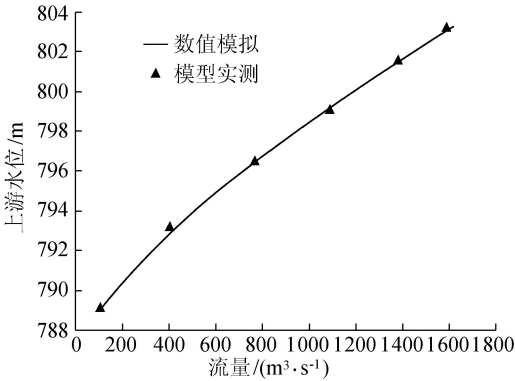


图4 体型4宽尾墩水位-流量关系曲线

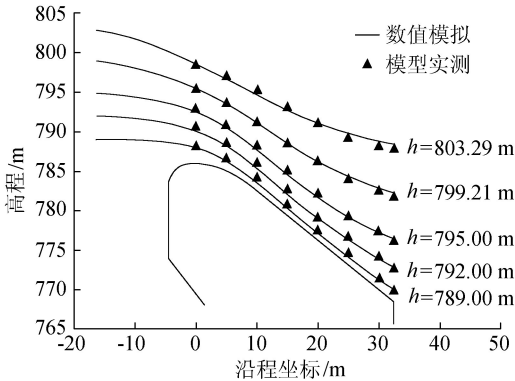


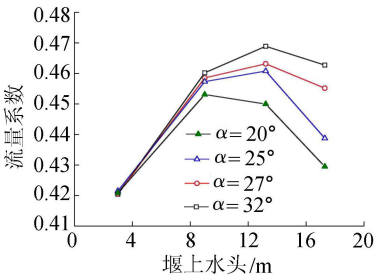
图5 体型4宽尾墩过流水面线

3 数值计算结果与分析

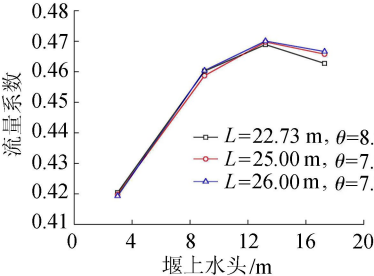
3.1 泄流能力与宽尾墩体型的关系

为研究高拱坝表孔泄流能力与宽尾墩体型的关系,根据数值模拟结果,绘制不同体型宽尾墩的流量系数随堰上水头的变化曲线,如图6所示,对比分析宽尾墩俯角 α 、收缩比 β 、墩尾折角 θ 以及始折点与堰顶的水平距离 x 对表孔泄流能力的影响。

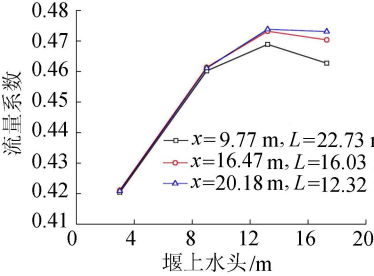
首先,研究了不同俯角 α 时,表孔宽尾墩($x=9.77\text{ m}, L=22.73\text{ m}, \beta=0.4, \theta=8.26^\circ$)流量系数与堰上水头的变化关系如图6(a)所示,结果表明随着俯角的减小,流量系数相应减小,这是由于随着俯角



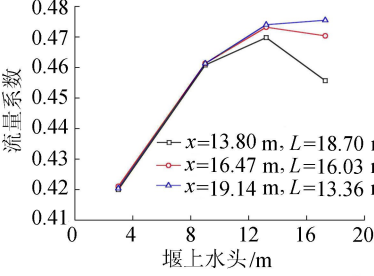
(a) 体型1~4 ($x=9.77\text{ m}, L=22.73\text{ m}, \beta=0.4, \theta=8.26^\circ$)



(b) 体型4~6 ($x=9.77\text{ m}, \alpha=32^\circ, \beta=0.4$)



(c) 体型4、7、8 ($\alpha=32^\circ, \beta=0.4$)



(d) 体型8~10 ($\alpha=32^\circ, \theta=11.63^\circ$)

图6 宽尾墩体型参数对表孔泄流能力的影响

的减小,水流流速逐渐降低,闸室内水流容易形成缓流,过流能力随之减小。其次,研究了不同墩尾折角 θ 时,表孔宽尾墩($x=9.77\text{ m}, \alpha=32^\circ, \beta=0.4$)流量系数与堰上水头的变化关系如图6(b)所示,通过延长宽尾墩收缩段的长度,墩尾折角相应减小,宽尾墩束窄作用减小,流量系数随之略微增大。再次,研究了不同始折点位置时,表孔宽尾墩($\alpha=32^\circ, \beta=0.4$)流量系数与堰上水头的变化关系如图6(c)所示,随着始折点与堰顶水平距离 x 的减小,流量系数相应减小,这是由于随着 x 的减小,堰面逐渐形成壅水,从而影响了表孔的过堰流量,尽管墩尾折角 θ 随着 x 的减小有所减小,但始折点位置的变化对泄流能力的影响较大,因此流量系数呈逐渐减小的趋势。最后,研究了不同收缩比 β 时,表孔宽尾墩($\alpha=32^\circ, \theta=11.63^\circ$)流量系数与堰上水头的变化关系如图6(d)

所示,随着收缩比的减小,流量系数逐渐减小,这是由于随着收缩比的减小,出口水流逐渐壅高,水深变大,影响了水流的正常下泄,且始折点与堰顶的水平距离随收缩比的减小逐渐减小,流量系数相应减小。

计算结果表明,不同体型表孔宽尾墩的流量系数随堰上水头的变化规律呈相同的趋势,即当堰上水头较小($H=3.00\text{ m}$)时,不同体型表孔宽尾墩的流量系数均在 0.42 左右,此时表孔的泄流能力基本不受宽尾墩的影响,随着堰上水头的增加,宽尾墩体型参数对表孔泄流能力的影响逐渐增大,不同体型表孔宽尾墩的流量系数一般呈先增大后减小的趋势。

综上讨论,高拱坝表孔宽尾墩对泄流能力的影响主要与宽尾墩的几何参数与表孔堰上水头有关。基于上述分析结果,进一步研究宽尾墩对泄流能力影响的定量指标。定义一个综合影响系数 $k_{综}$:

$$k_{综} = \frac{\beta \tan \alpha}{\tan \theta} \frac{x}{H} \tag{5}$$

根据数值模拟结果,计算相同堰上水头条件下宽尾墩单孔过堰流量 Q 和平尾墩单孔过堰流量 Q_0 的比值 Q/Q_0 ,绘制 Q/Q_0 与参数 $k_{综}$ 的关系曲线如图 7 所示。

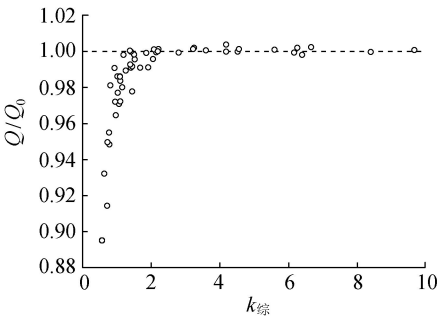


图 7 Q/Q_0 与 $k_{综}$ 的关系曲线

由图 7 可知, Q/Q_0 以参数 $k_{综}=2$ 为临界点,当 $k_{综} \geq 2$ 时, $Q/Q_0 \approx 1$,表孔泄流能力不受宽尾墩的影响,当 $k_{综} < 2$ 时, $Q/Q_0 < 1$,且 Q/Q_0 随着 $k_{综}$ 值的减小而减小,宽尾墩对表孔泄流能力的影响逐渐增大。因此,对高拱坝表孔宽尾墩进行体型设计时,应避免收缩比和俯角过小、墩尾折角过大的情况,收缩段始折点位置应与堰顶保持一定的水平距离,从而使表孔宽尾墩在高水位运行工况下 $k_{综}$ 值较大,保证表孔的泄流能力满足设计要求。

3.2 泄流能力与弗劳德数的关系

表孔宽尾墩过堰水流存在降水曲线、急流冲击波、水跃壅水和缓流 4 种流态,当水流处于缓流流态时会通过对堰流量产生影响^[12]。由于弗劳德数 Fr 是判别水流流态的重要参数,且过堰水流沿程 Fr 的大小同样会受到宽尾墩体型的影响,因此进一步分析了宽尾墩几何参数对过堰水流 Fr 的影响,并在此基

础上讨论了表孔泄流能力与 Fr 的关系。

保持上游来流条件一致,即堰上水头 $H=17.29\text{ m}$,平尾墩以及不同体型宽尾墩泄洪中心线上的 Fr 沿程变化曲线分别见图 8 和图 9,图 8、9 中沿程坐标 0 m 对应表孔堰顶位置。

由图 8 可知,当表孔体型为平尾墩($\beta=1$)时,两侧闸墩对水流无束窄作用,水流经过堰顶以后,沿程流速逐渐增大,水深逐渐减小, Fr 沿程变化曲线呈不断增大的趋势,在表孔出口处 Fr 达到最大。

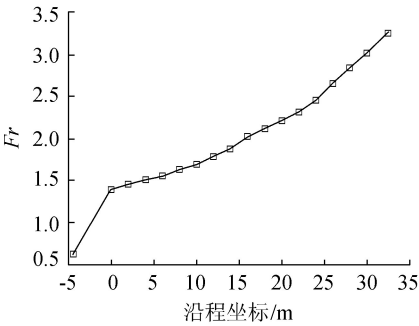


图 8 表孔平尾墩沿程 Fr

由图 9 可知,表孔采用不同体型的宽尾墩,当水流刚经过堰顶时, Fr 沿程增大较快。从沿程坐标 6~8 m 开始,由于受宽尾墩侧向束窄的作用,水位壅高,流速变缓, Fr 沿程变化开始减缓,曲线存在一个折点,折点处 Fr 的大小与宽尾墩体型有关。此外,宽尾墩俯角与收缩比越小,墩尾折角越大,始折点与堰顶的水平距离越小时,两侧闸墩对水流的束窄作用越大,折点处 Fr 越小,这与表孔泄流能力随宽尾墩体型的变化规律相吻合。曲线折点下游的 Fr 变化趋势主要与宽尾墩收缩比和墩尾折角有关,当收缩比较大,墩尾折角较小时, Fr 沿程不断增大,当收缩比较小,墩尾折角较大时, Fr 呈先减小后增大的趋势。

表 3 列出堰上水头 $H=17.29\text{ m}$ 时不同体型表孔宽尾墩与平尾墩过堰流量之比 Q/Q_0 、折点弗劳德

表 3 不同体型表孔宽尾墩 Q/Q_0 、 $Fr_{折}$ 与 $Fr_{出}$ 的关系

体型	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	Q/Q_0	$Fr_{折}$	$Fr_{出}$
1	1 503.67	0.895	0.950	1.223
2	1 536.20	0.914	1.100	1.345
3	1 593.65	0.948	1.157	1.401
4	1 620.07	0.964	1.279	1.508
5	1 630.81	0.971	1.313	1.534
6	1 633.69	0.972	1.329	1.534
7	1 656.41	0.986	1.416	1.432
8	1 646.83	0.980	1.377	1.463
9	1 595.42	0.949	1.182	1.103
10	1 664.79	0.991	1.463	1.783
11	1 565.90	0.932	1.093	1.157
12	1 604.30	0.955	1.211	1.361
13	1 642.38	0.977	1.363	1.776

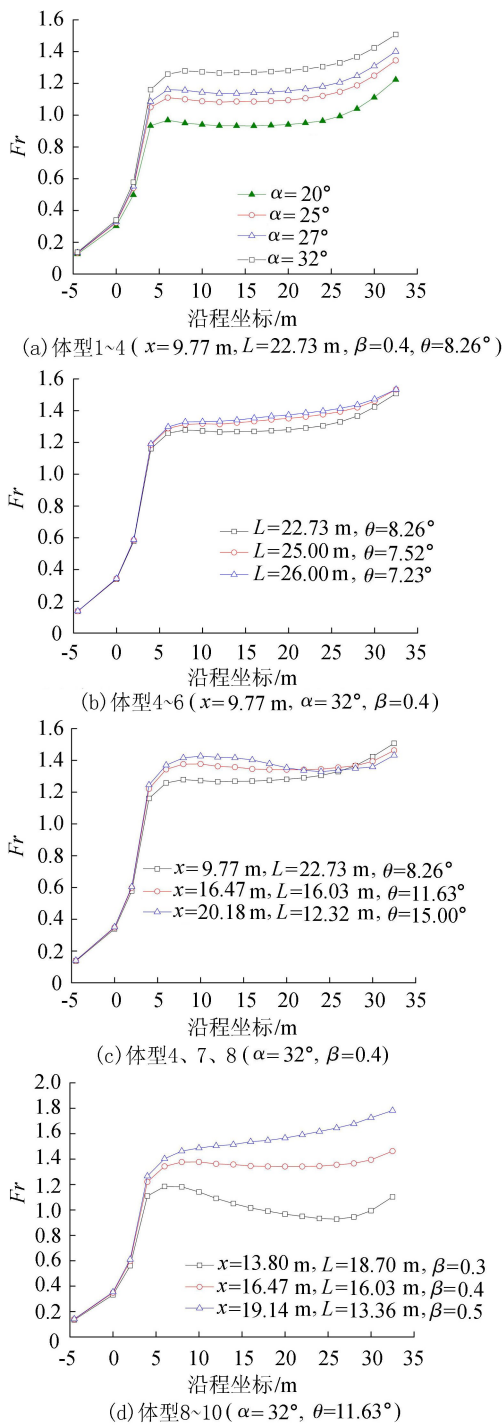


图9 不同体型表孔宽尾墩沿程 Fr

数 $Fr_{折}$ 与表孔出口弗劳德数 $Fr_{出}$ 。由于不同体型表孔宽尾墩 Fr 沿程变化曲线折点位置相近,均在沿程坐标 6~8 m 范围内,且折点附近 Fr 变化不大,因此统一取沿程坐标 8 m 处的 Fr 作为各体型表孔宽尾墩的 $Fr_{折}$ 。从表 3 可以看出不同体型表孔宽尾墩的 $Fr_{出}$ 均大于 1,出口水流流态为急流,但表孔泄流能力仍会受到宽尾墩的影响,因此仅从过堰水流流态判断宽尾墩对表孔泄流能力的影响存在一定的局限性。

由于 Q/Q_0 与 $Fr_{折}$ 的大小均与宽尾墩体型有关,且随宽尾墩几何参数的变化规律相同,为进一步

分析二者之间的关系,绘制 Q/Q_0 与 $Fr_{折}$ 的关系曲线,见图 10。图 10 中, Q/Q_0 与 $Fr_{折}$ 基本呈线性关系,随着 $Fr_{折}$ 的增大,宽尾墩对水流的束窄作用逐渐减小, Q/Q_0 呈线性增大趋势。由此看出,表孔宽尾墩对泄流能力的影响与 $Fr_{折}$ 有关,根据 $Fr_{折}$ 的大小,可以分析不同体型表孔宽尾墩泄流能力的相对大小。

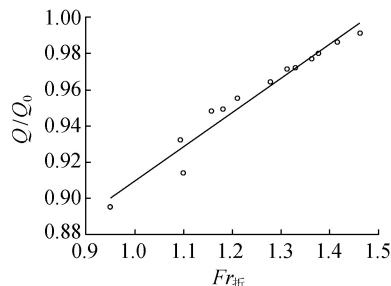


图 10 Q/Q_0 与 $Fr_{折}$ 的关系曲线

4 结 论

高拱坝表孔溢流坝面较短,采用宽尾墩消能工泄流能力会受到一定的影响,这成为宽尾墩应用于高拱坝表孔的制约因素。本文基于东庄水利工程,通过数值模拟方法分析研究了宽尾墩各类体型参数对高拱坝表孔泄流能力的影响。研究表明:

a. 表孔泄流能力随着宽尾墩俯角的减小而减小,随着收缩比的减小而减小,随着墩尾折角的减小而增大,随着始折点位置与堰顶水平距离的减小而减小。随着堰上水头的增加,宽尾墩体型参数对表孔泄流能力的影响逐渐增大,表孔宽尾墩的流量系数一般呈先增大后减小的趋势。

b. 提出了一个表征宽尾墩各类体型参数与堰上水头影响的综合影响系数 $k_{综}$ 。以 $k_{综}=2$ 为临界点,当 $k_{综} \geq 2$ 时,表孔泄流能力不受宽尾墩的影响;当 $k_{综} < 2$ 时,随着 $k_{综}$ 值的减小,相同堰上水头条件下表孔宽尾墩单孔过堰流量 Q 和平尾墩单孔过堰流量 Q_0 的比值 Q/Q_0 相应减小,宽尾墩对表孔泄流能力的影响逐渐增大。

c. 表孔泄洪中心线上的弗劳德数 Fr 沿程变化曲线在宽尾墩始折点上游存在一个折点,该折点处的 $Fr_{折}$ 随俯角的减小而减小,随收缩比的减小而减小,随墩尾折角的增大而减小,随始折点与堰顶水平距离的减小而减小。相同堰上水头条件下,不同体型表孔宽尾墩与平尾墩单孔过堰流量之比 Q/Q_0 与 $Fr_{折}$ 呈线性关系,随着 $Fr_{折}$ 的增大, Q/Q_0 呈线性增大的趋势。

参考文献:

- [1] 于忠政,刘永川,谢省宗,等. 安康水电站泄洪消能新

- 技术的研究与应用[J]. 水力发电, 1990(11): 32-36. (YU Zhongzheng, LIU Yongchuan, XIE Shengzong, et al. Studying & application on the new dissipator technology of Ankang Hydropower [J]. Water Power, 1990(11): 32-36. (in Chinese))
- [2] 谢省宗, 朱荣林, 李世琴, 等. 宽尾墩戽式消力池联合消能工的水力特性及其水力计算方法[J]. 水利学报, 1992, 22(2): 7-18. (XIE Shengzong, ZHU Ronglin, LI Shiqin, et al. Hydraulics of bucket basin equipped with flaring gate piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 22(2): 7-18. (in Chinese))
- [3] 陈其焯. 五强溪水电站的设计优化[J]. 水力发电, 1994(11): 29-32. (CHEN Qixuan. Design optimization of Wuqiangxi Hydropower[J]. Water Power, 1994(11): 29-32. (in Chinese))
- [4] 南晓红, 梁宗祥, 刘韩生. 新型宽尾墩在索风营水电站的应用与研究[J]. 水利学报, 2003, 34(8): 49-52. (NAN Xiaohong, LIANG Zongxiang, LIU Hansheng. New type of flaring pier for improving energy dissipation of stepped surface overflow dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(8): 49-52. (in Chinese))
- [5] 胡耀华, 伍超, 卢红, 等. 宽尾墩后接阶梯溢流坝面水工设施的研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25(5): 37-41. (HU Yaohua, WU Chao, LU Hong, et al. Study on hydraulic structure of flaring gate piers locating at the upstream of stepped spillway[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(5): 37-41. (in Chinese))
- [6] 刘璐, 张建民, 余飞, 等. 重力坝下游宽尾墩和消力池联合消能工水力特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 49-55. (LIU Lu, ZHANG Jianmin, YU Fei, et al. Experimental study of hydraulic characters of the flaring gate pier & stilling basin united energy dissipator with high water head and large discharge[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 49-55. (in Chinese))
- [7] 辜晋德, 练继建. X型宽尾墩的动水荷载特性及体型优选研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(1): 58-61. (GU Jinde, LIAN Jijian. Study on characteristics of hydrodynamic loads and shape optimization of X-shaped flaring gate pier[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(1): 58-61. (in Chinese))
- [8] 谢省宗, 吴一红, 陈文学. 我国高坝泄洪消能新技术的研究和创新[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 324-336. (XIE Shengzong, WU Yihong, CHEN Wenxue. New technology and innovation on flood discharge and energy dissipation of high dams in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 324-336. (in Chinese))
- [9] 王仁坤. 我国特高拱坝的建设成就与技术发展综述[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 13-19. (WANG Renkun. Review of construction achievements and technological development of super-high arch dam in China[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 13-19. (in Chinese))
- [10] 陈青生, 汪星良. 高拱坝泄洪方式的分类及坝身泄水建筑物的设计水平[J]. 水利水电科技进展, 2001, 21(5): 17-19. (CHEN Qingsheng, WANG Xingliang. Classification of high arch dam flood discharge and design level of release structure in dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2001, 21(5): 17-19. (in Chinese))
- [11] 龚振瀛, 刘树坤, 高季章. 宽尾墩和窄缝挑坎: 收缩式消能工的应用[J]. 水力发电学报, 1983, 2(3): 48-57. (GONG Zhenying, LIU Shukun, GAO Jizhang. Convergent structures to enhance energy dissipation flaring gate piers and slit-type flip buckets [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1983, 2(3): 48-57. (in Chinese))
- [12] 李福田, 刘沛清, 许唯临, 等. 高拱坝表孔宽尾墩对泄洪能力影响的试验研究[J]. 水利学报, 2003, 34(11): 43-47. (LI Futian, LIU Peiqing, XU Weilin, et al. Experimental study on effect of flaring piers on weir discharge capacity in high arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(11): 43-47. (in Chinese))
- [13] 李乃稳, 许唯临, 刘超, 等. 高拱坝表孔宽尾墩水力特性试验研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 56-61. (LI Naiwen, XU Weilin, LIU Chao, et al. Experimental study on hydraulic characteristics of flaring gate piers of surface spillway in the high arch dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 56-61. (in Chinese))
- [14] 朱新元. 高拱坝表孔宽尾墩: 深孔窄缝挑坎联合消能试验研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [15] 刘金星. 东庄水利枢纽无碰撞泄洪消能体型优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [16] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. J Comput Phys, 1981, 39: 201-225.

(收稿日期: 2017-09-19 编辑: 骆超)

