

东庄水利枢纽表孔宽尾墩水力特性研究

刘金星, 杨敏

(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: 为了验证东庄水利枢纽表孔宽尾墩初设方案的泄洪消能特性,在水工模型试验的基础上,采用三维水流的 RNG $k-\varepsilon$ 紊流双方程数值模型、自由面的 VOF 处理法来模拟表孔宽尾墩水流特性。根据东庄水利枢纽的初设方案,计算了宽尾墩的泄流能力、流道内的水面线以及水舌的纵向扩散长度和水垫塘的时均冲击压力,并将相应的试验值与计算值相结合进行了对比分析,发现两者吻合度较高。对比结果表明:2#表孔出口俯角偏小,在高水位时泄流能力受到宽尾墩的影响低于设计值,各工况下 $\Delta P_{\max}$ 均小于 $15 \times 9.81 \text{ kPa}$ 的防护标准,初设方案收缩比偏大、墩尾折角偏小,水舌纵向扩散效果不明显,无法实现表深孔无碰撞消能的效果。

关键词: 宽尾墩; 模型试验; 三维数值模拟; RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型; 水力特性

中图分类号: TV131.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)06-0187-06

Study on hydraulic characteristics of broad tail pier of surface spillway in Dongzhuang project

LIU Jinxing, YANG Min

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to evaluate the feature of flood discharge and energy dissipation of broad tail pier of surface spillway in the primary scheme of Dongzhuang project, the paper used RNG $k-\varepsilon$ two-equation model for 3D turbulent flow and the VOF method to numerically simulate the feature of water flow of broad tail pier based on hydraulic model test. According to the primary scheme, the paper calculated discharge capacity, water surface curve, velocity, longitudinal length of water and impact pressure in the plunging pool, and compared the results of calculation and test, and found both the result are in good agreement. After the comparison of those values of model test and calculation, it shows the broad tail pier have affected the discharge of surface spillway No. 2 under high water level; $\Delta P_{\max}$ is under the protection standards of $15 \times 9.81 \text{ kPa}$. The contraction ratio of preliminary design scheme is too large and, piers angle is small, the effect of longitudinal diffusion of water tongue is not obvious and is unable to realize the effect of no collision free energy dissipation in surface deep hole.

Key words: broad tail pier; model test; 3D numerical simulation; RNG $k-\varepsilon$ turbulent flow model; hydraulic characteristics

宽尾墩联合消能工是我国首创的一种新型消能工,这种消能设施和挑流、底流、屏流、坝面台阶消能等消能工相结合应用在许多工程中,解决了大量常规消能工难以解决的消能防冲问题^[1]。在高拱坝研究方面,目前窄河谷中多为表深孔水舌空中碰撞^[2] + 水垫塘的泄洪消能形式,但水舌碰撞产生的溅水雾化严重、水垫塘长度较大。为解决上述问题,在高拱坝坝身孔口布置中引进收缩式消能工技术,林秉南院士首先提出“在拱坝顶部设置宽尾墩,可使自由溢流水舌

成一股股收缩射流沿纵向充分扩散,然后跌入下游水垫,促进掺气消能”的设想^[3];刘沛清、许唯临等^[4]创造性地提出了表孔采用宽尾墩消能工^[5],深孔采用窄缝坎消能工,形成宽尾墩-窄缝坎-水垫塘^[6]水舌空中无碰撞消能^[7]形式,不仅可以消除水舌碰撞引起的雾化问题,还可以充分利用窄峡谷纵向空间,有效地缩短水垫塘长度,进一步提高水垫塘的消能效率。然而,宽尾墩应用于 200 m 以上的高薄拱坝的并不多见,东庄水利枢纽坝高达到 234m,溢流表孔采用宽尾

收稿日期:2014-08-15; 修回日期:2014-09-25

作者简介:刘金星(1989-),男,江西吉安人,硕士研究生,主要从事水工水力学研究。

通讯作者:杨敏(1956-),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,主要从事水工水力学研究。

墩后其泄流能力、泄流流态、水面线、水舌的纵向扩散、水垫塘底板时均冲击动压等水力特性如何,能否实现表深孔无碰撞消能的效果,是该工程较关键的技术问题,本文在模型试验基础上,结合数值模拟对上述问题进行了研究。

1 模型试验及宽尾墩体型

1.1 试验设计

东庄水利枢纽是渭河防洪减淤体系的重要组成部分,挡水建筑物为混凝土双曲拱坝,最大坝高 234 m,坝顶高程 804 m。泄洪排沙建筑物位于河床中间,其泄洪消能方式为坝身 3 个表孔和 4 个深孔以及下水水垫塘相结合的方式。

试验模型为东庄水利枢纽整体模型,按照重力相似准则设计,模型比尺为 1: 50。溢流表孔采用宽尾墩收缩式消能工,堰顶高程 784 m,每孔泄洪轴线处宽度 12 m,宽尾墩出口宽度为 6 m,墩尾折角 7.63°。深孔布置在表孔闸墩下部,深孔进口高程为 712、718 m。坝下设消能水垫塘,水垫塘净长 350 m,梯形断面,底宽 40 m,底板顶部高程为 580 m。为便于观察泄水建筑物及水垫塘水流流态,模型均采用有机玻璃制作,水垫塘布置测压管量测时均动水压力。

1.2 宽尾墩体型参数

宽尾墩的体型几何参数直接影响下游水垫塘的

消能防冲效果,对于直墙式宽尾墩,其体型可以用以下几个特征参数来表征:

收缩比 $\varepsilon = \frac{b}{B} = 1 - \frac{b' - B'}{B}$

尾端折角 $\theta = \arctan \frac{b' - B'}{2L}$

宽尾墩始折点参数 $\xi_x = \frac{x}{H_d}; \xi_y = \frac{y}{H_d}$

式中: B 和 b 分别为宽尾墩流道起始段宽度和宽尾墩闸室出口宽度, $B = 12\text{ m}$ 、 $b = 6\text{ m}$; B' 和 b' 分别为闸墩起始段宽度和闸墩末端宽度, $B' = 13.75\text{ m}$ 、 $b' = 19.75\text{ m}$; L 为宽尾墩收缩段长度; x 、 y 分别为从堰顶起算向下游的水平 and 竖向的垂直距离; H_d 为设计水头,不含行近流速水头, $H_d = 17.6\text{ m}$,表孔宽尾墩布置示意图见图 1。

表孔宽尾墩体型参数:收缩比 $\varepsilon = 0.5$,尾端折角 $\theta_1 = \theta_2 = 7.63^\circ$,始折点位置参数 $\zeta_x = 0.514$ 、 $\zeta_y = 0.179$,1#、3# 表孔宽尾墩出口直线段俯角 α 为 30° ,2# 表孔出口俯角 α 为 20° ,3 表孔出口均为矩形出口,宽尾墩体型几何参数见表 1。参考已建工程及大量试验表明^[8]: $\varepsilon = 0.3 \sim 0.7$, $\theta = 11.05^\circ \sim 21.8^\circ$, $\zeta_x = 0.9 \sim 2.0$, $\zeta_y > 0.37$,出口倾角一般采用俯角,该设计方案体型几何参数基本不在参考值范围内。因此,有必要通过模型试验和数值计算来检验设计方案表孔宽尾墩水力特性及下游水垫塘消能防冲效果如何。

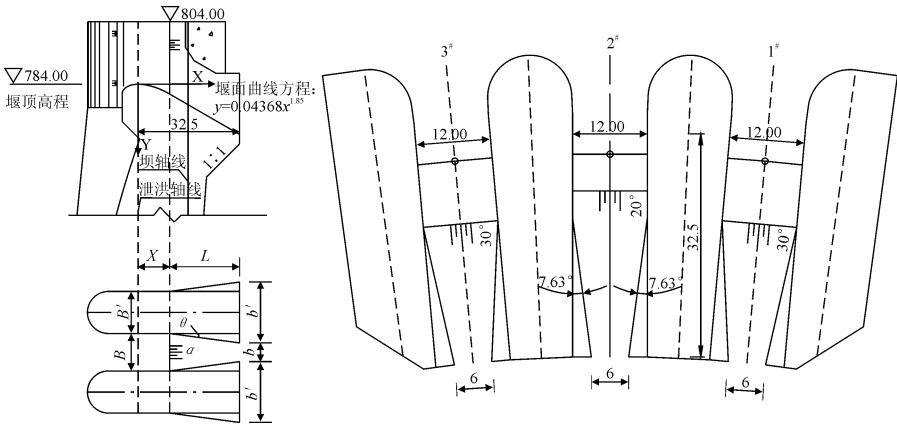


图 1 表孔宽尾墩布置图(单位:m)

2 数值模拟方法

2.1 控制方程

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

不可压缩紊流时均流动的运动方程(即雷诺方

程)为:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) \tag{2}$$

k 方程和 ε 方程表示如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}[\sigma_k(\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i}] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}[\sigma_\varepsilon(\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: u_i 为 x_i 方向的速度分量; t 为时间; $i, j = 1, 2, 3$; f_i 为作用于单位质量水头上的体积力; ρ 为流体密度; p 为压强; μ 为流体的运动粘滞系数; μ_t 为紊流运动粘性系数, 可以由单位质量的紊动能 k ($k = \frac{\overline{u_i u_i}}{2}$) 和紊动能耗散率 ε 来确定, 其公式为 $\mu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, C_μ 为经验常数取 $C_\mu = 0.0845$; G_k 为平均速度梯度产生的紊动能的产生项, 可由 $G_k = \mu_i (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$

$\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 确定; σ_k 、 σ_ε 分别为紊动能和耗散率对应的 Prantl 常数, 均取 1.39; $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}$, $\eta_0 = 4.337$, $\beta = 0.012$, $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} \frac{k}{\varepsilon}$, $E_{ij} = \frac{1}{2} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})$, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 均为经验系数, 分别取 1.42、1.68。

2.2 求解方法

数学模型求解采用有限体积法, 自由液面的处理方法采用 VOF 法, 动量、紊动能、紊动能耗散率各项的离散格式均采用二阶迎风格式, 并运用 GMRES 方法求解离散方程, 压力-速度耦合采用压力校正法, 数值方法采用对压强初始值依赖性不强且收敛性较好的 Simpler 法, 时间差分采用全隐格式。

2.3 计算模型及网格划分

计算模型为泾河东庄水利枢纽原型 1:1 三维几何实体, 模拟范围包括拱坝及其上游库区 150 m, 水垫塘出口以外 50 m。网格划分方法采用自由网格法, 均为分块结构化正交网格, 对泄水建筑物局部进行加密, 网格单元总数为 35 531 964。

分别对设计水位 799.61 m 和校核水位 803.57 m 两种工况运行条件进行了数值模拟。水流上游进口边界条件为压力进口边界, 设置水位高程分别为相应工况库水位高程; 下游出口边界条件为压力出口边界, 同时给定对应工况的水位; 大气进口采用压力进口边界条件, 出口采用压力出口边界条件; 壁面

采用无滑移边界条件, 对粘性底层采用标准壁函数法处理。计算初始时刻在上游库区及下游水垫塘设置一定高度的初始水体, 以加快水流稳定, 初始时间步长设为 0.001 s。

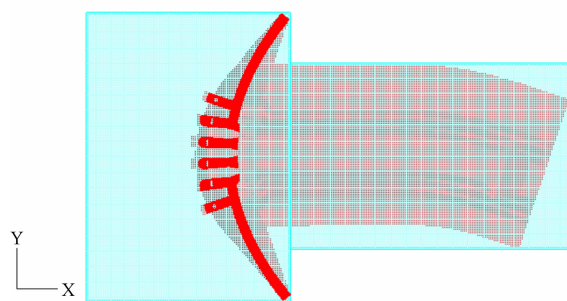


图2 模型及网格划分示意图

3 试验、数值模拟成果及对比分析

3.1 表孔泄流能力

宽尾墩应用于高拱坝表孔, 其首要条件就是尽可能减小对表孔泄流能力的影响, 李福田、刘沛清等^[9]的试验结果表明, 表孔宽尾墩的泄流能力与收缩比和堰上水头有关, 在不同堰前水头和不同宽尾墩收缩比条件下闸室内可能出现降水曲线、急流冲击波、水跃壅水、缓流等 4 种流态; 表孔宽尾墩流道内水流处于缓流流态时会减小其泄流能力, 因此保持流道内的水流流态始终为急流流态才能保证表孔的泄流能力不受影响。

表孔宽尾墩泄流能力由其水位-流量关系曲线来表征, 各工况水位-流量关系计算值与试验值对比结果见图 3。由图可知, 试验值和计算值吻合较好, 与设计曲线误差较小。上游设计水位 799.61 m 时, 2[#]表孔泄流量设计值和试验值分别为 1381.02、1 412.48 m³/s, 试验值比设计值大 2.3%, 而当水位增加至校核水位 803.57 m 时, 泄流量设计值和试验值分别为 1 982.80、1 958.13 m³/s, 试验值比设计值低 1.3%, 表明 2[#]表孔在较高水位时泄流能力已受到宽尾墩的影响, 试验值低于设计值; 1[#]和 3[#]表孔体型相同, 设计水位 799.61 m 时, 泄流量设计值和试验值分别为 1381.02、1 449.64 m³/s, 试验值比设计值大 4.97%, 校核水位 803.57 m 时, 泄流量设计值和试验值分别为 1 982.80、2 026.59 m³/s, 试验值比设计值大 2.21%, 表明 1[#]、3[#]表孔宽尾墩体型参数下表孔泄流能力能够满足设计要求。

3.2 表孔流态及水面线

不同运行工况下, 表孔流道内中线水面线计算

值与试验值比较见图 4,3 个表孔的计算值和试验值基本保持一致。

在试验中观察到设计水位(799.61 m)工况时,表孔宽尾墩流态与平尾墩降水曲线流态不同,过堰水流在重力作用下流速沿程迅速增加、水深减小,在宽尾墩始折点处其流道内水流形成急流流态。在始折点下游,宽尾墩边墙向流道内部收缩,导致水流沿两边墙逐渐向流道中线偏转,并在下游交汇形成急流冲击波,边墙水深大于中线水深,在横向形成下凹的“U”形水面;两侧冲击波交汇后形成“水冠”,中

线附近水流壅高,水深大于两侧边墙的水深,在横断面上形成上凸的“∩”形水面;宽尾墩出口处水深比平尾墩有所增加,但整体的垂向扩散效果并不是太明显,这与设计方案采用了较大的收缩比和较小的墩尾折角有关。在校核水位(803.57 m)工况时,3 表孔内的流态及水面线变化规律与设计水位工况下类似,不同的是,冲击波更加剧烈,宽尾墩出口水深更大,由于 2[#]表孔直线段倾角(20°)较缓,出口水深大于出口边墙高度,水面高程超过表孔弧形闸门门轴高程。

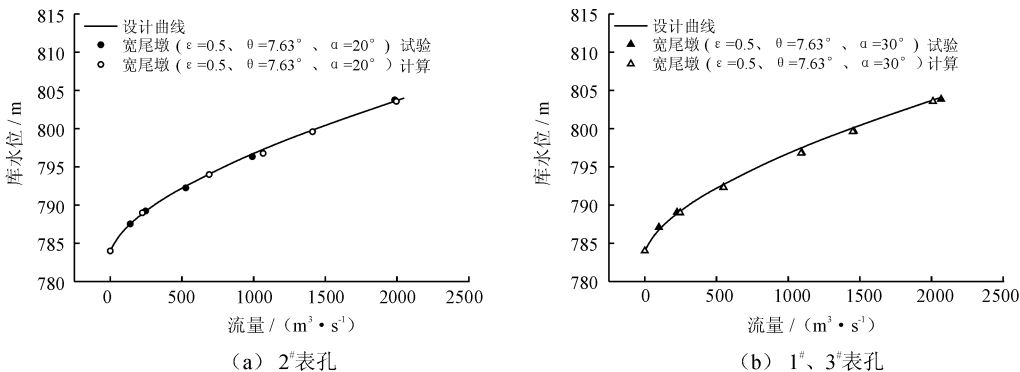


图3 表孔水位-流量关系

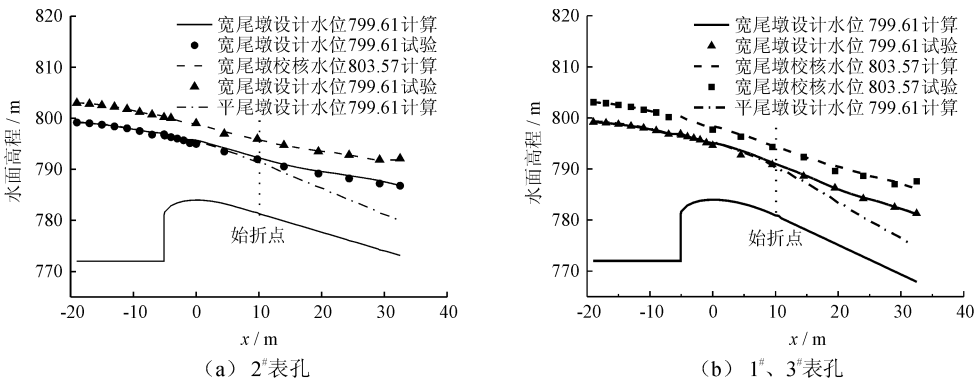


图4 表孔水面线计算值与试验值比较

3.3 水舌挑距及纵向扩散长度

水舌挑距是水垫塘消能设计的重要依据,而宽尾墩收缩式消能工运用于高拱坝时,水垫塘冲击动压和消能率与水舌纵向分散长度密切相关,水舌纵向分散长度越长,横向收缩效果越好,冲击压力减小的越多,消能率越高。表 2 为设计水位 799.61 m 时表孔水舌试验实测值与计算值(包括 3 个表孔体型为平尾墩时的水舌)对比结果。由表 1 对比 2[#]表孔和 1[#]、3[#]表孔挑距可知,随着倾角 α 的增大,出口高程减小,水舌外缘挑距变化不大,但内缘挑距减小,水流纵向长度增加。对比表孔为平尾墩和宽尾墩的计算值可以看出,宽尾墩情况下,水舌内缘挑距有所减小,外缘挑距增

大,水舌纵向长度增大,这与文献[10]的结论是一致的。试验中观察到设计洪水位(堰上水头 15.61 m)下水流主体在下泄过程中仍然存在较大的横向扩散,2[#]表孔水舌纵向长度为 9.7 m,而横向宽度达到 18 m,1[#]、3[#]表孔水舌纵向长度 13.8 m,横向宽度达到 14.2 m,图 5 为 1[#]表孔设计水位单独泄洪流态图。因此可进一步看出初设方案收缩比偏大、墩尾折角 θ 偏小,无法获得较好的水流纵向扩散效果。

3.4 水垫塘时均冲击压强

水垫塘固壁边界动水冲击压强的大小,是水垫塘设计中的最重要指标之一,也是衡量高拱坝坝身泄洪设施消能效果的重要依据。

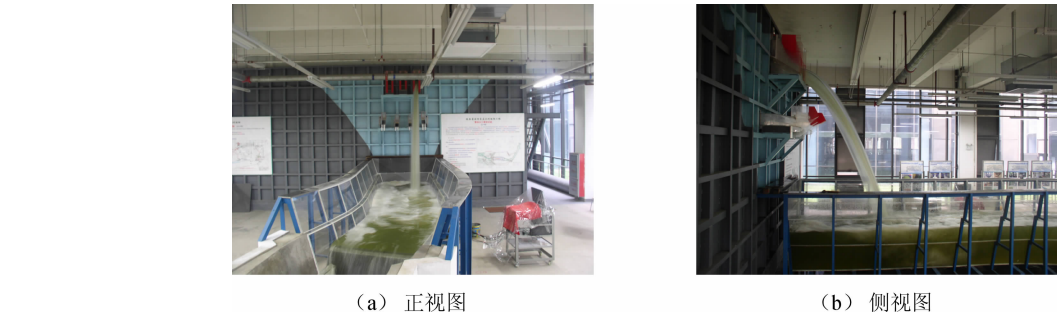


图5 1#表孔下泄水流流态图

表2 设计水位799.61 m表孔水舌相关参数计算值与试验值对比

编号	体型	收缩比 ε	折角 $\theta/^\circ$	俯角 $\alpha/^\circ$	内缘挑距 L_1/m		外缘挑距 L_2/m		纵向长度 L/m	
					计算	试验	计算	试验	计算	试验
2#	平尾墩	1		20	91.8		97.6		5.8	
	宽尾墩	0.5	7.63	20	90.5	91.6	100.2	99.8	9.7	8.2
1#、3#	平尾墩	1		30	88.5		93.7		6.2	
	宽尾墩	0.5	7.63	30	87.6	89	101.4	103.5	13.8	14.5

为测得水垫塘底板动水冲击压强,在水垫塘布置测压孔,基本间距12 cm,水流冲击区加密为6 cm布置。试验中时均压强的测量采用测压管测量,采用如下公式计算^[11]:

$$\frac{\Delta P_{\max}}{\gamma} = \frac{P_{\max}}{\gamma} - h_t$$

式中: $\Delta P_{\max}$ 为水垫塘最大时均冲击动压,kPa; $P_{\max}$ 为最大时均冲击压力,kPa,为测量最大瞬时冲击压力与最小瞬时冲击压力的平均值; h_t 为水舌入水区上游静水区水深,m; γ 为水的容重,9.81 kN/m³。图6为不同工况下表深孔在联合泄洪时水垫塘中心线时均压强试验值分布。

从图6可以看出,4个试验工况下的时均压强总体上的分布规律是相似的,在冲击区出现一个峰值,峰值区出现后向上、下游两侧迅速减小,时均压强最大值位于冲击区下游靠近二道坝附近位置。设计工况和校核工况下,按上述给定公式计算的冲击区最大时均冲击动压分别为1.75×9.81 kPa、4.3×9.81 kPa,对比各工况得出校核工况下 $\Delta P_{\max}$ 最大,且小于15×9.81 kPa的防护标准。

在试验中观察到表孔水舌未能在纵向充分拉开,表孔水舌间隙不足以给中孔水舌让出通道,导致表深孔水舌在空中发生不完全碰撞,水流空中碰撞后发生散裂而成许多水股或水团下落,水垫塘两侧溅水较大,这与表孔宽尾墩采用较大的收缩比、较小的墩尾折角以及深孔挑坎体型为连续坎有关。图7为设计工况表深孔联合泄洪流态图。

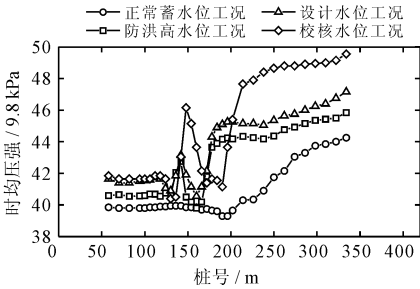


图6 水垫塘底板中心线时均压强分布



(a) 正视图



(b) 侧视图

图7 设计工况表深孔联合泄洪流态图

4 结 语

通过东庄水利枢纽初设方案的整体水工模型试验和表孔宽尾墩三维水流的数值模拟,得出表孔的泄流能力、水面线、水舌挑距和纵向扩散长度、以及水垫塘的时均冲击动压,试验值和计算值基本吻合,结果表明:

(1) 2[#]表孔受宽尾墩的影响,在高水位时泄流能力试验值低于设计值;而 1[#]、3[#]表孔在高水位时泄流能力试验值依然大于设计值,能够满足表孔的泄流能力的设计要求,3 个表孔泄流能力结果对比表明 2[#]表孔出口俯角偏小,高水位时堰的过流能力已经受到一定的影响。

(2) 试验和计算工况内宽尾墩流道水面线在始折点前段与平尾墩降水曲线不同,在始折点至出口段水深比平尾墩水位有所增加,水流垂向扩散效果不太明显,2[#]表孔在校核水位时出口水深超过边墙高度。

(3) 表孔设置宽尾墩后,随着倾角 α 的增大,出口高程减小,水舌外缘挑距变化不大,但内缘挑距减小,水流纵向长度增加水舌内缘挑距有所减小。与平尾墩相比,水舌内缘挑距减小,外缘挑距增大,纵向长度增大,但增加的并不太多,水舌的横向扩散依然较大。

(4) $\Delta P_{\max}$ 在校核水位工况下最大,初设方案宽尾墩体型与深孔联合泄洪时水垫塘最大时均冲击动压分别为 $4.3 \times 9.81 \text{ kPa}$,符合 $\Delta P_{\max} \leq 15 \times 9.81 \text{ kPa}$ 的防护标准。

(5) 表孔水舌未能在纵向充分拉开,表深孔水舌在空中发生不完全碰撞,表明初设方案表孔宽尾

墩体型几何参数不太合理(收缩比偏大、墩尾折角偏小),无法获得较好的水流纵向扩散以及为深孔水舌出流让出通道并获得表深孔无碰撞消能的效果。

参考文献:

- [1] 童显武,李桂芬等. 高水头泄水建筑物收缩式消能工[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.
- [2] 苏 玮. 二滩拱坝表孔、中孔初期运行情况及评价[J]. 水电站设计,2001,17(3):18-19.
- [3] 林秉南,龚振瀛,刘树坤. 收缩式消能工和宽尾墩[A]. 林秉南论文选集[C]. 北京:中国水利水电出版社,2001,1.
- [4] 刘沛清,许唯临. 高拱坝挑跌流非碰撞水垫塘消能形式研究[J]. 水利学报,2010,41(7):841-848.
- [5] 李福田. 宽尾墩技术在高拱坝消能中的应用[D]. 北京:北京航空航天大学,2005.
- [6] 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.
- [7] 李乃稳,许唯临,周茂林,等. 高拱坝坝身表孔和深孔水流无碰撞泄洪消能试验研究[J]. 水利学报,2008,39(8):927-933.
- [8] 倪汉根. 高效消能工[M]. 大连:大连理工大学出版社,2000.
- [9] 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.
- [10] 李乃稳,许唯临,田 忠,等. 高拱坝表孔宽尾墩体型优化试验研究[J]. 水利发电学报,2009,28(3):132-138.
- [11] 杨 敏,崔广涛. 水垫塘底板稳定性控制指标的探讨[J]. 水利学报,2003,34(8):6-10.

(上接第 186 页)

Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press,2007.

- [2] Ntelekos A A, Smith J A, Krajewski W F. Climatological analyses of thunderstorms and flash floods in the Baltimore metropolitan region [J]. Journal of Hydrometeorology, 2007,8(1):88-101.
- [3] 张 丽,宋士强,张艳红. 平原地区城市产汇流计算方法的改进及验证[J]. 人民黄河,2008,30(2):33-34+54.
- [4] 闫江鸿,赵元忠,郑 勇,等. 黄土高原城市产流与降雨关系的研究[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(2):79-82.
- [5] 柏绍光,黄 英,方绍东,等. 昆明城市河道产汇流特性分

析[J]. 水资源研究,2007,28(2):4-6.

- [6] Lhomme J, Bourrier C, Perrin J L. Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments [J]. Journal of Hydrology, 2004,299(3-4):203-216.
- [7] 周建康,朱春龙,罗国平. 平原圩区设计排涝流量与水面率的关系研究[J]. 灌溉排水学报,2004,23(4):64-66+70.
- [8] 高 成,刘 俊,崔 韩,等. 城镇圩区排涝模数计算方法及其与河道调蓄库容关系研究[J]. 灾害学,2008,23(3):7-9.
- [9] 范 瑱,高 成,于凤存,等. 基于蓄水曲线的平原城市排涝模数计算方法及影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(2):102-106.