

旋流环形堰竖井泄洪洞三维流场数值模拟

施春蓉¹, 郭新蕾², 杨开林², 赵林明¹, 夏庆福²

(1. 河北工程大学, 河北 邯郸 056021; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 旋流环形堰竖井泄洪洞是一种新型的环境友好的内消能工, 跟传统环形堰竖井泄洪洞相比, 泄洪洞的流态和消能防蚀机理明显不同。作为一种新型布置形式, 其复杂的水流特性并不是十分清楚。依托于广东清远抽水蓄能电站下水库泄洪洞工程, 基于 RNG $k-\epsilon$ 双方程湍流数学模型, 并结合 VOF (Volume Of Fluid) 方法, 对下库旋流环形堰竖井泄洪洞进口、竖井旋流泄洪洞、出口的复杂水流进行了三维数值模拟, 并对部分水力参数的特性进行了解析计算, 获得了流态、压力、流速、空化数等水力要素的变化规律。模拟结果表明, 数值计算结果与物理模型试验成果吻合较好。并通过数值模拟验证了该新型内消能工的泄流能力和高消能效率。

关键词: 旋流; 内消能工; 环形堰竖井泄洪洞; 潜水起旋墩; 数值模拟

中图分类号: TV 135.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0910-05

Three dimensional numerical simulation of morning glory shaft spillway with swirling flow

SHI Chun Rong¹, GUO Xir Lei², YANG Kai Lin², ZHAO Lir Ming¹, XIA Qing fu²

(1. Hebei University of Engineering, Handan 056021, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The morning glory shaft spillway with swirling flow is a new kind of environmentally friendly inner energy dissipation. Compared with the traditional morning glory shaft spillway, morning glory shaft spillway with swirling flow has obviously different flow pattern, corrosion mechanism, and energy dissipation. As a new type of morning glory shaft spillway, its complex flow characteristics are not illustrated clearly. In this paper, the shaft spillway of Qingyuan pumped storage power station was selected as the study object. Based on the RNG $k-\epsilon$ two equation model for turbulent flow and VOF method, three dimensional turbulent flow in the inlet and outlet of morning glory shaft spillway with swirling flow was simulated. Analytical calculations were performed to characterize some hydraulic parameters. The variation law of flow pattern, pressure, velocity, and cavitation number was obtained. The calculated results were in good agreement with the observed data. The discharge capacity and high efficiency of energy dissipation were verified by the numerical simulation.

Key words: swirling flow; inner energy dissipation; morning glory shaft spillway; submersible blocks of spiral flow generator; numerical simulation

我国西北西南大型水电工程多位于高山峡谷地区, 水头高, 泄量大, 坝身不能承担全部泄洪任务, 特别是日益兴建的面板堆石坝, 常在岸边修建泄洪洞。作为电站枢纽泄水建筑物防蚀消能设施的核心, 传统泄洪洞消能率不高, 流速大, 出口雾化严重^[1]。考虑到目前水电工程对生态环境的影响已成为衡量工程可行性的制约指标, 一种趋势是把泄水建筑物的消能任务从洞外转移到洞内, 除了满足基本的泄量要求, 还要兼顾防空蚀、保护生态和减少投资的目的。生态环境友好型的洞内旋流消能工能够实现一洞多用, 并且消能率高,

已成为当前泄洪消能领域一个重要的研究热点和方向。

迄今为止, 国内外有关旋流内消能工水力特性的研究成果主要集中在旋流竖井式或竖井一旋流式(也称水平旋流式)^[2-6]。董兴林等^[7]通过长期系统研究, 提出了一种新型的内消能工一旋流环形堰竖井泄洪洞, 该新型体脱胎于传统的环形堰竖井泄洪洞, 但在整个泄洪洞水流流态和消能防蚀机理上又另辟蹊径。此类消能工是国内外泄洪消能领域研究的新成果, 其系统的数值模拟尚未发现有文献报道。考虑到该体型泄洪洞在进口结构体型上发生了很大变化, 且环形

收稿日期: 2014-11-15 修回日期: 2015-07-12 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2030.009.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展规划“973”项目(2013CB036405); 中国水利水电科学研究院专项基金(水集 1313)

作者简介: 施春蓉(1987-), 女(壮族), 广西南宁人, 主要从事水利水电工程方面研究。E-mail: SCR825@163.com

通讯作者: 郭新蕾(1980-), 男, 湖北十堰人, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事水力学方面研究。E-mail: guoxinlei@163.com

堰进口和竖井局部有关水力学参数难以量测,采用传统的模型试验方法较难揭示其复杂的水流特性,因此开展新体型下的水流数值模拟和特性分析深化研究是很有必要的。本文的目的是结合清远抽水蓄能电站的水工模型试验,对下库新型旋流环堰竖井泄洪洞进行三维流场数值模拟,分析各水力要素的变化规律,并与实测结果进行对比,为进一步明晰新型环堰竖井泄洪洞各部分水流特性提供依据。

1 工程背景

清远抽水蓄能电站位于广东省清远市,与广州直线距离为 75 km。电站装机总量 1 280 MW,最高净水头 502.7 m。上水库、下水库、输水系统、地下厂房洞室内群等组成枢纽建筑物。2009 年中国水利水电科学研究院水力学所对其上、下库竖井泄洪洞的体型优化及防蚀和消能方式进行了一系列水工物理模型试验,提出一种带有旋流起旋墩的新型旋流环堰竖井泄洪洞,使环堰和竖井都能产生稳定的空腔旋流和离心力,消除产生空蚀的负压根源,避免在竖井上增设环堰掺气坎及其配套的通气管道系统。目前该新体型泄洪洞研究成果已应用到广东清远抽水蓄能电站的竖井泄洪洞设计和施工中。新型泄洪洞由进水口潜水起旋墩、环形堰、竖井、洞内集水消力墩、水垫塘、顶压板、出水消力池和海漫斜面台阶组成^[8-9](图 1)。

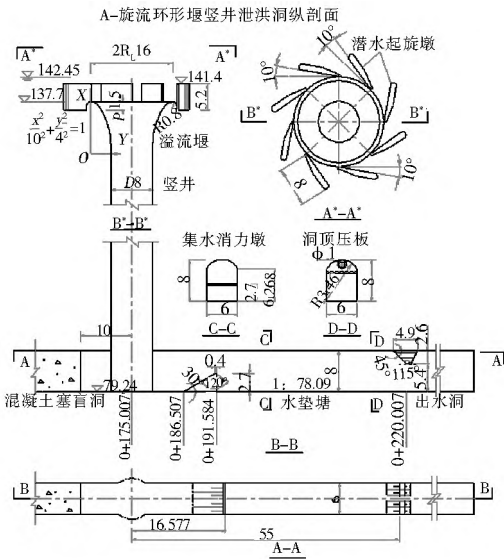


图 1 清远下库泄洪洞水工模型试验及推荐方案(单位: m)
Fig. 1 Model test and recommended scheme of shaft spillway in Qingyuan lower reservoir (unit: m)

本文根据模型试验所推荐的下库泄洪洞体型,建立包括旋流环堰竖井泄洪洞进水口、竖井、泄洪洞内辅助消能工等在内的整体模型网格,主要针对水库水位为 142.45 m,即 5 000 年一遇洪水工况进行数值模拟研究。计算时坐标原点位置设在竖井与导流洞相交断面中心往下 10 m 高程处,桩号为 0+ 175.007 m, X 轴取为沿出水洞方向,且向下游方向为正向; Z 轴取为沿竖井方向,且沿竖井向上为负向。部分区域采用非结构网格来剖分,对重点部位进行加密处理,其计算离散区域和部分三维体积模型见图 2。

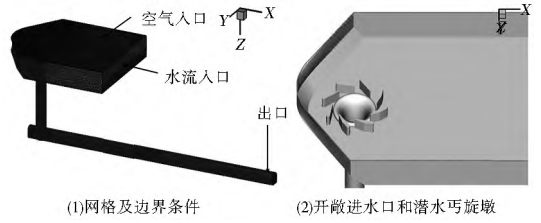


图 2 计算区域三维体积模型

Fig. 2 Three dimensional volume model of the calculation area

2 数学模型

2.1 控制方程

在湍流数学模型中, RNG $k-\epsilon$ 模型适用性广泛,能够模拟平均流动中的旋转及旋流运动情况。考虑到旋流环堰竖井泄洪洞竖井内的水流流动,是从竖井中的空腔掺气的旋流运动,转变为出水洞内带有自由表面的明流流动,本文采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,并结合自由水面追踪技术(VOF 法)对清远下库泄洪洞体型进行三维数值模拟。数学模型控制方程如下:

$$\text{连续方程} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

k, ϵ 方程分别为

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

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

表 1 模型中的常数

Tab. 1 Constants in the model

C_μ	$G_{2\epsilon}$	$G_{1\epsilon}$	σ_k	σ_ϵ
0.084 5	1.68	$1.42 - \eta(1 - \eta/\eta_0)/(1 + \beta\eta^3)$	1.393	1.393

注: $\eta = (2E_{ij} \cdot E_{ij})^{1/2} k / \epsilon E_{ij} = 0.5(\partial u_i / \partial x_j + \partial u_j / \partial x_i)$; $\eta_0 = 4.377$; $\beta = 0.12$

以上各表达式中, ρ 为体积分数平均密度; μ 为分子黏性系数; t 为时间变量; u_i 和 x_i 分别为流速分量和坐标分量; P 为修正压力; 模型中各通用常数取值见表 1; μ_t 为湍流黏性系数, 具体表示为

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

VOF 法^[10] 适于计算两种或两种以上不能互相掺混的流体流动, 它主要通过求解单独的动量方程和处理穿过区域的每一流体的容积比来模拟不能混合的流态。引入 VOF 方法, 在计算过程中, 一个控制体内将会出现以下三种情况: $\alpha_q = 0$ 表示控制单元内无 q 相流体; $0 < \alpha_q < 1$ 表示控制单元内部分充满 q 相流体; $\alpha_q = 1$ 表示控制单元内充满 q 相流体, 且所有流体的容积分数总和为 1, 即 $\sum \alpha_q = 1$ 。对于水气两相流场, 若 α_q 表示水的容积分数, 则 $1 - \alpha_q$ 为气的容积分数。对水气界面的追踪, 有如下输运方程:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

2.2 算法与边界条件

算法:控制方程的求解采用有限体积法隐格式迭代求解,速度压力耦合采用 PISO 算法。

进口边界:水流入口采用速度入口边界条件。以清远下库泄洪洞为例,对于 5 000 年一遇洪水工况,在最高库水位 142.45 m 时,模型试验所测得对应流量为 521.77 m³/s,由此可知水流入口处的法向速度为 1.04 m/s。空气入口采用压力入口边界条件,其上压力为大气压力值。

出口边界:由于出口水流为自由出流,与大气相通,故水流出口设置为压力出口边界,出口压力为大气压值。

壁面条件:壁面边界条件处理为无滑移边界条件,黏性底层采用标准壁面函数进行处理。

自由水面:所有的自由水面都采用 VOF 方法处理,自由水面均与大气相通。

3 模拟结果及分析

3.1 流态与流速

图 3、图 4 和图 5 分别为竖井内流体迹线图和典型剖面流态、流速图。从图中可以明显看出,由潜水起旋墩产生的旋转流在环形堰和竖井内形成带有空腔的螺旋流运动,环形堰与竖井连接段的空腔逐渐收缩,靠竖井上部空腔直径最小(称空腔咽喉),然后又逐渐扩大(见图 6)。空腔咽喉是控制竖井流量的第一个卡口,5 000 年校核洪水工况,数值模拟所得咽喉的直径约大于竖井直径的 1/3,这与模型试验中观测的咽喉直径 $0.40D \leq d < 0.50D$ 一致(D 为竖井直径)。而后旋流空腔直径沿竖井向下逐渐增加,在竖井的中、下部出现环状水跃,掺混大量空气,形成掺气的水垫层,环状水跃的高程约 107.50~111.50 m,这与模型试验高程 110.20 m 较接近。环状水跃以下竖井为满流流态,在垫层内水、气进行强力的掺混剪切作用消耗大量能量。

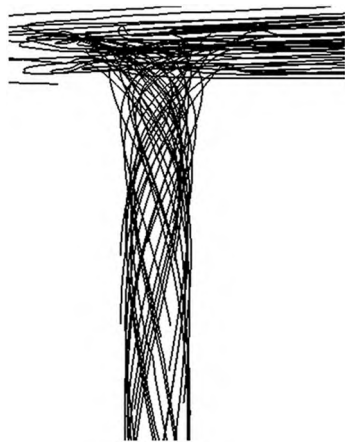


图 3 竖井内流线

Fig. 3 Flow path in the shaft

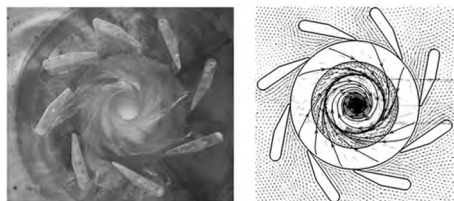


图 4 环形堰流速分布示意图

Fig. 4 Velocity distribution in the inlet of morning glory weir

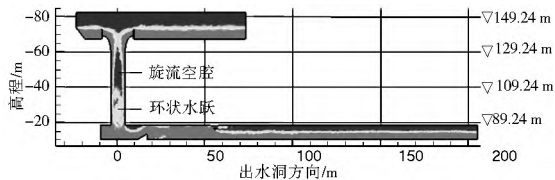


图 5 泄洪洞整体流态

Fig. 5 Flow pattern of the shaft spillway

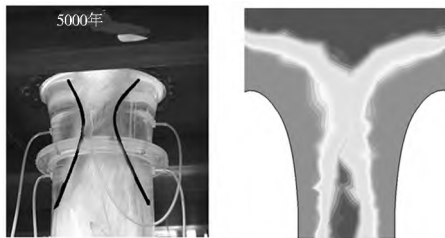


图 6 最小旋流空腔对比

Fig. 6 Flow pattern of the throat

竖井水流经过气水掺混后进入出水洞内,其中少部分水体在盲洞内旋滚消能,大部分水流从集水消力墩顶部高速射入下游水垫塘内进行扩散旋滚消能(见图 8(a))。水流经顶压板时,由于孔口供气充分,使下游立即形成明流流态,水面比较平稳。图 7 为出水洞内部分实测水深与计算所得水深对比图,计算水深值取同一桩号断面的多个计算点的平均值。顶压板下游处水深的实测值与计算值稍有误差,一方面由于水面掺气后波动,实测有误差,另一方面,数值模拟中掺气量的量值很难量化,跟实际未必相符。整体而言,数值模拟的流态和水面线的趋势跟物理模型试验一致性较好,说明数值模拟计算基本能够反映新体型水流的运动特性。

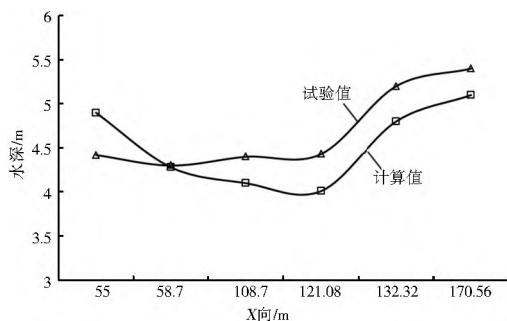


图 7 压板下游水面线对比

Fig. 7 Comparison of calculated and observed downstream water surface

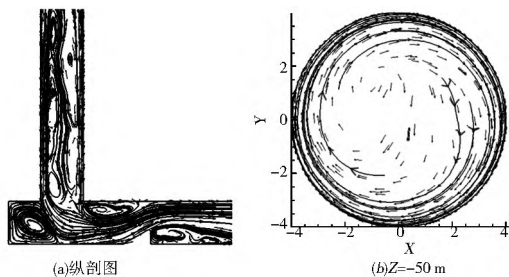


图 8 竖井部分剖面流速矢量图

Fig. 8 Velocity vector in some typical sections of the shaft

图 8 显示了部分剖面的速度矢量图,其中矢量线的长度代表速度的大小。图 8(b) 反应轴向速度的变化趋势,在 $Z = -50$ m 处,轴向速度最大值为 46.45 m/s。数值模拟计

算的出水洞近出口处平均断面流速 15.27 m/s,其计算的消能率为 70.34%,而模型试验的消能率为 71.79%。两者吻合较好。

3.2 泄流能力

数值模拟对 5 000 年一遇洪水工况进行了计算(库水位 142.45 m),计算所得泄洪洞在此水位下的泄流量为 528.97 m³/s。根据旋流环形堰流量系数计算公式如下:^[11]

$$m = Q / 2\pi R_L 2gH^{1.5} \quad (7)$$

式中:Q 为数值模拟计算流量;R_L 为环形堰半径,清远下库泄洪

洞 R_L = 8 m;H 为堰上水头,即: H = 142.45 - 137.70 = 4.75 m。

由式(7)可算得,当库区水位为 142.45 m 时,数值模拟计算得到旋流环形堰流量系数为 0.229,试验值为 0.226,两者相差 0.013%。

3.3 压力分布

5 000 年一遇洪水工况的竖井壁面压力数值计算值与物理模型试验测量值对比见表 2。在同一高程上对称的布置 E、W、S、N 四个测点,分别对应竖井壁面的前、后、左、右四个方向。

表 2 环形堰和竖井各测点压力

Tab. 2 Hydraulic pressure of morning glory weir and shaft

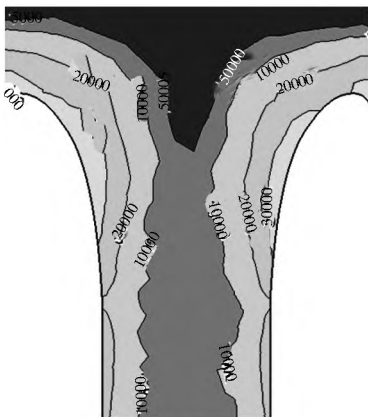
9.81 kPa

测点高程/m	E		W		S		N		平均值	
	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟	实测	模拟
130.90	3.36	3.34	3.36	3.31	3.20	3.57	3.20	3.42	3.33	3.30
127.70	2.72	2.47	2.88	2.64	2.24	2.10	3.20	2.87	2.76	2.52
121.30	1.76	2.03	1.92	2.15	1.76	2.08	1.76	2.05	1.80	2.07
114.90	1.44	1.70	1.76	1.60	0.96	1.67	1.60	1.66	1.44	1.65
108.50	0.96	1.65	1.60	1.84	1.60	1.82	0.96	1.71	1.28	1.75
102.10	3.81	3.94	3.52	3.79	4.48	3.69	3.20	3.14	3.76	3.64
95.70	14.40	9.80	16.60	10.45	12.80	9.64	16.64	12.04	15.11	10.48
89.30	27.20	22.60	28.80	24.01	27.52	23.46	29.44	26.41	28.28	24.12

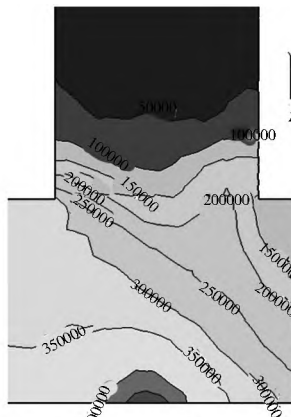
从表 2 的比较可以看到:数值计算值与模型试验测量值比较相近,但数值模拟所得的壁面压强普遍比实测值偏小。竖井高程自上而下,壁面压强迅速减小,直至竖井下部出现环状水跃后压力才有所回升。模型试验中,压力由 3.36 m 降至 0.96 m(在环状水跃高程 108.50 m 处),再向下随着竖井水垫深度的增加压力又回升到 27.20 m(高程 89.30 m),而数值模拟结果同时反映了竖井壁面压力数值先降后升的变化趋势。竖井在各高程皆为正压,没有负压出现,井内利

用离心力消除负压作用效果显著。

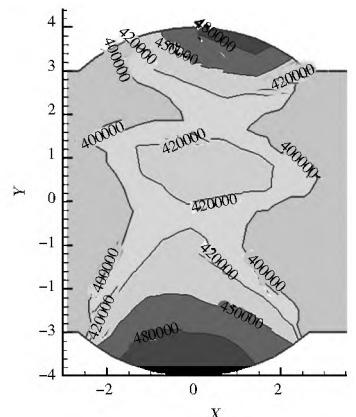
图 9 为典型剖面的压力分布图。图中的数值代表所在位置的压强值(单位:Pa),不同的颜色对应于不同的压强值,颜色越深压强值越大。数值模拟结果表明,竖井的最大压力发生在竖井中心轴线附近的地板上。模型试验测得最大压强为 44.81 × 9.81 kPa,计算值为 48.92 × 9.81 kPa,计算值稍大于试验值。



(a)竖井进口纵剖面



(b)井连接处纵剖面



(c)井底横剖面

图 9 典型剖面的压力分布

Fig. 9 Pressure distribution of typical sections

结合图表分析可知,模拟计算的压强值与实测值相差不大,分布规律比较相似,这也表明基于 RNG k-ε 湍流数学模型来模拟新型环形堰竖井泄洪洞水流特性是可行的,网格划分的精度和密度也是合适的,从工程应用角度来说,旋流泄洪洞的数值模拟可用来验证工程设计^[12]。

3.4 竖井空化数沿程分布

高水头泄水建筑物最大的隐患是泄流的空蚀敏感区。以下将根据数值模拟所得的竖井壁面压力与计算断面所处

高程断面水流的平均流速,计算出计算断面的水流空化数,进而判断该处的抗空蚀能力,其水流空化数 σ 的计算公式如下:

$$\sigma = \frac{H + H_a - H_v}{u_0^2 / 2g} \quad (8)$$

式中:u₀²/2g 为计算断面的平均流速水头;H 为计算断面处的时均动水压力;H_a 为计算断面处的大气压力水柱;H_v 为水的汽化压力水柱,其大小随温度的变化而变化。

大气压力采用清远市当地的大气压力,大小计算公式按下式估算:

$$H_a = 10.33 - \frac{\Delta}{900} \quad (9)$$

式(9)表示相对于海平面,高度增加 900 m,标准大气压力水柱则降低 1 m。 Δ 为计算的出水洞出口尾段海拔高程。由于水的汽化压力对温度相当敏感,此处采用 20 ℃ 水温的值,则 $H_v = 0.24$ m,偏于安全。

图 10 为竖井井身段空化数沿高程的变化图。由图可看出水流空化数相对较大,都在 0.3 以上。空化数较小区域发生在高程 90~115 m 之间。竖井下部发生环状水跃,水流中掺混大量的空气,空化数反而增大,从而降低了井壁发生空蚀破坏的可能性。另外水垫塘的集水墩下游由于水流突然扩散和强力紊动掺混充分掺气,故不易发生空蚀破坏。而顶压板后水流供气充分,且水流已完全脱离洞顶,不会发生空蚀。

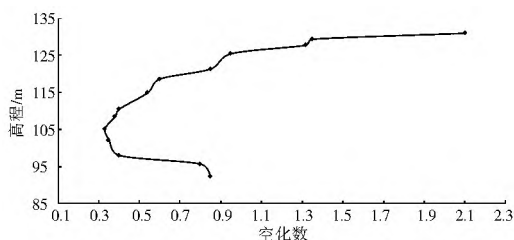


图 10 竖井空化数沿程分布

Fig. 10 Cavitation number distribution of the shaft

4 结论

采用三维 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型模拟了旋流环形堰竖井泄洪洞的三维流场,并结合物理模型试验进行了对比验证分析,得出以下结论。

(1) 从流速流态、自由水面、泄流能力、消能率及竖井壁面空化数、压力等要素变化规律来看,模拟计算值与试验值的变化规律基本一致,量值上也接近,表明数值模拟能够用来系统地深入研究新型环流形堰竖井泄洪洞的水力特性。

(2) 基于旋流机理设计的旋流环形堰竖井泄洪洞在环形堰和竖井内均能形成带有空腔的稳定的轴对称螺旋流,且整体结构简单,消能率高。

(3) 旋流环形堰竖井泄洪洞是一种简单有效的消除负压、掺气防蚀和提高消能率的水工泄水建筑物,是典型的生态环境友好的消能技术,具有良好的推广应用价值。

需要指出,本文数值模拟在平洞掺气水深及洞顶余幅的模拟方面仍不够理想,下一步需要借助其他手段进一步完善。

参考文献(References):

[1] 樊晶晶,王海军,毛舒娅,等.平板闸门小开度闸后水流特性数值模拟[J].南水北调与水利科技,2012,10(29):124-128. (FAN Jingjing, WANG Haijun, MAO Shuyua, et al. Numerical simulation of flow characteristics of sluice gate with small opening [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(29): 124-128. (in Chinese))

[2] 张晓东,刘之平,高季章,等.竖井旋流式泄洪洞数值模拟[J].水利学报,2003(8):58-63. (ZHANG Xiaodong, LIU Zhiping, GAO Jizhang, et al. 3-D numerical simulation of flow in shaft spillway with whirling current [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003 (8): 58-63. (in Chinese))

[3] 邓军,许唯临,雷军,等.高水头岸边泄洪洞水力特性的数值模拟[J].水利学报,2005,36(10):1209-1212. (DENG Jun, XU Weilin, LEI Jun, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of high head spillway tunnel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(10): 1209-1212. (in Chinese))

[4] 沙海飞,吴时强,陈振文.泄洪洞整体三维紊流数值模拟[J].水科学进展,2006,17(4):507-511. (SHA Haifei, WU Shiqiang, CHEN Zhenwen. 3D numerical simulation for spillway tunnel [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 507-511. (in Chinese))

[5] 杨朝晖,吴守荣,余挺,等.竖井旋流泄洪洞三维数值模拟研究[J].四川大学学报,2007,30(3):41-45. (YANG Zhaohui, WU Shourong, YU Ting, et al. Numerical simulation of silo discharge tunnel with whirling currents [J]. Journal of Sichuan University, 2007, 30(3): 41-45. (in Chinese))

[6] 付波,牛争鸣,李国栋,等.竖井进流水平旋转内消能泄洪洞水力特性的数值模拟[J].水动力学研究与进展,2009,3(2):164-171. (FU Bo, NIU Zhengming, LI Guodong, et al. Numerical simulation of level swirling flow of inner energy dissipation discharge tunnel with shaft inlet [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 3(2): 164-171. (in Chinese))

[7] 杨开林,董兴林,郭新蕾,等.广东清远抽水蓄能电站上、下水库竖井泄洪洞实验研究报告[R].中国水利水电科学研究院,2010. (YANG KaiLin, DONG Xinglin, GUO Xirlei, et al. Experimental study on Shaft spillway of the upper and lower reservoirs for Qingyuan Pumped Storage power station in Guangdong province [R]. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010. (in Chinese))

[8] 董兴林,杨开林,郭新蕾,等.水利工程自调节起旋堰泄洪防蚀消能新技术研究[R].中国水利水电科学研究院,广东省水利电力勘测设计研究院,2009. (DONG Xinglin, YANG KaiLin, GUO Xirlei, et al. A new technique of energy dissipation and anti cavitation for flood discharge with self regulation spiral flow [R]. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Guangdong Provincial Investigation Design and Research Institute of Water, 2009. (in Chinese))

[9] 董兴林,杨开林,郭新蕾,等.旋流喇叭形竖井泄洪洞水力学机理及应用[J].水利学报,2011,42(1):14-18. (DONG Xinglin, YANG KaiLin, GUO Xirlei, et al. Hydraulic mechanism and application of swirling device in morning glory shaft spillway [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(1): 14-18. (in Chinese))

[10] 王福军.计算流体动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004. (WANG Fuzhun. Computational Fluid Dynamics Analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))

[11] 董兴林.旋流泄水建筑物[M].郑州:黄河水利出版社,2011. (DONG Xinglin. Spillway with Swirling Flow [M]. Zhengzhou: The Yellow River Conservancy press, 2011. (in Chinese))

[12] 曹双利,牛争鸣,付波,等.竖井进流水平旋转内消能泄洪洞的数值模拟[J].西安理工大学学报,2009,25(3):263-269. (Numerical Simulation of Level Swirling Flow of Inner Energy Dissipation Discharge Tunnel with Shaft Inlet [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(3): 263-269. (in Chinese))