

带掺气槽岸边溢洪道挑流消能工水力特性

张挺^{1,2}, 许唯临², 伍超²

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065)

摘要 采用 RNG $k-\epsilon$ 双方程紊流模型对掺气槽、差动式挑流鼻坎和预挖坑联合运行的岸边溢洪道水流流场进行研究, 模拟了具有大曲率水气交界面的挑射水舌和掺气坎水流, 分析讨论泄槽流态、掺气槽底板最大冲击压力和差动式挑坎压力分布, 给出了挑射水舌以及预挖坑的水流结构与速度分布特性, 并将计算值与实验值进行对比, 两者吻合良好。研究表明: 泄槽中 4 道掺气槽的设置能有效减免发生空蚀破坏, 但对泄槽中水面有一定的影响。高扩散低收缩差动式挑流鼻坎与预挖坑的联合运用消能效果理想。

关键词 岸边溢洪道 掺气槽 差动式挑流鼻坎 紊流模型

中图分类号 TV651.1; TV135 **文献标识码** A **文章编号** 1006-7647(2011)02-0028-06

Numerical simulation on hydraulics of lateral spillways with aeration slots and hybrid type flip buckets//ZHANG Ting^{1,2}, XU Wei-lin², WU Chao² (1. College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The RNG $k-\epsilon$ two-equation turbulent model was employed to study the flow fields of a lateral spillway under combined operation of aeration slots; hybrid type flip buckets and stilling pools. The jets with highly irregular hydropneumatic interfaces and the flows of aeration slots were simulated. The flow patterns in the slot, the largest impact pressure on the slot bottom and the distribution of pressure on the bucket were analyzed. The characteristics of the structure and velocity distribution of the jets and the flows were given. The calculated values were compared with the experimental ones, and they agreed with each other. The results indicate that four aeration slots in the spillway can efficiently avoid the cavitation erosion though they have some influence on their water surfaces. The dissipation effect of the hybrid type flip buckets with the stilling pool is satisfactory.

Key words: lateral spillway; aeration slot; hybrid type flip bucket; turbulent model

水利水电工程高水头大单宽泄水建筑物(如岸边溢洪道、溢流坝等)的过流表面经常遭受空蚀破坏, 近年来国内外广泛采用掺气槽使水流底部掺气的办法来防止空蚀发生^[1-3]。泄槽中的高速水流通过设置在泄槽末端的差动式挑流鼻坎消能形式, 利用水舌离开鼻坎时上下分散, 在空中消耗部分能量, 射流进入下游预挖坑后通过不同程度的舒张变形和紊动掺混削减大量能量。这种利用掺气槽减蚀、差动式挑流鼻坎消能的泄洪形式, 其水流流场具有明显的三维特性, 在解决单宽流量较大的水电工程泄洪消能关键性技术难题上取得了良好的效果。

掺气设施体型优化是设计中的重要问题, 由于掺气机理复杂, 对通气量等问题理论上研究尚不完

善, 目前有不少有关掺气槽的理论研究和试验成果^[4-8]。由于差动式挑流鼻坎分层水舌流场紊动和水气混掺剧烈, 流态相当复杂, 现有的测试手段很难详细了解内部的水流结构和紊动强度, 而数值模拟技术则能弥补物理模型测试手段的不足, 能够得到详细的全域流场水力特性, 如特征流速及其分布、紊动能分布、时均压强分布等, 且易于改变体型参数并不受模型缩尺的影响, 已成为研究水力学问题的一种重要途径。许唯临等^[9]、戴光清等^[10]、陈永灿等^[11]、杨忠超等^[12]对水垫塘内水流的流动特性进行了数值模拟和消能分析, 得到很多有益的结论。董延超等^[13]对泄槽内的水流特性进行了三维数值模拟, 对挑射水舌的空间运动和扩散特性的数值模拟

也有不少的研究成果^[14-17]。目前,对于高扩散低收缩差动式挑流消能工的三维数值模拟还很少,对掺气槽、差动式挑流鼻坎和预挖坑三者联合运行的水流特性和消能特征的研究也罕见报道。笔者结合实际工程应用,对高水头大单宽岸边溢洪道的三维流场进行研究,以探求其内部水流结构和紊动特性,为工程设计提供一定的参考依据。

1 研究对象及模拟区域

本文的计算实例是某水电站岸边溢洪道,最大泄洪水头为 116.15 m,设计水位为 165.87 m,对应的堰顶单宽流量约为 154 m³/(s·m);校核水位为 169.15 m,对应的堰顶单宽流量约为 199 m³/(s·m)。溢洪道全长约为 1 500 m,主要由引水渠、溢流堰、陡槽、挑流鼻坎和出水渠组成,引水渠底部高程为 142.00 m,溢流堰的堰顶高程为 148.00 m,堰顶剖面为 WES 曲线剖面,泄流陡槽段沿程共设 4 道掺气槽,其中 2~4 号掺气槽体型相同,见图 1。掺气槽结构设计,通过试验挑选出具有合理空腔负压、空腔长度的坎槽作为优选方案,经过反复的试验、研究,提出了合理的掺气坎槽结构形式和掺气减蚀措施。挑流鼻坎采用高扩散、低收缩差动形式,高坎顺水流扩散,坎顶高程为 60.87 m,低坎顺水流收缩,坎顶高程为 54.58 m。在高坎侧面布置了 1 个直径为 0.3 m 的通气孔,见图 2。原溢洪道共有 6 个溢流孔,每孔净宽 12.0 m,闸墩宽度为 3.0 m,为了了解溢洪道及挑流鼻坎全域流场的三维特性,模拟区域(宽 42 m,长 1 000 m,高 156 m)取靠左岸的 3 个孔进行模拟,模拟区域立体图见图 3(坐标原点取在溢流堰堰顶处)。

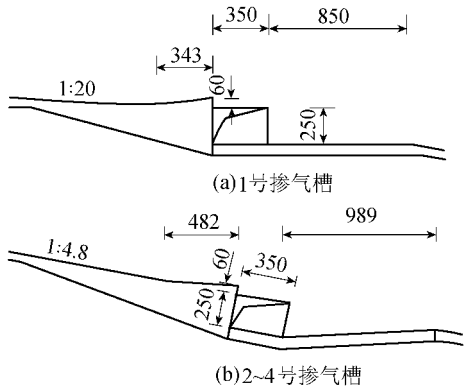
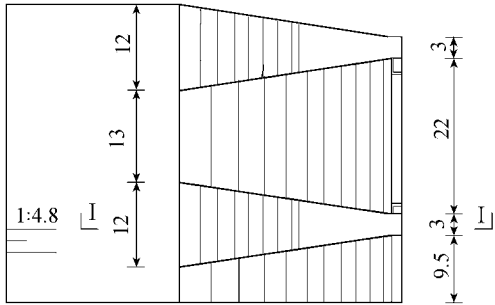


图 1 掺气槽体型(单位:cm)

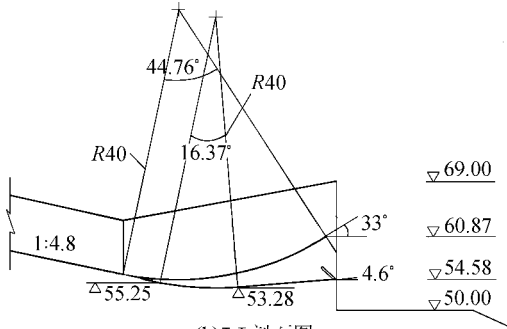
2 数值模拟

2.1 控制方程

本研究数学模型采用 RNG $k-\epsilon$ 双方程紊流模型,它是基于重整化群的理论提出来的^[18],由于 RNG $k-\epsilon$ 模型考虑了应变率的影响,间接改进了对



(a) 平面图



(b) I-I 剖面图

图 2 挑流鼻坎体型(单位:m)

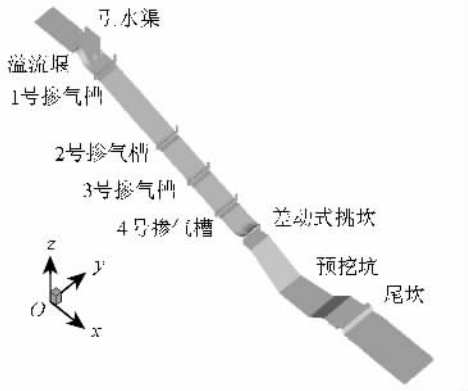


图 3 模拟计算区

耗散率方程的模拟,在一定程度上考虑了紊流的各向异性效应,从而对空化流动模拟的适应性较强,且计算精度较高^[19]。经改进其控制方程与标准 $k-\epsilon$ 模型形式相同:

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

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

k 方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中： u_i 为 x_i 方向的速度分量 ($i, j = 1, 2, 3$)； ρ 为体积分平均密度； P 为考虑重力后的压力项； μ_t 为体积分平均的分子黏性系数； μ_t 为紊流黏性系数， $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ ，其中 k 为紊动能， ϵ 为紊动耗散率， C_μ 为模型常数， $C_\mu = 0.085$ ； G 为由平均速度梯度引起的紊动能产生项， $G = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ ； $C_{2\epsilon}$ ， α_k 和 α_ϵ 为模型常数， $C_{2\epsilon} = 1.68$ ， $\alpha_k = \alpha_\epsilon = 1.39$ 。

上述模型与标准 $k-\epsilon$ 模型的主要差别在于 $C_{1\epsilon}$ 不再是常数，而是表示为 η (紊流时间尺度与平均应变率之比) 的函数，即

$$C_{1\epsilon} = 1.42 - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (5)$$

其中

$$\eta = \frac{S k}{\epsilon} \quad S = \sqrt{2 S_{ij}^2}$$
$$\eta_0 = 4.38 \quad \beta = 0.015$$

2.2 计算方法

采用有限控制体积法来离散计算区域，然后在每个控制体积中对微分方程进行积分，再把积分方程线性化，得到各未知变量的代数方程组，最后求解方程组即可求出各未知变量。本文所研究的差动式挑流鼻坎岸边溢洪道流场属瞬态问题，且计算区域网格数达 80 多万个，存储信息量也很大，针对这样的问题 PISO 算法有明显的优势，因此采用 PISO 算法对压力和速度场进行耦合计算。采用 VOF 方法对水气交界面进行模拟。

2.3 边界条件设定

计算区域上游边界对于给定工况其引水渠中水位是恒定的，根据流量和水深得到入口的平均速度，采用速度入口边界；出口边界试验资料采用水位~流量关系控制，本计算模拟的出口边界根据试验资料设定；上表面取 $\bar{P} = P_a$ ， P_a 为大气压；对于黏性底层采用壁函数来处理。

3 计算结果及分析

3.1 大曲率水气交界面模拟及水流流态

溢洪道是该水电站枢纽的主要泄水建筑物，属高水头大单宽泄流量的岸边溢洪道。图 4 给出了模拟得到的设计工况溢洪道中的水流流态，可以明显地看到，由于原设计方案闸墩尾部体型采用矩形出

口断面，相邻溢流孔的出闸水流在闸墩后相互交汇并形成水翅，出闸室水流流态紊乱，且受到掺气槽的影响，溢洪道泄槽内水流表面高低起伏并不平整，横向分布不均匀，存在菱形冲击波，水面横向高差最高可达 2 m 多。

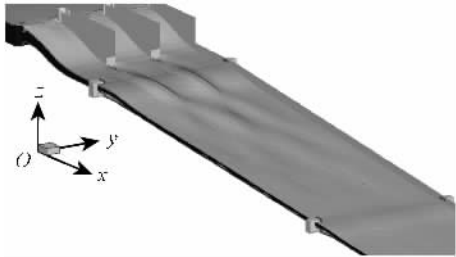


图 4 溢洪道水流流态

泄槽中的高速水流通过设置在泄槽末端的差动式挑流鼻坎消能形式，利用水舌离开鼻坎时上下分散，以加大各股水舌与空气的接触面积，增强紊动、掺气和扩散，在空中消耗部分能量。图 5 为设计工况高扩散、低收缩挑流鼻坎挑射水舌纵剖面水气两相图 (图中水相浓度表示的是水气两相流中的相对浓度，无量纲)。由图 5 可见，出挑坎后水流水气掺混剧烈，并在水舌上下表面形成 2 个大曲率的水气交界面，属典型的水气两相流动。高坎采用顺水流方向扩散形式，使出坎水舌沿横向扩散更加充分，减少了出坎单宽流量；低坎采用顺水流方向收缩形式，急流通过收缩边壁时形成冲击波，导致垂向各质点的速度具有不同的倾角，其趋势为越接近自由表面倾角越大。水流出收缩段后各质点继续沿不同方向运动，由于流速的垂向分量远大于横向分量，故水舌的垂向扩展比横向扩散更充分，高低坎水舌在空中裂散掺气，水舌呈乳白色絮状。掺气水舌进入预挖坑水垫后形成明显的旋滚，水流流态紊乱，由于塘内流速进一步减弱，水流在桩号 $x = 650.00 \text{ m}$ 后已渐变为清水，水面波动不大，水流较为平稳，出塘平均

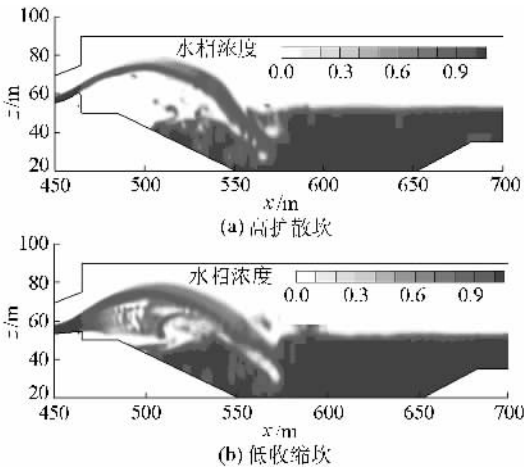


图 5 高扩散、低收缩挑流鼻坎挑射水舌纵剖面水气两相图

流速已降至 3.5 m/s,消能效果理想。水流在出预留坎位置水面下降,预留坎顶部出流流速约为 8.0 m/s。

3.2 流速分布

图 6 给出了控制堰与泄槽中沿程断面垂向流速分布。由图 6 可见水流流速沿程逐渐增加,出闸(桩号 $x = 41.71\text{ m}$ 处)水流流速约为 20 m/s,至挑流鼻坎反弧起点处(桩号 $x = 433.56\text{ m}$ 处)流速达到约 35 m/s。泄槽中水流流速均很大,为高速水流,因此在溢洪道中设置掺气减蚀设施是必要的。图 6 中还给出了试验测量数据,可见数值模拟结果与试验结果吻合良好。

图 7 为 1 号和 2 号掺气槽纵剖面流速矢量图。由图 7 可以看出掺气槽均能形成完整的掺气空腔,掺气空腔中的气体形成了明显的旋滚,掺气空腔能沿横向左贯通,掺气效果良好。其中 1 号掺气槽中的水体砸落在底板上后,有回潮现象存在,但并不影响掺气空腔的存在,还是保持连续贯通。

挑射水舌及预挖坑中水流流速分布见图 8。根据挑射水舌抛射、碰撞及落入预挖坑的水流形态变化过程,将挑流鼻坎后的水流流动过程分成 4 个主要流速区:挑射水舌主流上挑区(Ⅰ区),水舌空中扩散掺气区(Ⅱ区),水舌下落散裂掺气区(Ⅲ区)和水舌入水区(Ⅳ区)。其中,Ⅰ区主流出挑流速约为 36 m/s,至Ⅱ区水流速度逐渐减小至 28 ~ 30 m/s,水舌在空中沿程向纵向逐渐扩散,但水体散裂不明显;在Ⅲ区中水舌流速降低至最小,从图 8 中可以明显看出挑射水舌最低流速并不在水舌最高点处,而是在最高点下游不远处,水体开始明显散裂扩散,然

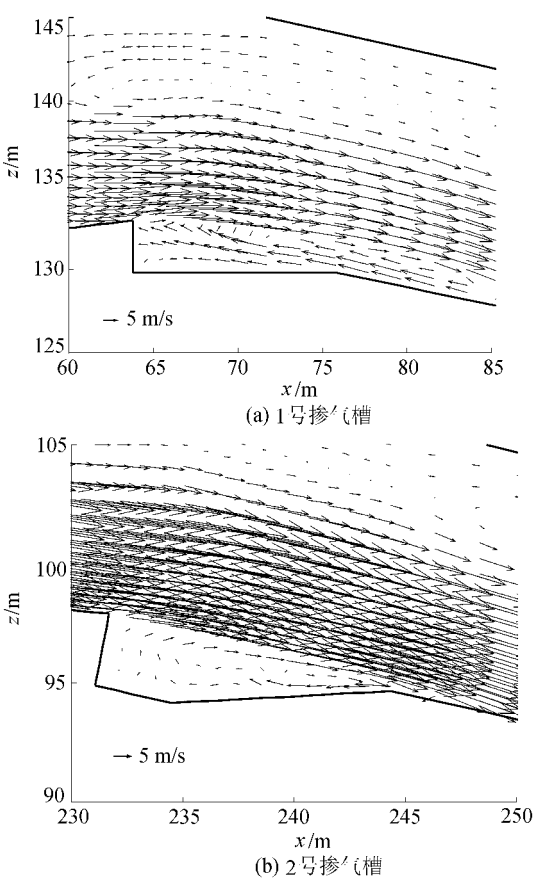


图 7 掺气槽纵剖面流速矢量

后水体在重力作用下流速逐渐增加,水舌入水前流速约为 32 m/s,至Ⅳ区,水舌受预挖坑中水垫作用,流速迅速减小。预挖坑的选型和设计是在吸取国内已建工程的实测资料、分析研究冲刷区的工程地质条件、对冲刷的稳定性进行评价后得到的。预挖坑流速区可分为水舌入水处的紊动掺混区、预挖坑内

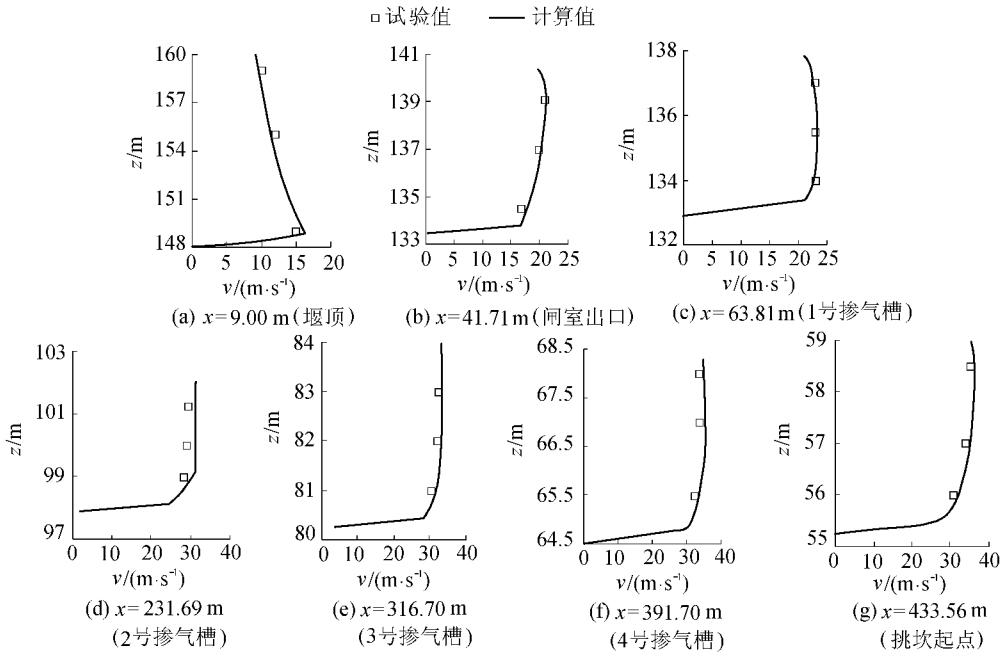


图 6 泄槽沿程断面垂向流速分布

低速区及尾坎顶附近的流面区。

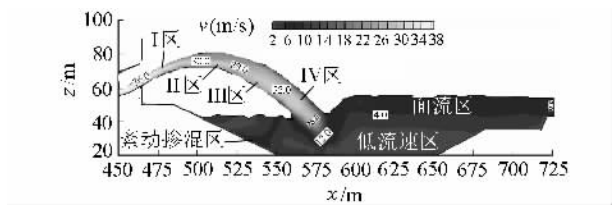


图 8 挑射水舌及预挖坑纵剖面流速等值线 ($y = 22\text{ m}$)

3.3 压力分布

上游水位为 160.00 m 和 165.87 m 2 种工况下控制堰的堰面压力分布见图 9。其中上游水位 160.00 m 时堰顶单宽流量为 $75\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ ，可见 2 种工况下控制堰堰面均未出现负压。上游水位为 160.00 m 时堰面最小压力出现在桩号 $x = 17.50\text{ m}$ 附近，约为 $1.2 \times 9.81\text{ kPa}$ ；上游水位为 165.87 m 时堰面最小压力出现在桩号 $x = 13.5\text{ m}$ 附近，约为 $0.6 \times 9.81\text{ kPa}$ 。计算结果表明堰面体型尺寸及布置合理可行。图中同时给出了模型试验数据，可见两者吻合良好，2 种工况下控制堰堰面压力分布趋势一致。

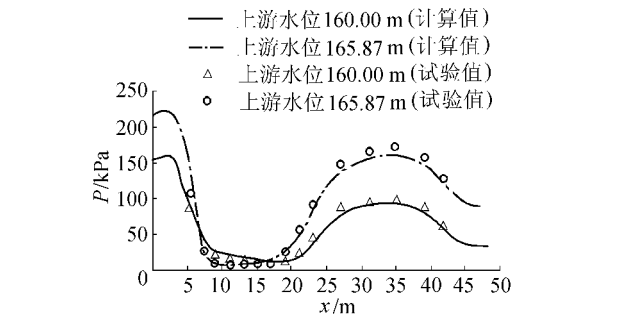


图 9 控制堰堰面压力分布

4 个掺气槽底板最大冲击压力数值模拟结果与试验数据对比列于表 1 中。由表 1 可见水流冲击点位置吻合良好，最大相对误差为 -2.3% 。掺气坎后水流回落对泄槽底板的最大冲击压力数值模拟结果与模型试验值误差相对大一些，特别是 4 号掺气槽，计算值为 $9.94 \times 9.81\text{ kPa}$ ，而模型试验值仅为 $6.02 \times 9.81\text{ kPa}$ ，相对误差达到 39.4% ，分析认为 4 号掺气槽掺气挑坎后水流回落对泄槽底板冲击压力试验值减小的原因是由于 4 号掺气槽后堰面掺气浓度很大，气泡较多，特别是至挑流鼻坎高低坎交界部位附近掺气浓度更大，同样的情况从数值模拟结果也可明显地看出来，因此模型试验中若采用测压管来测压强可能会因水流底部掺气的原因而存在一定的误差。

大量工程实践表明，在高速水流作用下差动式齿坎侧面是发生空蚀的常见部位。图 10 给出了高坎和低坎中心线压力分布计算结果和试验情况对比情况，可见数值模拟结果与试验结果吻合良好，挑坎

表 1 掺气槽底板最大冲击压力计算值与试验值对比

掺气槽	冲击压力			桩号		
	试验值/ 9.81 kPa	计算值/ 9.81 kPa	相对 误差/%	试验值/ m	计算值/ m	相对 误差/%
1 号	9.56	10.18	6.1	089.52	087.56	-2.2
2 号	10.24	11.06	7.4	254.16	252.20	-1.2
3 号	7.88	8.43	6.5	348.97	341.14	-2.3
4 号	6.02	9.94	39.4	420.04	420.04	0.0

壁面压力分布均匀、平顺，水流受低坎收缩的作用，低坎的压力普遍比高坎的大，低坎在桩号 $x = 446.00\text{ m}$ 附近出现最大压力（约为 $22.2 \times 9.81\text{ kPa}$ ），高坎在桩号 $x = 442.00\text{ m}$ 附近出现最大压力，约为 $18.3 \times 9.81\text{ kPa}$ ，且高坎侧面均为正压，说明挑坎体型及坎壁通气孔的设计合理。

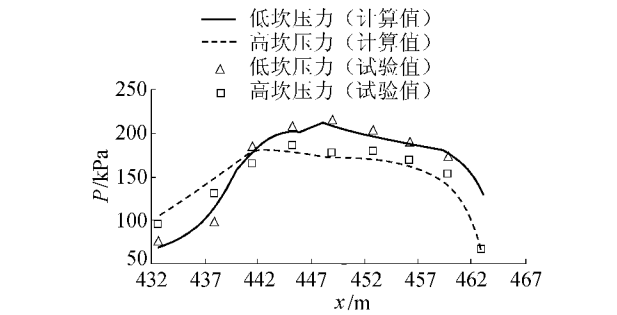


图 10 挑流鼻坎堰面压力计算结果与试验数据对比

4 结 语

a. 采用 RNG $k-\epsilon$ 双方程紊流模型对带掺气槽的高水头岸边溢洪道水流流场进行三维数值模拟，将计算值与试验数据进行了对比，两者吻合良好，表明本文所采用的方法是有效可行的。因此，在进行体型优化过程中，可以采用数值模拟的方法对体型进行初选。

b. 分析讨论了泄槽水流流态、掺气槽底板最大冲击压力和差动式挑坎压力分布，结果表明 泄槽中 4 道掺气槽的设置的高低坎水流底部形成掺气带，能有效减免空蚀破坏，但对泄槽中的水面有一定的影响，高扩散、低收缩差动式挑流鼻坎与预挖坑的联合运用消能效果理想。

c. 给出了挑射水舌以及预挖坑的水流结构与速度分布特性，挑流鼻坎后水流流动形成几个主要流速区 挑射水舌主流上挑区、水舌空中扩散掺气区、水舌下落散裂掺气区和水舌入水区。

参考文献：

[1] 邓正湖,王善达,袁正强. 乌江渡水电站滑雪式溢洪道掺气减蚀措施的研究与应用[J]. 水力发电,1981(12): 26-31.

[2] VOLKART P, CHERVET A. Air slots for flow aeration[J]. Mitteilungen der Versuchsanstalt fuer Wasserbau, Hydrologie

- und Glaziologie, Eidgenoessischen Tech,1983(66) 71.
- [3] KELLS J A, SMITH C D. Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1991, 18(3) 358-377.
- [4] 杨永森, 陈长植, 于琪洋. 掺气槽上射流挟气量的数学模型 [J]. 水利学报, 1996, 27(3) 13-21.
- [5] 杨永森, 杨永全. 掺气减蚀设施体型优化研究 [J]. 水科学进展, 2000, 11(2) 144-147.
- [6] RUTSCHMANN P, VOLKART P. Spillway chute aeration [J]. International Water Power and Dam Construction, 1988, 40(1) 10-15.
- [7] RUTSCHMANN P, HAGER W H. Design and performance of spillway chute aerators [J]. International Water Power and Dam Construction, 1990, 42(1) 36-42.
- [8] 时启燧, 潘水波, 邵嫒嫒, 等. 通气减蚀挑坎水力学问题的试验研究 [J]. 水利学报, 1983, 14(3) 1-13.
- [9] 许唯临, 廖华胜, 杨永全, 等. 水垫塘三维紊流数值模拟及消能分析 [J]. 水动力学研究与进展, 1996, 11(5) 561-569.
- [10] 戴光清, 杨永全, 吴持恭. 水垫塘多层淹没射流数值模拟及消能研究 [J]. 水利学报, 1996, 27(1) 13-19.
- [11] 陈永灿, 许协庆. 挑流冲坑内水流特性的数值模拟 [J]. 水利学报, 1993, 24(4) 48-54.
- [12] 杨忠超, 邓军, 杨永全, 等. 多层淹没射流数值模拟研究 [J]. 水利学报, 2004, 35(5) 31-37.
- [13] 董延超, 郭维东, 魏长勇, 等. 陡槽式溢洪道三维流场数值计算分析 [J]. 人民长江, 2006, 37(4) 69-71.
- [14] 刘士和, 段红东. 挑流水舌运动数值模拟 [J]. 武汉大学学报 工学版, 2004, 37(6) 1-4.
- [15] LIU Shi-he, YE Qing. Numerical simulation of 3-D aerated jet behind flip bucket of overflow dam [J]. Journal of Hydrodynamics, 2000, 12(1) 49-56.
- [16] 余挺, 邓军, 夏勇, 等. 翻卷水舌鼻坎挑流的紊流数值模拟 [J]. 水利水电技术, 2005, 36(5) 37-39.
- [17] 沙海飞, 周辉, 陈惠玲. 坝身泄水孔窄缝消能工三维水动力特性数值模拟 [J]. 水利学报, 2006, 37(5) 625-629.
- [18] CHARLES S G, THOMAS G B, NEASSAN F. An analysis of RNG base turbulent models for homogeneous shear flow [J]. Phys Fluids, 1991, 3(9) 2278-2281.
- [19] 钱忠东, 黄社华. 四种湍流模型对空化流动模拟的比较 [J]. 水科学进展, 2006, 17(2) 43-47, 53.

(收稿日期 2010-08-02 编辑 高建群)

(上接第 10 页)

弯道宽度以及弯道水流 Fr 有关。在图 1 的弯道水流, 大约 $Fr = 3.8$, 根据式 (9) 可以算出当 $Fr = 3.8$ 时, 其不出现露底的最小半径与弯道宽度之比为 $r_0/b = 13.94$, 而该试验中 $r_0/b = 6.02$, 因此推断会产生露底现象。

3 露底公式的检验与讨论

笔者查阅了多种关于弯道露底的试验和研究, 其中比较有代表的是田嘉宁^[8]在研究急流弯道露底时得出的结论: 当 $Fr > 3$, $r_0/b < 10$ 时和当 $Fr > 4$, $r_0/b < 15$ 时以及当 $Fr > 5$, $r_0/b < 20$ 时会出现露底现象, 设计时应该注意。笔者根据式 (9) 算出露底的界线为当 $Fr = 3$, $r_0/b = 8.5$ 时和当 $Fr = 4$, $r_0/b = 15.5$ 时以及当 $Fr = 5$, $r_0/b = 24.5$ 时会出现露底现象, 与田嘉宁试验结果相比基本吻合。

当然, 从式 (9) 可以看出水流的露底现象主要与流速、水深以及弯道的相对半径有关, 但是并不是达到上面条件就会产生露底现象, 笔者认为除了上面的关系外, 还与弯道的水流位置有关系, 也就是与弯道转角有关。根据笔者理论, 当转弯角度小于 β ($\beta = \arccos \frac{r_1}{r_2}$) 时, 弯道水流还没达到最大超高, 如果在临界条件下, 也不会产生露底。另外, 如果弯道边墙比较低 (低于 $2h_1$) 时, 就会产生水流溢出现象, 在小南海溢洪道模型试验中也出现了这种情况。

4 结 论

急流弯道露底现象比较复杂, 本文在前人的基

础上得出了急流弯道 Fr 与弯道半径和弯道宽度的关系。与其他人的试验结果大致吻合。急流弯道露底与多种因素有关, 运用时一定要考虑实际情况。一般说来, 由于急流弯道露底时水流运动比较剧烈, 因此在工程中必须加以治理。根据水流特性, 笔者建议采用斜槛法进行控制^[10-11]。

参考文献:

- [1] 赵小娥, 钟杰, 刘兴年, 等. U 形弯道建闸对水流运动特性的影响试验 [J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(3) 47-49.
- [2] ELLIS J. Numerical analysis of Kielder dam spillway [J]. Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists, 1985, 39(3) 254-270.
- [3] WILLI H. Infinitesimal cross-wave analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 110(8) 1145-1150.
- [4] IPPEN A T. 高速水流论文译丛 急流力学 [M]. 萧世泽, 译. 北京: 科学出版社, 1958 667-701.
- [5] 李建中, 宁利中. 高速水力学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994 182.
- [6] ROGER H, WILLI H. Supercritical bend flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(3) 208-218.
- [7] SL253-2000 溢洪道设计规范 [S].
- [8] 田嘉宁. 中等半径大偏转角弯道的水流特性 [J]. 西安理工大学学报, 2002, 16(1) 28-32.
- [9] 周勤, 伍超, 赵元弘, 等. S 型溢洪道水流特性试验与数值模拟研究 [J]. 水力发电学报, 2005, 24(6) 78-82.
- [10] 吴宇峰, 伍超, 李静. 斜槛在急流弯道控制超高的设计研究 [J]. 水力发电学报, 2007, 26(3) 77-81.
- [11] 陈鑫荪. 消除泄水建筑物弯道急流冲击波的措施 [J]. 水利水电技术, 1984(6) 32-36.

(收稿日期 2010-04-15 编辑 方宇彤)