

不同墩型溢流坝水动力特性研究

王志东¹, 汪德²

(1. 江苏科技大学船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 利用有限体积法对不同墩型溢流坝三维流场进行了数值模拟, 并将数值模拟结果与试验结果进行了对比, 同时还讨论了不同墩型对水面线形状、坝面压力、流量系数以及不同墩厚闸宽比对坝面压力的影响。结果表明, 不同墩型对墩前水面线及流量系数的影响是不同的, 随着墩厚闸宽比的减小, 坝面压力会逐渐降低, 负压极值点将向前移动。

关键词 闸墩; 溢流坝; 水面线; 坝面压力; 流量系数

中图分类号 TV135 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)04-0391-04

溢流坝水力设计对整个水利工程建设具有重要意义, 而闸墩形式和布置对溢流坝流量系数、自由水面线的形状和位置、坝面压力等参数将产生重要影响。这些参数主要通过水力学模型试验或经验公式获得。但模型试验不仅会耗费大量人力、物力和财力, 而且会因测量条件的限制不能给出整个流场区域的全部信息; 经验公式给出的结果误差偏大。随着计算技术的迅速发展, 求解溢流坝过坝水流的数值计算方法相继产生, 如有限差分法、边界元法^[1]、有限元法^[2,3]、边界拟合曲线坐标变换法^[4]等。但由于闸墩的存在而使得整个溢流坝流场变得异常复杂, 其数值计算也较为困难。因此, 过坝水流的研究主要集中在二维流场的计算上^[5~7]。虽然二维计算结果能用于工程初步设计, 但将二维数学模型用于实际溢流坝过坝水流的计算还有一定差距。因此, 本文利用有限体积法对带闸墩的溢流坝三维粘流场进行计算, 以探讨不同墩型与布置形式下溢流坝的水动力特性。

1 数学模型

1.1 控制方程

不可压缩流体湍流流动问题, 其运动控制方程为^[8]

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

式中: t ——时间; u_i , u_j 和 x_i , x_j ——速度分量和坐标分量; f_i ——质量力; ν ——运动粘性系数; ν_t ——涡体粘性系数, $\nu_t = c_\mu k^2 / \epsilon$ (k 为湍流动能, ϵ 为湍动能耗散率, c_μ 为常数)。

在数值计算过程中, 用 RNG $k-\epsilon$ 模型模拟湍流流动。RNG $k-\epsilon$ 模型与标准 $k-\epsilon$ 模型的主要不同之处在于模型系数的确定方法, 标准 $k-\epsilon$ 模型系数根据经验给定, 而 RNG $k-\epsilon$ 模型系数由理论计算得出。此外, Yakhot 等^[9]认为 RNG $k-\epsilon$ 模型不采用壁面率就可直接积分到壁面。而文献 [10] 则认为, 若采用 RNG $k-\epsilon$ 模型直接积分到壁面, 必须在壁面附近划分足够细的网格, 这必然会增加计算工作量, 尤其在三维工程湍流计算中, 巨大的网格数量往往是难以接受的。因此, 类似于文献 [10] 的做法, 本文采用考虑壁面率的 RNG $k-\epsilon$ 模型, 并将 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型推广应用于三维湍流模拟中。

1.2 计算区域及网格划分

溢流坝面曲线选用文献 [11] 中的三圆弧 WES 曲线 $X^{1.85} = 2.0H_d^{0.85}Y$, 坝高 $H = 76.2$ m, 设计水头 $H_d = 9.14$ m。选用的闸墩形式如图 1 所示。其中墩长为 $1.77H_d$, 墩厚分别为 $0.267H_d$ 和 $0.20H_d$, 墩厚与闸宽之比 t/b 分别为 0.14、0.2、0.5。流场计算区域如图 2 所示。

为保证计算精度, 将整个计算区域划分为 3 个子区后再进行网格划分, 如图 3 所示。由于闸墩区域边界

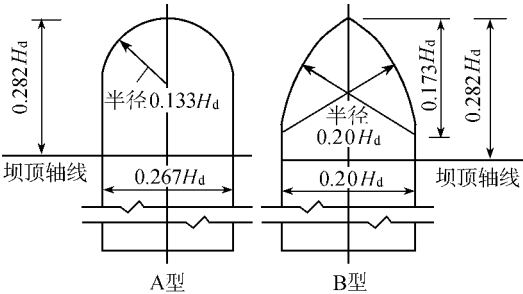


图 1 闸墩形式

Fig.1 Pier pattern

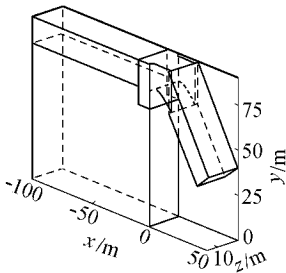


图 2 溢流坝流场计算区域

Fig.2 Domain of calculation of flow field around overflow dam

变形剧烈,故该区采用非结构网格.而Ⅱ区处于自由表面区,为提高自由面的模拟精度,也进行了网格加密.3个区域的网格数目分别为 27 375,13 600,70 500,整个计算区域约 11 万个网格节点.闸墩区网格划分如图 4 所示.

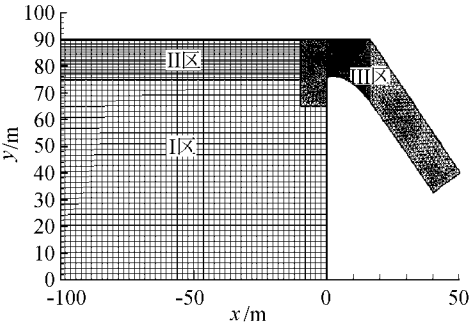


图 3 含闸墩溢流坝流场网格的分区分划

Fig.3 Grids for flow field around overflow dam with piers

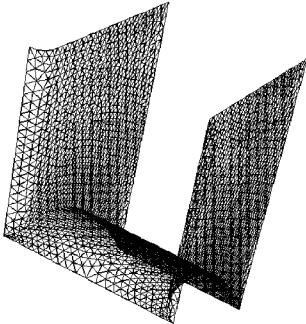


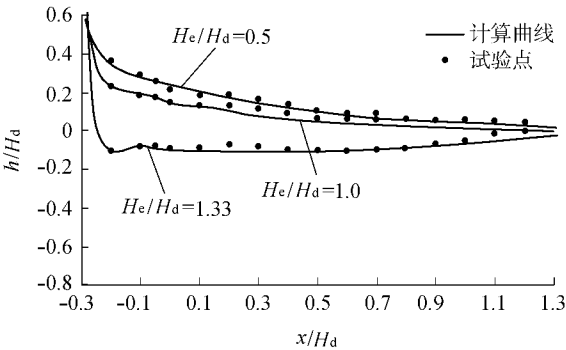
图 4 坝面及闸墩区的网格划分

Fig.4 Grids for dam surface and pier regions

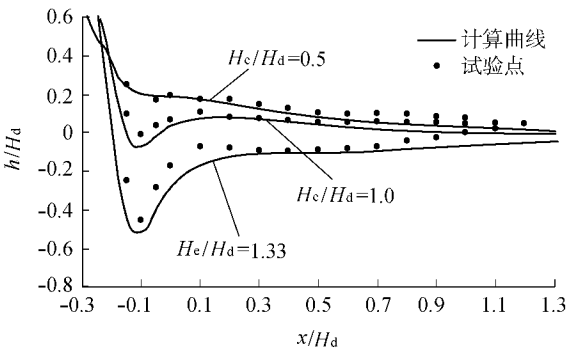
2 计算结果及分析

2.1 计算模型的验证

为检验计算模型的可靠性,对 B 型闸墩在 $t/b = 0.2$ 时 3 种不同水头下的坝面压力进行了计算,并与文献 [11] 的试验结果做了对比,如图 5 所示.由图 5 可以看出:沿闸孔中心线坝面压力的计算结果与试验值非常一致,只是坝顶水头 $H_e/H_d = 1.0$ 时坝顶后段计算值偏低,但坝面最小压力值的大小与出现位置均与试验结果吻合;沿闸墩的坝面压力,总的趋势是计算值略低于试验值,并且随着水头的增大,其偏差量相应地增大. $H_e/H_d = 1.0, 1.33$ 两种情况下沿闸墩的坝面最小负压出现位置与试验结果一致,均在坝顶前 $0.1H_d$ 处.



(a) 沿孔中心



(b) 沿墩面

图 5 B 型墩坝面压力分布

Fig.5 Pressure distribution on dam surface of type-B pier

2.2 墩型对水面线的影响

为比较 A 型墩和 B 型墩对水面线位置的影响,图 6 中给出了墩厚与闸宽之比等于 0.2 时沿两种墩型表面的水面线位置计算结果.显然 A 型墩使墩前水面产生更高的抬升,这主要是由于 A 型墩和 B 型墩首部线型不同引起的.此外,两种墩型对闸孔中心处水面线的位置影响不大,如图 7 所示.

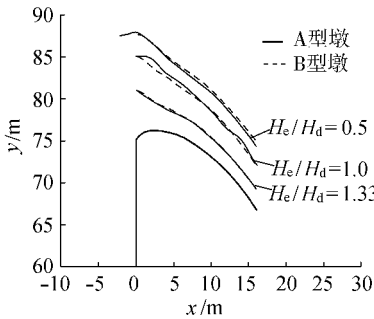


图 6 沿 A 型墩及 B 型墩表面的水面线
Fig.6 Flow profile along surface of type-A and type-B piers

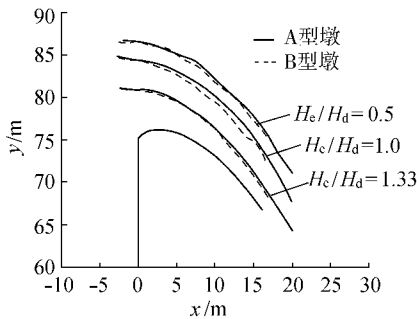


图 7 沿 A 型墩及 B 型墩孔中心的自由水面线
Fig.7 Flow profile along centerline of holes of type-A and type-B piers

2.3 墩型对流量系数的影响

流量系数的大小关系到工程泄洪规模和具体布置,因此,准确地确定流量系数至关重要.流量系数随工程体型而变,对溢流坝三维流场来说,其流态和边界条件都比较复杂,在一般手册中难以找到准确的数据.因此,本文通过数值计算给出了墩厚闸宽比 $t/b = 0.2$ 时 A 型墩和 B 型墩在 3 种水头下的流量系数(见图 8).显然,B 型墩具有更大的流量系数.

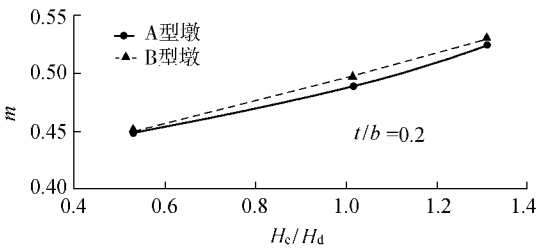
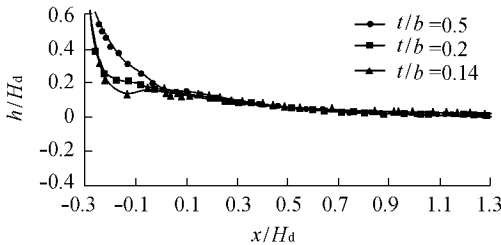


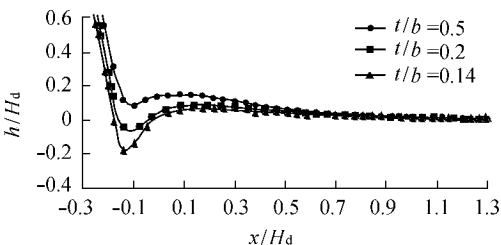
图 8 有闸墩影响的流量系数
Fig.8 Flux coefficient with the influence of pier

2.4 墩厚闸宽比对坝面压力的影响

除坝型和闸墩形式会对坝面压力等产生较大影响外,闸墩布置形式对坝面压力的影响更为显著.因此,为了考察闸墩布置对坝面压力等的影响,针对 B 型闸墩,在给定初值 $H_c/H_d = 1.0$ 时计算了墩厚 t 与闸宽 b 之比 $t/b = 0.14, 0.2, 0.5$ 3 种情况下的坝面压力分布.计算结果对应的实际水头与设计水头之比分别为 0.97, 1.01, 1.02.图 9 给出了沿闸孔中心线和沿闸墩的坝面压力分布.由图 9 可知,不同布置形式对坝顶前坝面压力的影响较大,随着墩厚闸宽比的减小,坝面压力逐渐降低,并且闸墩表面上的负压极值点的位置会向前移动.



(a) 沿孔中心



(b) 沿墩面

图 9 墩厚闸宽比对坝面压力的影响

Fig.9 Influence of ratio of pier thickness to gate width on pressure on dam surface

3 结 论

a. 应用溢流坝和闸墩三维整体模型对三维过坝水流粘流场进行了数值计算,并采用分区网格系统处理了复杂的几何边界.

b. 针对文中给出的 A 型墩和 B 型墩, 计算分析了闸墩形式对水面线形状、坝面压力、流量系数等的影响, 并与试验结果做了对比. 结果表明: 本文所建立的模型能够比较准确地给出过坝水流的水面线位置及坝面压力; A 型墩使墩前水面产生更高的抬升, 但对孔中心的水面线位置影响不大, 而 B 型墩具有更大的流量系数. 随着墩厚闸宽比的减小, 坝面压力逐渐降低, 且负压极值点向前移动.

参考文献:

- [1] 邱秀云, 杨晓英. 过堰溢流的边界元方法数值解[J]. 八一农学院学报, 1994 (1): 64—69.
- [2] 郑邦民. 溢流体型的数值模拟[J]. 中国科学 A 辑, 1985 (3): 20—23.
- [3] 丁道扬. 一种数值解过坝水流方法[J]. 力学学报, 1985 (4): 36—41.
- [4] 齐里, 陈肇和. 过堰溢流的边界拟合坐标变换数值解[J]. 水利学报, 1988 (3): 15—22.
- [5] 魏文礼. 泄水建筑物反弧紊流数值计算及抗蚀体型研究[D]. 南京: 河海大学, 1996.
- [6] 王奇峰. 溢流反弧紊流流动数值模拟[J]. 水利学报, 1993 (8): 1—9.
- [7] 谭仁忠, 王世夏. 有闸墩的溢流坝过坝水流数学模型[J]. 水利学报, 1988 (8): 40—44.
- [8] FERZIGER J H, PERIC M. Computational methods for fluid dynamics[M]. Berlin: Springer, 1996. 149—208.
- [9] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence[J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1): 3—5.
- [10] 蒋莉, 王少平, 沈孟育. 应用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模式模拟 90° 弯曲槽道内的湍流流动[J]. 水动力学研究与进展, 1998 (1): 8—13.
- [11] 美国陆军工程兵团. 水力设计准则[M]. 王诒昭译. 北京: 科学出版社, 1982. 46—76.

Investigation of hydrodynamic characteristics of overflow dam with different types of piers

WANG Zhi-dong¹, WANG De-guan²

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University
of Science and Technology, Zhengjiang 212003, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: Numerical simulation was performed of 3-D flow fields around the overflow dam with different types of piers by use of the finite volume method. The turbulence was simulated with RNG $k-\epsilon$ turbulence models, and the flow profiles were derived by the VOF method. The calculated results were in good agreement with the experimental data. The analysis of the influences of the pier types on the form of flow profiles, pressure on dam surface and flux coefficient and the influence of the ratio of pier thickness to gate width on the pressure on dam surface shows that the piers of different types have different influences on the flux coefficient and the flow profile at front of piers, and that the pressure on dam surface gradually decreases with the ratio of pier thickness to gate width, and with the decrease of the pressure, the extreme point of negative pressure moves ahead.

Key words: pier; overflow dam; water surface profile; pressure on dam surface; flux coefficient