

水闸消能防冲的数值模拟

韩才冬¹ 王雪丰²

(1.上海市水务工程设计研究院 上海 200063

2.上海市堤防(泵闸)设施管理处 上海 200050)

摘 要 本文结合长兴岛创建水闸工程设计实例,采用 K-ε 紊流模型和体积率(VOF)跟踪自由水面的方法,模拟了闸后消能防冲水流结构。将消能防冲的数值模拟结果,包括自由表面位置和水跃长度,与工程设计计算进行了对比分析,验证了工程设计的合理性和科学性。

关键词 消能防冲 紊流模型 自由水面

Numerical simulation of energy dissipation and scour protection in stiller of sluice

Han Caidong¹ Wang Xuefeng²

(1.Shanghai Water Conservancy Engineering Design Institute, Shanghai, 200063;

2.Shanghai Administration of Dyke and Sluice, Shanghai, 200050)

Abstract Combining with the design example of Chuang jian sluice in Changxing island, the method of VOF and K-ε turbulence model was used to simulate flow structure in stiller of sluice in this paper. The results of numerical simulation including free surface location and the length of hydraulic jump were presented and compared with engineering design and calculation, they proved that the engineering design was rational and scientific.

Key words energy dissipation and scour protection turbulence model free water surface

1 前言

消能防冲设计是水闸设计的重要组成部分,为了确保消力池具有稳定的消能效率,工程设计应保证水跃发生在消力池内,因此消力池的长度与水跃的长度密切相关。闸后消能防冲的水流现象往往难以求解,常需要进行物理模型试验。随着计算机和计算技术的发展,数学模型在水流计算中发挥了越来越大的作用,尤其用有限差分法建立数学模型,因其结构格式简单、编程容易、计算量较小、对计算机要求不高、误差估计及稳定性分析在数学上较为成熟等原因,而得到了较广泛的应用。

2 基本方程及边界条件

2.1 控制方程

在笛卡尔直角坐标系下,水流的控制方程由连续方程和动量方程组成。

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

$$\text{动量方程 } \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\gamma_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

采用标准 K-ε 紊流模型封闭紊动粘性系数,需求解如下形式的 K 方程和 ε 方程:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\gamma_j}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \gamma_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \zeta \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\gamma_j}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$\gamma_i = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

式中:P 为 K 方程中的剪应力产生项。模型中的

5 个常数采用标准常数值。

2.2 自由表面的处理

设 $F=F(x, y, t)$ 为流体体积率函数, 按照流体的物理性质定义: 当流场空间为气体时, $F=0.0$, 为液体时 $F=1.0$, 它随流体质点一起运动, 是没有质量和黏性的着色点的运动, 在气体与液体的交界面 $F_\varepsilon(0,1)$, 考虑到固体边界的影响, 其控制方程为:

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

方程(6)与流体动力方程协同求解, 用 $F(x,y,t)$ 不断更新流场点的密度分布, 由此可显示水气混掺与纯水区及水面线。

2.3 方程的离散

方程的离散采用交错网格的有限差分法, 将压强 P 、 K 、 ε 、 F 置于控制中心, U 、 V 、 W 控制体与压强控制体交错布置, 对流-扩散项的离散采用幂函数法。在速度场离散中, 源项不包含压力项。

在水气交界面处, 由于物理性质的不连续性, 在计算中易产生数值扩散, 为此在方程(6)的离散中, 采用迎风差分格式。在计算中, 控制时间步长为:

$$\Delta t < \min \left\{ \left[\frac{\partial x_i}{\partial U_{ijk}} \right], \left[\frac{\delta Y_i}{V_{ijk}} \right], \left[\frac{\delta Z_k}{W_{ijk}} \right] \right\} \quad (7)$$

2.4 边界条件及初始条件

自由表面边界条件: 其运动学条件即控制方程(6), 动力学条件为零压力条件。速度、 K 及 ε 采用零梯度条件。固体壁面: 速度、 K 及 ε 均采用壁面函数法确定其在边界上的值; 压力为静压假定。入流边界: 给定速度、 K 、 ε 及压力分布。出流边界: 将出流边界取在水流平顺的远区, 边界条件可提为零梯度条件。

初始条件: 闸门两侧水体初始流速均为零, 水面水平, 压力为静水压。

3 应用实例

3.1 工程概况

创建水闸位于长兴岛西北部原潘石与石头沙堵泓大坝处, 上游承接创建港和创洪河, 是岛上主要控制口门之一, 具有挡潮、排涝、引水灌溉、航运、水资源调度等功能, 受益面积近 2 万亩。

水闸具有双向过流功能, 因此闸首内外连接段均布置消能防冲设施。根据消能计算, 内河侧消力池深 0.5m, 长 14.0m, 扩散角 8.13° , 底板厚 0.8m; 外河侧消力池深 0.8m, 长 14.0m, 扩散角 8.0° , 底板厚为 0.9m, 消力池池底与闸首底板间以 1:4 的斜坡连接, 并在闸首出口设 0.5m 宽的水平段。

本文应用上述数值模型对该水闸引水工况进行消能防冲水流的数值模拟。闸门简化为平面闸门, 外河水位 3.30m, 内河侧水位 1.70m, 闸门上游长度 13.5m, 下游水平长度分别为 4.0m, 斜段 3.2m, 水平长度 9m, 齿坎 0.5m。闸前平均流速 1.3m/s, 闸门开度 0.5m。

3.2 工程设计

消力池长度按公式(8)和公式(9)进行计算, 计算简图如图 1:

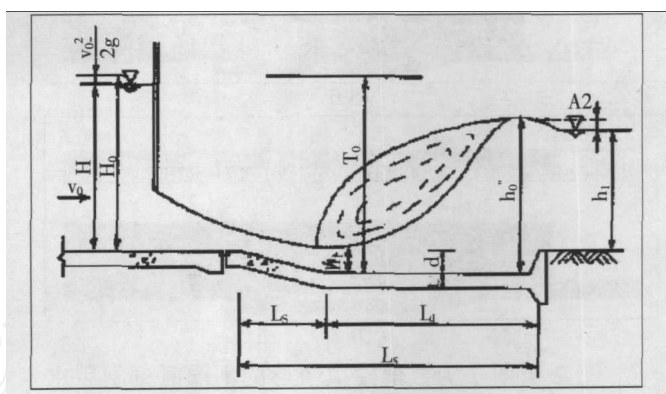


图 1 计算简图

$$L_{sj} = L_s + \beta L_j \quad (8)$$

$$L_j = 6.9(h_c'' - h_c) \quad (9)$$

式中 L_{sj} —消力池长度(m);

L_s —消力池斜坡段水平投影长度(m);

β —水跃长度校正系数, 可采用 0.7~0.8;

L_j —水跃长度(m)。

经过计算: 采用外河水位 3.3m 及内河水位 1.7m 引水工况, 计算消力池长度为 13.6m。

3.3 数值模拟分析

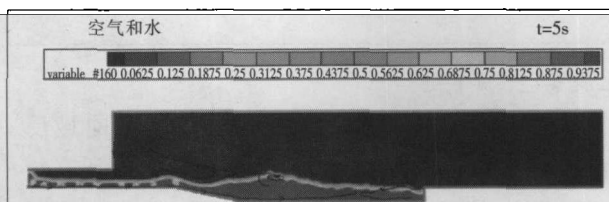


图 2

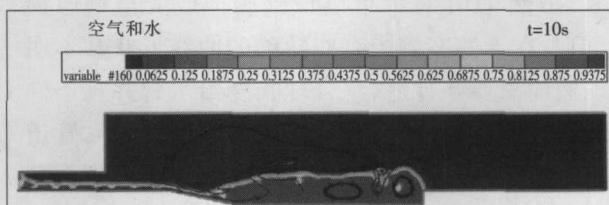


图 3

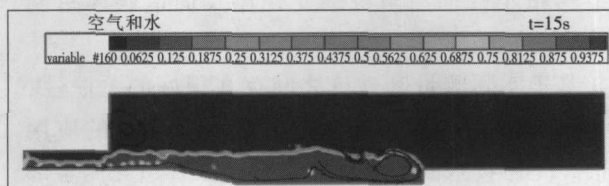


图 4

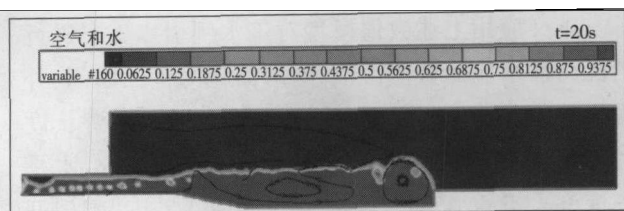


图 5

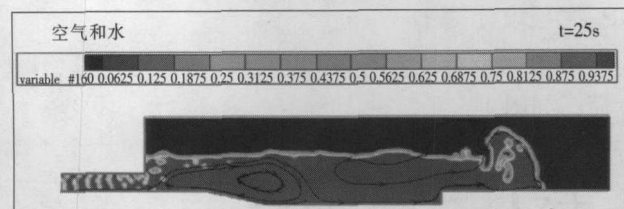


图 6

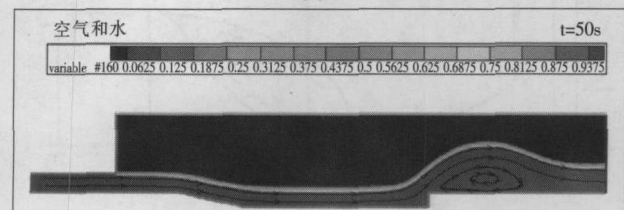


图 7

图 2 至图 7 为数值模拟情形的不同时刻闸后水流状态和流线分布。由模拟情况可以看出,该水闸闸后底流式消能过程主要发生在前 25s 过程,25s 后液面开始趋于稳定,50s 后自由液面已经很平稳。该工况下水闸闸后形成淹没水跃,从 5s 至 25s 闸后水位逐渐涌高,旋滚流从消力池后部向前部移动;同时,从上方空气流线看出水面上的空气流动也形成了旋滚流状态。当翻滚流跃过消力池的后部齿坎,水流表面及上部的空气流开始趋于稳定,流线也渐趋于均匀分布。从整个模拟过程中可以看出,水跃的内部都有掺气,且整个水跃的过程均发生在消力池内部。

(上接第 21 页)

坪石邨测试证实,即使在干燥环境下,时域反射技术也可以检测到给水管上的小孔(而在最高信山测试中,钻孔引起漏水,潮湿环境导致电势下跌)。虽然 TDR 技术可以识别腐蚀或管道壁厚损失,但是在上述案例中有些缺陷的曲线形状却不明显。然而只要条件适合(合理长度给水管并且条件连续,而不是在短距离管道上条件不断变化),管道壁厚的测量结果是可靠的并与理论相吻合。坪石邨的分阶段测试结果很能说明问题,它们显示了在管道上移植小孔前后阻抗的变化以及周遭媒体对测试结果的影响。

鉴于实际测量和理论之间存在很好的关联性,TDR 技术在识别给水管缺陷方面具有广泛的应用前景。TDR 技术的主要优点是被检测管道无需全部开挖暴露或关闭停用。TDR 能提供连续的管线检

通过工程设计计算并加以数值模拟进行对比验证,从数值计算结果中分析水跃区的长度可知,水跃均发生在消力池内部,因此数值模型中采用的消力池长度 14m 是完全合理的,与工程计算的消力池长度 13.6m 也很吻合。工程设计一般采用整数设计,因此本工程最终采用内、外河消力池长度均为 14m,工程设计多比较偏保守,保留一定的富余度。

4 结论

采用 K- ϵ 紊流模型和体积率函数法较好的模拟了消力池段的水流结构和自由水面问题,并用体积率函数更新流场空间的密度分布,描述和显示了水气混掺现象和水面波动轮廓线,计算结果与工程设计结果较好吻合,图中水面线的外轮廓线为水面在波动和掺气的最高位置,内轮廓为纯水轮廓线,图中较好的反映了水流掺气的细部结构。

参考文献

- [1] 金忠青.N-S 方程的数值解和紊流模型[M].南京:河海大学出版社,1989.
- [2] 高秋生等.应用 k- ϵ 紊流模型计算水泵站前池流场.见第四届泵站工程学术讨论会论文集,山东廊坊,1992
- [3] 刘成,何耘等.污水泵站前池流态改进措施的实验研究[J].中国给水排水,1997(7)
- [4] Jose Matos Silva, Songheng Li. Numerical simulation of flow in practical water-pump intakes", Proceedings of the XXIX IAHR Congress, Beijing, CHINA, 2001
- [5] 陈玉璞.流体力学[M],南京:河海大学出版社,1990,6.

测,对于首次扫描来说是一种有效的工具。一旦识别出潜在的问题部位,就可以使用其它管线评估技术对这些部位进行更彻底和深入的研究。

参考文献

- [1] Tang, T. and Yim, K.P. 2005. "The Surface Wave - Time Domain Reflectometry (TDR) technique for checking the length and grout integrity/concrete cover of installed underground steel reinforcement of ground anchors, soil nails, concreted steel H-piles and bored piles." Safe and Green Slopes, Proc. 25th Annual Seminar of Geotechnical Division, Hong Kong Institution of Engineers, Hong Kong, 305-321
- [2] Tang, T. and Yeung, A. 2006. "Full-Scale Field Testing of Surface Waves TDR Technique in Integrity Evaluation of Large-Diameter Bored Piles", Proc. TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, USA, Sept. 2006, Paper ID 45, 10 p.