

陡坡后消力池内水跃的数值模拟

葛旭峰¹, 王长新², 李 琳²

(1. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001; 2. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 利用三维 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型和体积率 (VOF) 跟踪自由水面的方法, 对 4 种不同工况、相同坡角的陡坡后消力池内的水跃特性进行了数值模拟, 并与模型试验结果进行了对比。结果表明, 不同工况下消力池内水面线特征、流速和水跃长度与模型试验吻合较好, 陡坡后消力池内淹没水跃长度大于自由临界水跃长度。同时, 数值计算与试验结果均表明, 陡坡后消力池内水跃长度不能按照平底矩形水跃长度计算公式进行计算, 必须考虑淹没度的影响, 从而有效避免陡坡后消力池设计中的不足。

关 键 词: 陡坡; 消力池; RNG $k-\varepsilon$ 模型; 水跃; 数值模拟

中图分类号: TV131

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2012)03-0070-05

水跃是急流过渡到缓流时水面突然跃起的普遍水力现象^[1]。在工程设计中, 由陡坡变成平坡的位置最好是利用水跃对水流挟带的巨大动能进行消能。由于水跃紊动强、波动大, 因此, 水跃必须发生在消力池内。长期以来, 在进行消力池设计时, 以《水闸设计规范》^[2]中的自由临界水跃长度 (即: $L_j = 6.9(h_2 - h_1)$, 其中 h_1, h_2 分别为跃前、跃后水深) 作为重要参数。但实际工程中, 按照此方法计算出的水跃长度在进行消力池池长设计时, 水跃跃出池外, 消力池池长不能满足要求^[3-5]。目前, 对于消力池的设计大多依赖于模型试验, 而模型试验不但设计周期长, 在人力和物力上也不经济。随着数值模拟的发展, 许多学者^[6-9]用 VOF 模型较好地模拟了具有自由水面的水流问题, 但在这些模拟中对于消力池内水跃长度均未见详细说明。为了准确确定陡坡后消力池内水跃长度, 通过数值模拟和模型试验, 采用 VOF 方法和 RNG $k-\varepsilon$ 紊流数学模型对不同淹没度下陡坡坡脚为 30° 时消力池内的水跃水力特性进行对比研究。

1 数学模型及试验布置

1.1 数学模型

VOF 方法是一种处理复杂自由表面的有效方法^[10]。该方法的基本思想是: 定义函数 $\alpha_w(x, y, z, t)$ 和 $\alpha_a(x, y, z, t)$ 分别代表计算区域内水和气占计算区域的体积分数 (体积的相对比例)。在每个单元中, 水和气的体积分数之和为 1, 即:

$$\alpha_w + \alpha_a = 1 \quad (1)$$

对于某个计算单元而言, 存在下面 3 种情况: $\alpha_w = 1$ 表示该单元完全被水充满; $\alpha_w = 0$ 表示该单元完全被气充满; $0 < \alpha_w < 1$ 表示该单元部分是水, 部分是气, 有水气交界面。

水的体积分数 α_w 的控制微分方程为:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

收稿日期: 2011-11-15

基金项目: 新疆水利水电工程重点科学基金项目 (20081387970)

作者简介: 葛旭峰 (1984-), 男, 陕西富平人, 助理工程师, 硕士, 主要从事水力可靠度分析等方面的研究。

E-mail: gexufeng@sina.cn 通信作者: 王长新 (E-mail: xjauwex@sina.com)

式中: t 为时间; u_i 为速度分量; x_i 为坐标分量.水气界面的跟踪即通过求解该连续方程来完成.

在紊流模型中,本文采用 Yakhot 和 Orszag 建立的 RNG $k-\varepsilon$ 紊流数学模型^[11],考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况,可以更好地处理高应变率及流线弯曲程度较大流动,使得 RNG $k-\varepsilon$ 模型具有更高的可信度和精度.其连续方程、动量方程和 k, ε 方程分别表示如下:

$$\text{连续方程:} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\text{动量方程:} \quad \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho B_i \quad (4)$$

$$k \text{ 方程:} \quad \frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\nu + \nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\varepsilon \text{ 方程:} \quad \frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\nu + \nu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

$$\text{其紊动能:} \quad G_k = \left(\frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$$\text{紊动黏性系数:} \quad \nu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

式(3)~(8)中: ρ 和 μ 分别为体积分数的平均密度和分子黏性系数; P 为压力; u 为速度;模型参数 $C_\mu = 0.09$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$.

采用有限体积法对控制方程组进行离散,离散方程组的求解采用欠松弛迭代方法,压力-速度的耦合求解采用 PISO 算法.

1.2 网格划分及边界条件

计算区域的几何参数为:顺水流 x 方向桩号 SC0-2.8 m ~ SC0+7.52 m,沿宽度 y 方向为 0 ~ 0.4 m,水深 z 方向高程为 1.7 ~ 2.3 m,基准高程为 1.7 m.计算区域整体是对称结构,因此对其进行了整体网格划分,采用六面体结构网格进行网格划分.为了得到精确的流场特性,对消力池内进行了局部网格细化.计算区域网格划分见图 1.

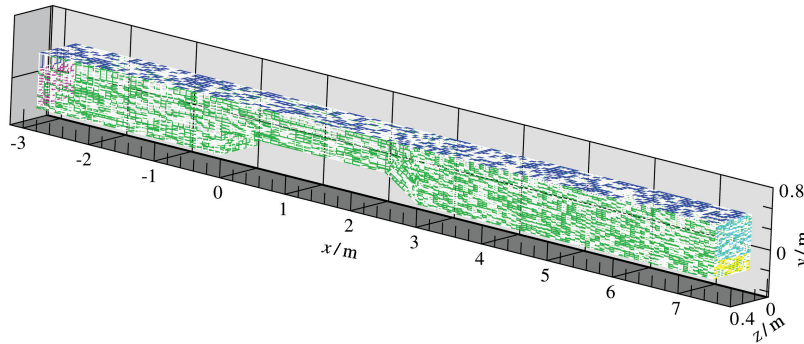


图1 陡坡后消力池网格划分

Fig. 1 Post-steep plunge pool grid partition

水流入口采用速度入口边界条件,通过流量和水深计算平均流速,作为进流边界条件.气流边界(包括上游气体入口)作为压力进口边界条件.由于要在陡坡后消力池内模拟不同淹没度下的水跃.对下游水位有一定的要求.因此,将出口在高度方向设为两类边界条件,下部用于控制下游水深,设定为速度出口边界;上部为空气,按压力出口边界条件给定.固壁采用壁面函数法来处理.

1.3 试验布置

水跃试验在新疆农业大学水工实验室的玻璃水槽内进行.水槽宽 0.4 m,高 0.5 m,长 20 m,槽首设有进

水阀和静水池,静水池中设有消能栅板,用于稳定水流.水槽的顶部设有带刻度的轨道,将水槽轨道零点刻度所在的断面记为 SC0+00 m 断面,其余断面位置可根据刻度依次类推.将水槽中 SC0+00 m ~ SC0+2.5 m 断面间设置为泄流段,SC0+2.5 m ~ SC0+3.02 m 设置为陡坡段,陡坡坡角为 30° .水槽末端设有可调节尾门,水历经尾门后跌入水箱.试验布置如图 2 所示.在试验中,调节尾门开度改变水跃发生位置,形成淹没度不同的水跃.试验中通过线绳在水跃中的速度方向(线绳处在上游或下游或静止不动时的位置)来对跃后位置进行确定.水槽上端设有活动测针架,可测读水位,流速采用旋浆流速仪进行测量.

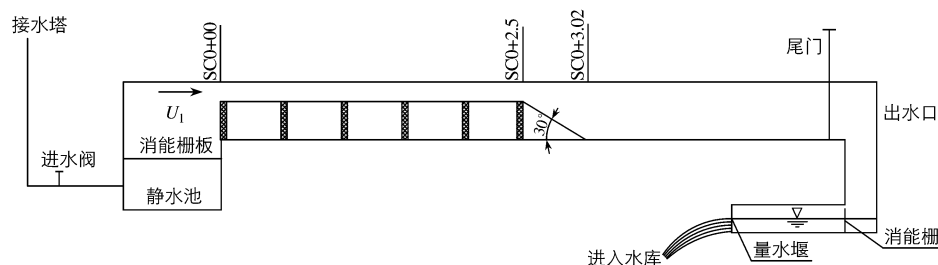


图 2 试验布置
Fig. 2 Test layout

为验证模型可靠性,将数值模拟结果与试验结果进行比较,设计 4 种工况,单宽流量均为 $0.092 \text{ m}^2/\text{s}$,进口平均流速均为 0.179 m/s ,工况 1 ~ 4 的淹没度 σ 分别为 1.00, 1.05, 1.10 和 1.20,尾水深度分别为 0.207, 0.225, 0.234 和 0.250 m.

2 数值模拟与试验结果分析

应用前述的数学模型,对不同设计工况条件下的陡坡后消力池内水跃进行了数值模拟.

2.1 水面线分析

图 3 为不同工况下数值模拟的水面线和模型试验测得水面高程的比较.从图 3 可见,各工况下数值模拟的水面线与实测水面线的曲线形状、位置都较一致,仅在工况 3 和 4 中,计算水面线在回流混掺区略高于实测水面线,分析其原因可能是由于水体紊动掺气较强,水面变化幅度大,水面线量测时引起的误差.

2.2 流速分析

图 4 为各工况下,消力池底板以上 0.01 m 处,沿中轴线方向流速数值计算值和试验结果的比较.从图中可见,速度值计算结果与试验结果吻合较好,但计算值比试验结果普遍偏小,分析其原因,是由于在水槽内形成的水跃紊动剧烈,流速最大值出现位置和大小并不固定,而试验实测为短时最大值,且较难确定其准确位置和方向.

2.3 水跃长度分析

图 5 为各工况条件轴线位置的流线分布及水跃长度(根据其跃前、跃后位置确定)的计算值.由图可见,水跃上部有个剧烈的旋滚区,旋滚区的下面则是急剧扩散的主流.比较图 5(a) 和图 5(b), (c), (d) 可以看出,在相同

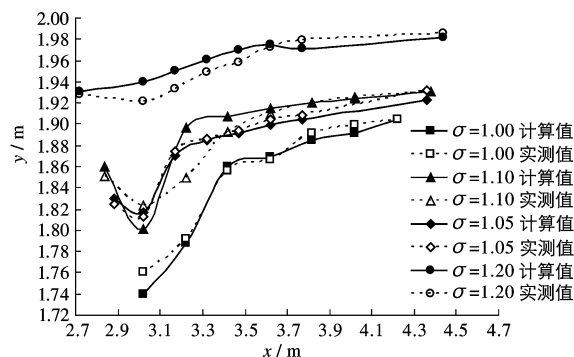


图 3 各工况的水跃水面线
Fig. 3 The water line of hydraulic jump in different working conditions

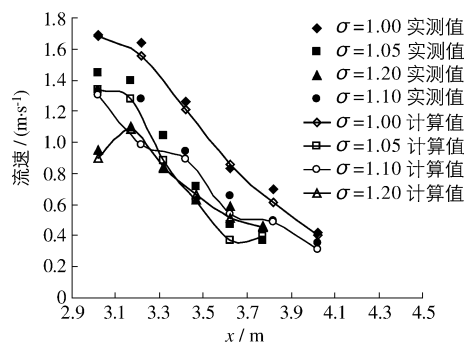


图 4 各工况流速分布
Fig. 4 The velocity distribution in different working conditions

上游进口平均流速($u_1=0.179\text{ m/s}$)、单宽流量($q=0.092\text{ m}^2/\text{s}$)和陡坡坡角(30°)条件下,自由临界水跃最短,仅为 1.0 m ,而在淹没度 $\sigma=1.05, 1.10$ 和 1.20 时,水跃长度分别为 $1.40, 1.35$ 和 1.20 m ,表明淹没水跃的水跃长度大于自由临界水跃的水跃长度,并且随着淹没度增大,淹没水跃长度在减小。

比较各工况下的水跃长度 L_j 的计算值与实测值可见,计算值与实测值比较接近。在考虑淹没度的情况下,陡坡后消力池的设计不能完全按照平底矩形水跃长度公式 $L_j=6.9(h_2-h_1)$ 进行计算,当单宽流量为 $0.092\text{ m}^2/\text{s}$ 时,公式计算水跃长度为 1.19 m 。比较公式计算结果与数值模拟结果发现,除工况1外,其余工况数值模拟结果均大于 1.19 m ,因此,对陡坡后消力池的设计,应该考虑淹没度的影响。

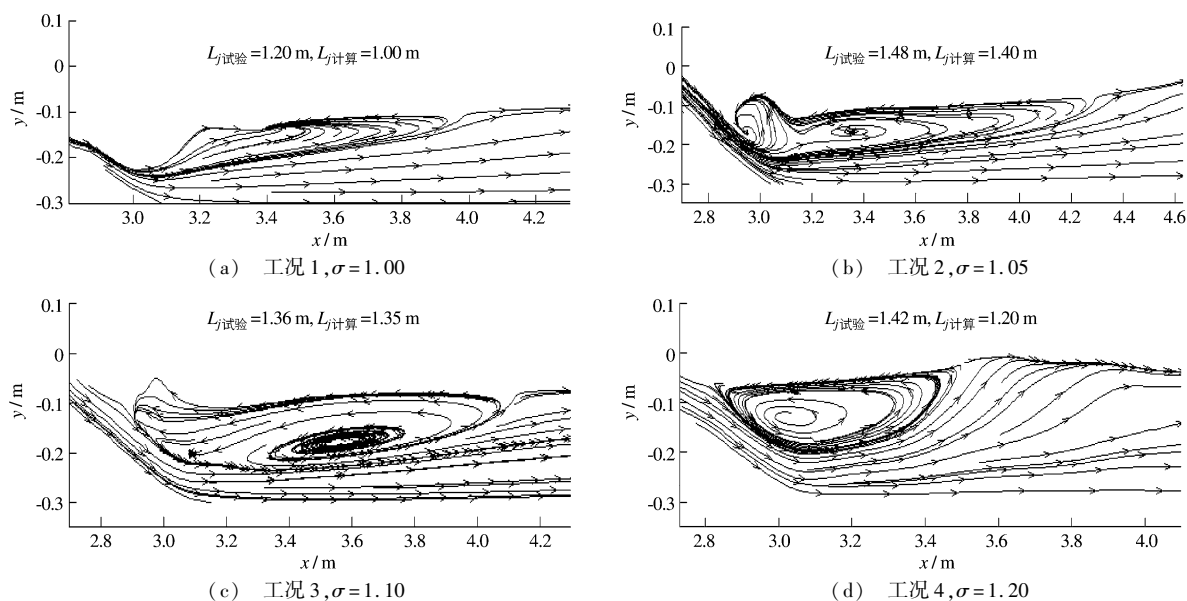


图5 不同工况下的流线分布

Fig. 5 The streamline distribution in different working conditions

3 结 语

(1) 本文对坡角为 30° 的陡坡后消力池内水跃特性进行了数值模拟和模型试验,通过对其消力池内的水面线、流速和流线分布的分析表明,两种方法吻合较好,这为进一步研究陡坡后消力池内水跃的运动规律奠定了基础。

(2) 陡坡后消力池内水跃长度不同于平底水跃长度,在淹没度情况下产生的水跃长度大于自由临界水跃长度。因此,在进行陡坡后消力池设计时,应考虑淹没度对水跃长度的影响。本文主要针对陡坡坡角为 30° 时各工况水跃长度进行了研究,若考虑坡角对水跃长度的影响还需做进一步的研究。

参 考 文 献:

- [1] 邱秀云. 水力学[M]. 乌鲁木齐: 新疆电子出版社. 2008. (QIU Xiu-yun. Hydraulics[M]. Urumqi: Xinjiang Electron Press, 2008. (in Chinese))
- [2] SL 253—2000, 水闸设计规范[S]. (SL 253—2000, Design specification of sluice[S]. (in Chinese))
- [3] 葛旭峰, 鲁克恩, 李琳, 等. 小石峡水电站表孔溢洪道模型试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010(5): 61-64. (GE Xu-feng, LU Ke-en, LI Lin, et al. Model test research of surface orifice spillway for Xiaoshixia hydropower station[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010(5): 61-64. (in Chinese))
- [4] 石教豪, 王罗斌, 李莉. 亭子口水利枢纽工程泄洪消能试验研究[C]//周孝德. 水力学与水利信息学进展, 西安: 西安交通大学出版社, 2009: 311-318. (SHI Jiao-hao, WANG Luo-bin, LI Li. Test research on flood discharge and energy

- dissipation of Tingzikou hydro-project [C] // ZHOU Xiao-de. Progress of Hydrology and Hydro-Information, Xi'an Jiaotong University Press, 2009: 311-318. (in Chinese))
- [5] MIGNOT E, CHENFUEGOS R. Energy dissipation and turbulent production in weak hydraulic jumps[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(2): 116-121.
- [6] 刘清朝, 陈椿庭. 水跃紊流特性的数值研究[J]. 水利学报, 1993(1): 1-10. (LIU Qing-chao, CHEN Chun-ting. Numerical study of turbulence characteristics in hydraulic jumps[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993(1): 1-10. (in Chinese))
- [7] LONG D J, STEFFLER P M, RAJARATNAM N. A numerical study of submerged hydraulic jumps[J]. Journal of Hydraulic Research, 1991, 29(3): 293-308.
- [8] 李玲, 陈永灿, 李永红. 三维 VOF 模型及其在溢洪道水流计算中的应用[J]. 水力发电学报, 2007(2): 83-86. (LI Ling, CHEN Yong-can, LI Yong-hong. Three dimensional VOF model and its application to the water flow calculation in the spillway [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007(2): 83-86. (in Chinese))
- [9] 王立辉, 胡四一, 龚春生. 二维浅水方程的非结构网格数值解[J]. 水利水运工程学报, 2006(1): 8-13. (WANG Li-hui, HU Si-yi, GONG Chun-sheng. Numerical solution for two-dimensional shallow water equations on unstructured grids[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(1): 8-13. (in Chinese))
- [10] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Compute Physics, 1981, 39: 201-225.
- [11] 张政, 谢灼利. 流体-固体两相流的数值模拟[J]. 化工学报, 2001, 52(1): 1. (ZHANG Zheng, XIE Zhuo-li. Fluid-solid two phase flow numerical simulation[J]. Journal of Chemical Engineering, 2001, 52(1): 1. (in Chinese))

Turbulence model of hydraulic jump in a post-steep plunge pool

GE Xu-feng¹, WANG Chang-xin², LI Lin²

(1. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an 710001, China; 2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: Using a three-dimensional RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and the method of the volume rate (VOF) to track free water surface, the hydraulic jump characteristics of a plunge pool behind the steep slope with the same slope angle are simulated under 4 different working conditions in this study. By comparing the simulated results with the model test results, we find that the feature of water surface profile, velocity and length of the hydraulic jump agree well with each other, and the length of submerged hydraulic jump is greater than that of free critical hydraulic jump in the plunge pool behind the steep slope. The numerical calculation and the test results indicate that the length of the hydraulic jump in the plunge pool behind the steep slope can not be calculated by a formula used in flat bottom rectangular hydraulic jump, and the influence of submergence degree must be considered to avoid the designing deficiency of the plunge pool behind the steep slope.

Key words: post-steep; plunge pool; RNG $k-\varepsilon$ model; hydraulic jump; numerical simulation