

稳定冲坑内剖面二维悬移质扩散的数值研究

郭 杰¹, 蒋昌波^{1,2}, 陈 杰^{1,2}, 张春财^{1,2}

(1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 湖南省水沙科学与水灾害防治重点实验室, 湖南 长沙 410004)

摘要: 基于 N-S 方程和悬移质扩散方程, 采用网格标记法 (MAC) 追踪自由水面, 应用标准 k-ε 封闭方程建立了二维水流泥沙数学模型. 运用数学模型对射流冲坑内的流场、泥沙浓度进行数值计算, 得到了冲坑内流场、紊动特性及悬移质泥沙浓度的分布情况, 并与实验数据进行了比较. 结果显示, 该数学模型具有较高的精度和适用性, 能较好地模拟稳定冲刷坑内的流场和悬沙浓度分布.

关 键 词: 数值模拟; 冲刷坑; 悬沙浓度分布

中图分类号: P731.22:TV139.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2010)02-0028-06

对于冲刷坑内水流的研究已较为广泛. 最早由 Eggenberger 和 Mueller 对二维水平射流冲刷坑的发展进行了系统预报; Rajaratnam 对此进行了进一步的研究; 之后, Graf 和 Altinakar 在前人的研究基础上进行了进一步的概括和总结; 随后, Karim 等^[1]通过建立数学模型对 Graf 和 Altinakar 的试验进行了数学模拟; Ali 和 Neyshaboury 则分别利用二维和三维的数学模型模拟在壁面射流作用下产生的冲刷坑尺度; 同时, Ade 等^[2]研究了一系列冲刷坑的发展过程并做了总结; Lirianoet 则对管道出口处的冲刷坑进行了相应的研究. 国内学者的研究多集中在高坝挑流冲刷坑方面, 陈永灿等^[3]对高坝挑流冲刷坑流场进行了数值模拟; 王晓松等^[4]对挑流冲刷坑进行了三维数值模拟; 时钟等^[5-6]对三峡溢流坝下游平衡冲刷坑内流场结构进行了数值模拟. 在泥沙研究方面, 我国学者张耀新^[7]、余明辉^[8]、李孟国^[9]等均给出了各自的泥沙数值模拟方法. 上述研究多从物理模型实验方面展开的, 得到了一些较实用的估算冲刷坑位置和深度的方法, 但其结论多通过经验关系所得, 并没有详细研究冲刷坑内的水流特性. 在数值模拟方面, 基本都集中在对冲坑内部流场的分析上, 而对悬沙分布情况的研究则很少. 本文在前人的研究基础上, 建立剖面二维悬移质泥沙扩散数学模型, 通过求解标准 k-ε 紊动模型封闭的 N-S 方程和采用网格标记法 (MAC) 处理自由水面, 对稳定后的冲刷坑内流场、悬沙浓度分布情况进行数学模拟和研究.

1 数 学 模 型

1.1 基本控制方程

悬移质扩散方程:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u_i \frac{\partial S}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\varepsilon_{si} \frac{\partial S}{\partial x_i} \right) + \omega \frac{\partial S}{\partial x_j} \quad (1)$$

式中: $i=1, 2; j=2; \varepsilon_{si}$ 为泥沙扩散系数; ω, S 分别为泥沙静水沉速和含沙量. 本文假定悬移质泥沙粒径均一.

连续方程:

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

收稿日期: 2009-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50479015); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0710); 湖南省重点学科资助计划, 长沙理工大学创新团队资助计划.

作者简介: 郭 杰(1983-), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事河流、海岸动力过程及其模拟技术的研究.

E-mail: gj0313@yahoo.cn

$$\text{动量方程: } \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i \quad (3)$$

选用标准 k- ε 方程用以封闭 N-S 方程.

$$\text{紊动动能方程: } \frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (4)$$

$$\text{紊动耗散率方程: } \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \nu_t \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\text{涡黏系数: } \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

以上(2)~(5)式中, $i=1,2; j=1,2; \nu$ 为流体运动黏滞系数; f_i 为质量力强度; C_μ 为无量纲数; 常数 $\sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3, C_{\varepsilon 1}=1.44, C_{\varepsilon 2}=1.92$ 均由实验所得; 方程经过无量纲化后, $\rho=1, \nu=1/Re$.

1.2 方程的求解

建立的立面二维水沙数学模型在水流和泥沙计算时考虑非耦合的方法,即在一个时刻内先计算水流运动,再计算泥沙运动. 其中运动方程的离散采用刘清朝等^[10]在进行水跃研究时提出的离散方法. 对于悬沙浓度计算方程的离散,取 x, y 方向的扩散系数 $\varepsilon_{s1}, \varepsilon_{s2}$ 同为 ε , 则式(1)可变为:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial x_2^2} \right) - u_1 \frac{\partial S}{\partial x_1} - u_2 \frac{\partial S}{\partial x_2} + \omega \frac{\partial S}{\partial x_2} \quad (6)$$

根据 Rouse 实验,对于天然河道,可近似取 $\varepsilon=0.067 U_* h$, 其中 U_* 为摩阻流速, h 为水深. 令 $u_2 - \omega = v'$, 则:

$$L_x = \frac{(uS)_{i-1/2,j} - (uS)_{i+1/2,j}}{\Delta x}; \quad L_y = \frac{(v'S)_{i,j-1/2} - (v'S)_{i,j+1/2}}{\Delta y};$$

$$\delta_{xy} S_{i,j}^n = \frac{S_{i+1,j}^n - 2S_{i,j}^n + S_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{S_{i,j+1}^n - 2S_{i,j}^n + S_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}$$

其中: $\Delta x, \Delta y$ 为 x, y 方向的计算步长. 将式(6)离散,得到其插分格式为:

$$\frac{S_{i,j}^{n+1} - S_{i,j}^n}{\Delta t} = \varepsilon \delta_{xy} S_{i,j}^n + L_x + L_y \quad (7)$$

1.3 边界条件的确定

1.3.1 固壁边界条件 计算区域上下边界条件均设定为无滑移边界条件,左右为入流出流边界条件. 本文中采用了标准 k- ε 模型模拟水流紊动,对于高雷诺数绕流,近壁紊动边界层很薄,在实际计算时,壁面网格只能达到等应力区. 而从壁面到等应力区的边缘有剧烈的紊动变化,数值方法无法在一个网格中近似这种变化,故在其近壁附近采用壁函数技术进行处理. 在近壁结点选取时,取近壁处 $1/2$ 步长为结点^[7].

1.3.2 自由表面边界处理 考虑到 MAC 法不受单元形状的限制,能圆滑地表示自由表面并可同时显示流体内部的流态且算法简单,故采用 MAC 法模拟自由表面. 其计算过程分为 3 个步骤:①将计算区域单元划分为空单元、表面单元和流体单元;②将表面单元与流体单元视为流体区域,进行插分计算;③按照计算结果重新布置各标记点位置.

1.3.3 悬沙浓度边界 令水面处含沙量为 0; 由于假设所计算的冲坑已达到平衡状态,故在底部边界处取水流挟沙力 S_* 为近底含沙量 S_a ^[8], 其中 $S_* = k \left(\frac{u^3}{gh\omega} \right)^m$.

2 数学模型验证及结果分析

为了验证模型的适用性和精度,采用一组实测数据与其进行比较. 试验布置如图 1. 图中, h_v 为闸门开度, h_1 为上游水位, h_2 为尾流水位, V 为水流出闸门时的平均速度; 各参数的初始值分别为: $h_v=0.062$ m,

$h_1=0.52\text{ m}, h_2=0.26\text{ m}, V=1.87\text{ m/s}$.

图2为闸门刚刚开启时,随着水流的逐渐下泄,在闸门附近由于水流速度较大及压力相对较小造成了水体自由表面下降,同时下游水面升高.图3为平衡后水面线的实测值与计算值的比较.可见,此程序的计算结果与实际测量结果较为吻合,模型的计算精度较高.图4为水流翻滚区内不同横断面上的流速分布情况,各断面流速分布形态相似,呈抛物线分布;从底板往上,流速逐渐增加,达到最大值后,又逐渐减小.随着离闸门距离的增大,断面上最大流速逐渐减小.

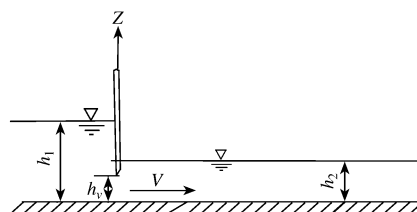


图1 试验布置

Fig. 1 Experimental arrangement

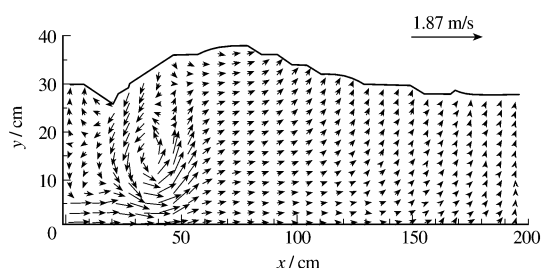


图2 闸门开启时刻流场

Fig. 2 Numerical velocity field

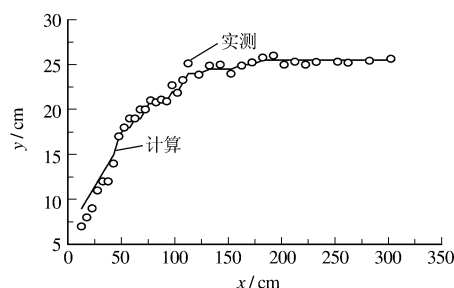
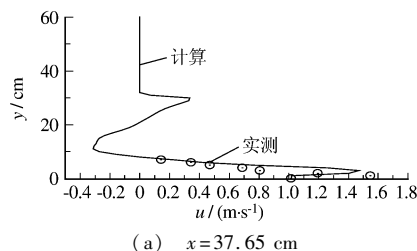
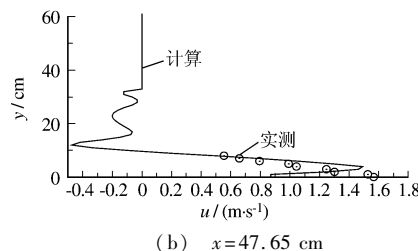


图3 实测与计算水面线的比较

Fig. 3 Comparison between the calculated & measured free surface



(a) $x=37.65\text{ cm}$



(b) $x=47.65\text{ cm}$

图4 距闸门不同位置处流速比较

Fig. 4 Comparison of the velocities on the sections

3 冲坑内流场及悬沙浓度的分布研究

用建立的数学模型研究冲坑内流场及悬沙浓度的分布.冲坑地形采用 Kurniawan^[11]等物理实验得出的冲坑的形状(见图5).图中,各参数的初始值分别为: $L_a=0.10\text{ m}$, $h_v=0.025\text{ m}$, $h_1=0.276\text{ m}$, $V=1.032\text{ m/s}$, $d_s=0.107\text{ m}$, $L_s=0.343\text{ m}$.

图6为冲坑内流场图,可见在冲坑底部A处出现一较大的漩涡,而在其他位置未出现相似情况.图7为压力等值线图,可见冲坑下部压力较大.

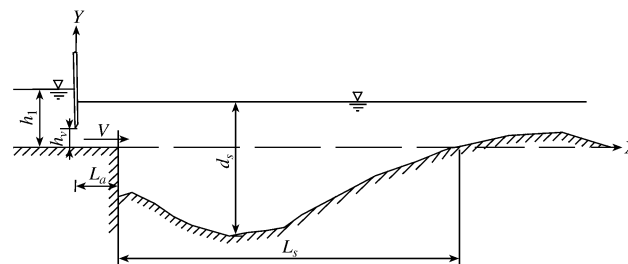


图5 试验布置

Fig. 5 Experimental arrangement

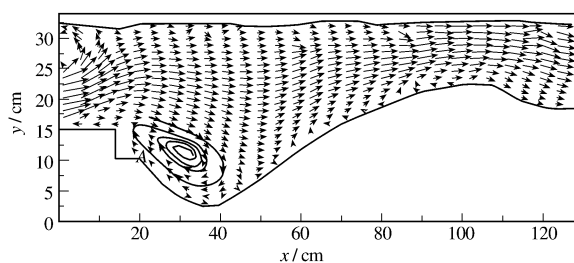


图6 冲坑内流场

Fig. 6 Numerical velocity field in the scour hole

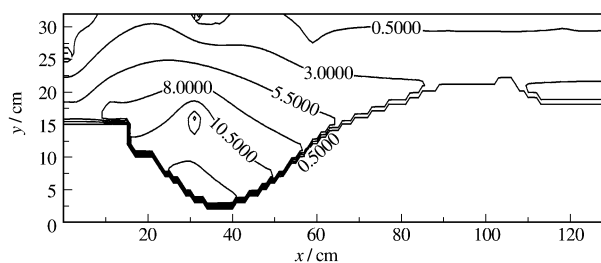
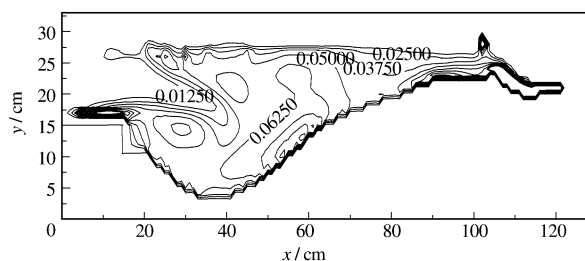


图7 压力等值线

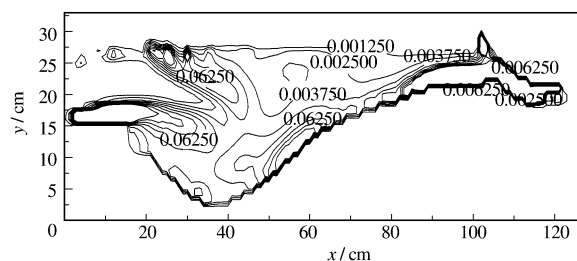
Fig. 7 Equivalent curves of pressure field

图8为紊动动能及紊动耗散项等值线图,可以看出两图等值线分布情况相似,说明计算合理;在水流入射点处的紊动动能项及紊动耗散项的数值最大,这是由于该处由于入射水流遇到边壁的阻挡,使之紊动情况加剧;入射水流下部紊动情况也较为剧烈,这是由于水流在此处产生漩涡。

图9表示泥沙粒径为0.5 mm时悬沙浓度分布的等值线。图中A,B,C,D,E分别距闸门0.1,0.3,0.5,1.0和1.2 m。



(a) 紊动动能



(b) 紊动耗散

图8 紊动动能和紊动耗散项等值线

Fig. 8 Equivalent curves of kinetic energy of turbulence and turbulent diffusion

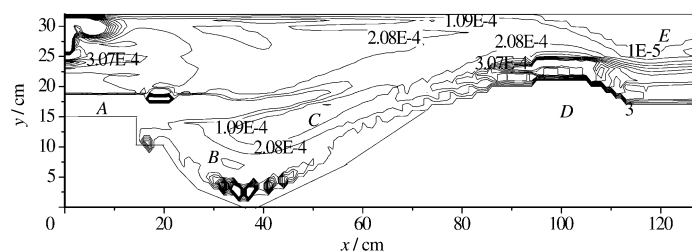
图9 冲坑内悬移质浓度分布等值线(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)Fig. 9 Equivalent curves of sediment concentration in the scour hole (unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)

图10描述了冲坑内部悬沙浓度的分布情况,可见,悬沙浓度分布规律为由近底向水面递减。在A位置,由于水流刚刚由闸门冲出,流速最大、挟沙能力强,近底部悬沙浓度较其他4个位置高。在距底部0.3 m处浓度升高,是由于在闸门上部产生漩涡所导致;B,C两条垂线有触壁水股经过,近壁面水流先加速后减速,相应的悬沙浓度的分布也受到了影响,浓度分布变化较大;其中B位置位于水股触壁点之后,在该处近底部分悬沙浓度较低,而在距底部0.15 m到邻近自由面部分,由于水体紊动剧烈且有水股经过,故悬沙浓度较高。同时也可以看出,冲坑内部悬沙浓度分布沿垂线变化并不明显,只是在临近水面部分才为沿深度增加而递减。D位置水流速度减小,挟沙能力下降;E位置已处于冲坑以外,悬沙浓度分布情况为表面处悬沙浓度为0,沿水深增加而增加。

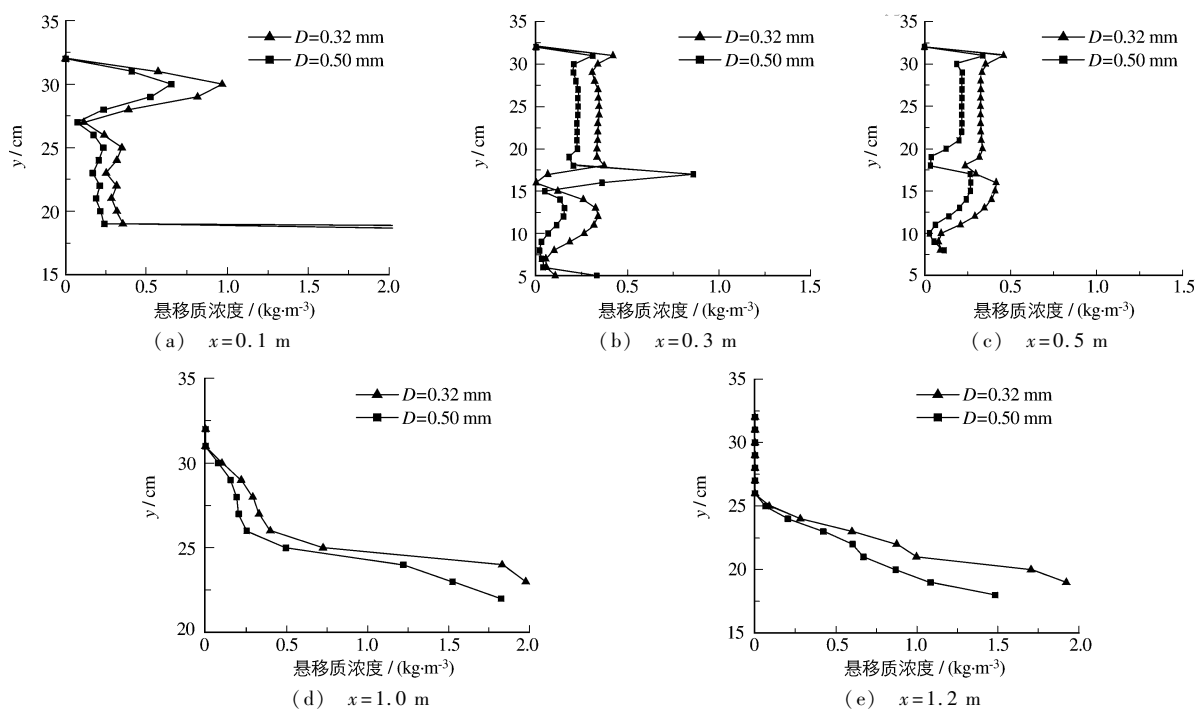


图 10 冲坑内悬移质浓度沿垂线分布

Fig. 10 Curves of sediment concentration in the scour hole

4 结 语

本文通过求解采用标准 $k-\varepsilon$ 紊动模型封闭的 N-S 方程,同时引入悬移质泥沙扩散方程,建立了求解稳定后的冲坑内悬沙浓度分布情况的二维数学模型.自由水面的模拟采用网格标记法(MAC),提高了数学模型的准确度.通过实验数据验证了模型的精度和适用性.经计算,揭示了冲坑内的流动规律和悬沙浓度分布情况,实现了对冲坑内流场悬沙分布较为准确的预测和模拟,为进一步利用数值方法探讨冲刷坑内流场、冲刷等问题提供了一定的借鉴.

参 考 文 献:

- [1] KARIM O A, ALI K H M. Prediction of flow patterns in local scour holes caused by turbulent water jets[J]. Journal of Hydraulic Research, 2000, 38(4): 279-287.
- [2] ADE F, RAJARATNAM N. Generalized study of erosion by circular horizontal turbulent jets[J]. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 1998, 36(4): 613-635.
- [3] 陈永灿, 冬俊瑞, 王艳明. 三峡溢流坝下游冲坑流动特性研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998(1): 115-118. (CHEN Yong-can, DONG Jun-rui, WANG Yan-ming. Study of the flow characteristics in the scour of downstream of Three Gorges spillway[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 1998(1): 115-118. (in Chinese))
- [4] 王晓松, 陈璧宏. 挑流冲坑三维紊流场的数值模拟[J]. 水力发电学报, 1999(3): 53-61. (WANG Xiao-song, CHEN Bi-hong. Numerical simulation of 3-D turbulent flowing tail water scour [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1999(3): 53-61. (in Chinese))
- [5] 时钟, 李世森. 垂向二维潮流数值模型及其在长江口北槽的应用[J]. 海洋通报, 2003, 22(3): 1-8. (SHI Zhong, LI Shi-sen. A two-dimensional vertical numerical model of tidal flow and its application to the north passage of the Changjiang River Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2003, 22(3): 1-8. (in Chinese))
- [6] 刘沛清. 挑射水流对岩石河床的冲刷机理研究[D]. 北京: 清华大学, 1994. (LIU Pei-qing. Study on free jet scour from

- high dam on rocky river bed[D]. Beijing: Tsinghua University, 1994. (in Chinese))
- [7] 张耀新, 吴卫民. 剖面二维非恒定悬移质泥沙扩散方程的数值方法[J]. 泥沙研究, 1999(2): 40–45. (ZHANG Yao-xin, WU Wei-min. Numerical method on profile 2D diffusion equation for suspended sediment of unsteady flow [J]. Journal of Sediment Research, 1999(2): 40–45. (in Chinese))
- [8] 余明辉, 吴腾, 杨国录. 剖面二维水沙数学模型及其初步应用[J]. 水力发电学报, 2006, 25(4): 66–69, 50. (YU Ming-hui, WU Teng, YANG Guo-lu. Study on vertical 2D sediment numerical model and its primary application [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(4): 66–69, 50. (in Chinese))
- [9] 李孟国, 李文丹, 时钟, 等. 田湾核电站海域潮流泥沙数值模拟研究[J]. 泥沙研究, 2008(2): 16–23. (LI Meng-guo, LI Wen-dan, SHI Zhong, et al. Numerical modeling of tidal current and sediment movement in the coastal area near Tianwan Nuclear Power Station [J]. Journal of Sediment Research, 2008(2): 16–23. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] KURNIAWAN A, ALTINAKAR M S, GRAF W H. Scour depth and flow pattern of eroding plane jets[J]. International Journal of Sediment Research, 2004, 19(1): 15–27.

The profile 2D numerical study of diffusion for suspended sediment in stable scour hole

GUO Jie¹, JIANG Chang-bo^{1,2}, CHEN Jie^{1,2}, ZHANG Chun-cai^{1,2}

- (1. School of Water Conservancy, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;
2. Hunan Province Key Laboratory of Water, Sediment Sciences & Flood Hazard Prevention, Changsha 410004, China)

Abstract: A 2D flow-sediment numerical model is established in this study, and the flow field solver is based on the MAC (Mark and Cell) method for continuity equation and two-dimensional N-S equations with a standard k- ϵ closure. Besides the velocity, the characteristics of turbulent flow and the sediment concentration distribution in scour hole are simulated in the numerical model. Compared with the experimental data, the results show that the numerical model has a preferable accuracy and reliability, and can better simulate the velocity and sediment concentration distribution in the scour hole.

Key words: numerical model; scour hole; sediment concentration