



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.02.019

顾声龙, 吴玉帅, 解宏伟, 等. 基于 SPH 方法的二维宽顶堰溢流数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 127-131, 137. GU Sheng long, WU Yu shuai, XIE Hong wei, et al. Numerical simulation of overflow of two dimensional broad crested weir based on SPH method[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 127-131, 137. (in Chinese)

基于 SPH 方法的二维宽顶堰溢流数值模拟

顾声龙, 吴玉帅, 解宏伟, 袁晓伟

(青海大学 水利电力学院, 西宁 810016)

摘要: 光滑粒子水动力学方法(SPH)是一种基于纯拉格朗日思想的无网格粒子方法,在众多科学和工程领域得到了初步应用。采用 SPH 方法对二维宽顶堰溢流进行了数值模拟,并利用机群进行并行计算来提高计算效率,将模拟数据与试验数据进行了对比。结果表明,SPH 方法可以模拟出二维宽顶堰自由出流和淹没出流时水流流态、水跌、回流区、水跃现象,计算出溢流流量、流速等水力参数,并且采用数据拟合得出与理论相符的断面流速分布图。结果表明了 SPH 方法可以较好模拟二维宽顶堰溢流中的流速分布以及水面曲线。

关键词: SPH; 二维宽顶堰溢流; 数值模拟; 自由面计算; 并行计算

中图分类号: TV 652.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)02-0127-05

Numerical simulation of overflow of two dimensional broad crested weir based on SPH method

GU Sheng long, WU Yu shuai, XIE Hong wei, YUAN Xiao wei

(School of Water Resource and Electric Power, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: Smoothed particle hydrodynamics (SPH) method is a meshless particle method based on the Lagrangian method, and has been applied in many fields of science and engineering. In this paper, the SPH method was used to simulate the overflow of a two dimensional broad crested weir, and parallel computation was carried out to improve the efficiency. The simulation data were compared with the experimental data. The results showed that the SPH method can simulate the hydraulic parameters such as the flow regime, water drops, recirculation zone and water jump phenomenon of the two dimensional broad crested weir. We can obtain the flow velocity distribution on the section from the data. This study proved that the SPH method can be used to simulate the flow velocity distribution and water surface profile.

Key words: smoothed particle hydrodynamics; overflow of two dimensional broad crested weir; numerical simulation; free surface calculation; parallel computation

近年来 SPH 方法^[1]在自由表面流动模拟中取得了较大进展,能够模拟传统有网格算法较难处理的自由面翻卷破碎^[2]、液舱晃荡^[3]、流固耦合^[4]等现象,得益于其拉格朗日粒子特性;SPH 方法中粒子

不仅用于估算场变与近似控制方程,也代表介质系统,具有诸如密度、压力、速度、内能等宏观物理量,相当于物质点。SPH 方法既具有了拉格朗日方法描述物质界面准确的优势,又兼备欧拉方法容易计

收稿日期: 2016-01-09 修回日期: 2016-11-23 网络出版时间: 2016-06-00

网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(51479087);水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放研究基金资助课题(sklhse 2015-B-02);青海大学高层次人才项目(k160024)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51479087); Open Research Fund Program of the National Key Laboratory of Water and Sediment Science and Water Conservancy and hydropower Engineering(sklhse 2015-B-02); High Level Talents Project of Qinghai University(k160024)

作者简介: 顾声龙(1982-),男,青海西宁市人,副教授,博士,主要从事流体力学科研与教学工作。E-mail: qhdxgsl@qq.com

算的长处。因此, SPH 法已用来研究溃坝^[5]、自由表面流动^[6]、多相流^[7]等问题。

本文采用 SPH 方法来模拟二维宽顶堰溢流现象, 利用宽顶堰溢流实验实测数据, 采用集群并行计算方式, 来研究 SPH 方法在宽顶堰自由出流和淹没出流水力特性方面的适用性及模拟的精度。

1 SPH 理论

1.1 SPH 方法的基本方程

SPH 方法, 本质上是把真正的空间近似划分, 最小的划分空间由一系列表面绝对光滑的粒子填充。这些空间粒子常常用坐标、速度、质量、内能等参量表征。推导 SPH 的基本方程, 分为两步: 第一步, 给出 SPH 方法的积分表示法, 即在整个变量场中, 对任意位置应用核近似法进行积分近似; 第二步给出其粒子近似值, 对给出的函数积分表达式, 通过对在其光滑长度范围内的粒子叠加求近似, 得到其粒子的近似公式^[8]。

1.2 SPH 方法核近似与粒子近似

在 SPH 方法中, 函数 $f(x)$ 的积分表示式如下:

$$f(x) = \int_{\Omega} f(x') \delta(x - x') dx' \quad (1)$$

式中: Ω 为包括向量 x 的积分体积; $\delta(x - x')$ 为狄拉克函数, 性质如下:

$$\delta(x - x') = \begin{cases} 1 & x = x' \\ 0 & x \neq x' \end{cases} \quad (2)$$

若用光滑函数 $W(x - x', h)$ ^[9-11] 来取代狄拉克函数, 则 $f(x)$ 的积分表示式可写为

$$f(x) \approx \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx' \quad (3)$$

式中: h 为光滑长度, 用来定义光滑函数影响区域的光滑长度。由于 W 不是狄拉克函数, 故式(3)的积分表示式只能是近似式, 上式即为核近似方程的初始形式。

粒子质量 m_j 为

$$m_j = \Delta V_j \rho_j \quad (4)$$

式中: ΔV_j 为粒子的体积; ρ_j 为粒子 j 的密度 ($j = 1, 2, \dots, N$), 其中 N 为在粒子 j 的支持域内的粒子总量。由于式(3)可转化为支持域内所有粒子叠加求和的离散化形式, 故 $f(x)$ 的连续 SPH 积分式可写作以下离散化的粒子近似式:

$$f(x) \approx \int_{\Omega} f(x') W(x - x', h) dx' \approx \sum_{j=1}^N f(x_j) W(x - x_j, h) \Delta V_j = \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W(x - x_j, h)$$

式(5)即为 SPH 方法的粒子近似法。在粒子 i

处的函数的粒子近似式最终可写为

$$f(x_i) \approx \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \cdot W_{ij} \quad (6)$$

$$W_{ij} = W(x_i - x_j, h)$$

式(6)说明了粒子 i 处的任一函数值可通过应用光滑函数对其紧支域内所有粒子相对应的函数值进行加权平均近似求得^[12]。

1.3 控制方程

将描述流体运动的质量守恒方程和动量守恒方程(Navier-Stokes 方程)表示为

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \Delta \cdot u \quad (7)$$

$$\frac{Du}{Dt} = -\frac{\Delta P}{\rho} + \frac{u}{\rho} \Delta^2 u + F \quad (8)$$

式中: ρ 为水的密度; P 为压力; u 为水的动力学黏性系数; F 为外部作用力。式(7)和式(8)左端分别为表示密度和速度的随体导数。使用人工黏性来产生剪切黏性和体积黏性^[13-15], 见 Monaghan(1992), 得到方程的 SPH 形式为

$$\frac{D\rho}{Dt} = \sum_{j=1}^N m_i u_{ij}^{\beta} \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i} \quad (9)$$

$$\frac{Du_i^{\alpha}}{Dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left[\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right] \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial x_i^{\alpha}} + g \delta_{\alpha\beta} \quad (10)$$

式中: α 和 β 表示坐标方向和重复指标求和, $\alpha = 3$ 代表垂直向上的坐标; $\delta_{\alpha\beta}$ 为置换张量; $u_{ij}^{\beta} = u_i^{\beta} - u_j^{\beta}$; Π_{ij} 为人工黏性; W 为核函数。

2 数值模拟

2.1 模型建立

本文选取宽顶堰溢流为试验模型, 见图 1, 参数: 堰高 $P = 0.08$ m, 堰宽 $B = 0.15$ m, 堰厚 $\delta = 0.4$ m, 堰上水头为 $H = 0.065$ m, $\delta/H = 6$ 。二维计算模型的几何和物理参数与该试验模型相同, 由于 SPH 方法中入流问题^[16-17] 仍是一个未解决的难题; 故本文入流方式采用“大水箱”, 该方法可以在一定范围内保持模型的“恒水位”, 对计算结果影响不大。计算模型共计 20 256 个粒子, 边界粒子 2 125 个, 本文利用集群进行并行计算; 模型参数: 核心函数为五次样条核函数; 时间步长算法为预估校正法; 密度过滤为谢巴德滤波器方法; 黏性处理方法为层流和亚粒子尺度紊流; 状态方程为微可压; 边界类型为边界排斥力型; 时间步长为 1×10^{-5} s, 并且可变; 柯朗弗里德里希-列维数为 0.2; 光滑长度系数为 0.92; 模拟溢流时长为 10 s, 集群共运行 1.5 h。由于试验模型的二维性较强以及构建三维计算模型的不易之处,

所以本文采用二维模型;分析模拟结果时,将试验模型数据转换为单宽数据与模拟结果进行对比即可。

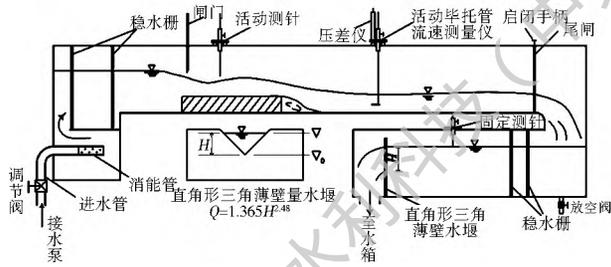


图1 宽顶堰溢流试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of overflow of broad crested weir

2.2 结果及分析

2.2.1 水流形态

本文试验模型中 h_s 为下游水位高出堰顶距离, $H_0 = H + \alpha_0 v_0^2 / 2g$; 由图 2 可知, 宽顶堰溢流水面有两次跌落; 堰坎首端水面跌落是由于水流经过堰坎时, 在纵向受到边界的约束, 过流断面面积减小, 流速增大, 势能减小。水面最大跌落处形成收缩断面 $C-C$; 而后, 由于堰顶阻力, 使水面形成壅水曲线, 逐渐接近堰顶断面的临界水深。下游水位较低, 在堰坎末端再次出现跌落。当下游水位大于堰高后, 随着下游水位超过堰顶水深幅度的增大, 堰顶在收缩断面后发生波状水跃, 但这时下游水深并不影响收缩断面水深; 当 h_s 大于堰顶收缩断面水深的跃后共轭水深时, 成为淹没出流, 下游水深将影响堰顶水位变化, 堰上水位被壅高, 堰顶呈缓流, 见图 3。实验研究得出 $h_s/H_0 = 0.8$ 是宽顶堰是否淹没的判别条件, 在以下内容中会通过试验数据得出这一比值。

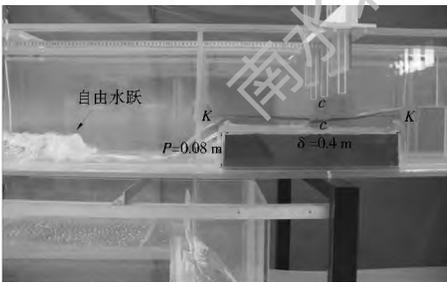


图2 自由出水跃

Fig. 2 Hydraulic jump of free flow

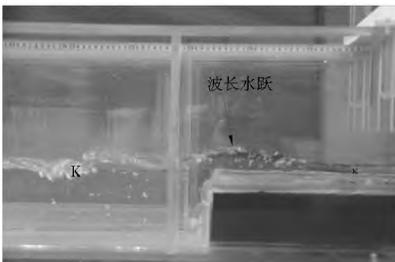


图3 淹没式水跃

Fig. 3 Hydraulic jump of submerged flow

图 4(a) - 图 4(d) 四幅图为计算模型 1.04 s、2.66 s、3.98 s、9.98 s 四个时刻的水流形态。二维宽顶堰溢流模型初始状态中水面线高度为 0.145 m, 在水流达到稳定状态前, 堰前水面线的变化可明显体现出宽顶堰对水流的影响^[16], 见图 4(a) 中断面 6.92 m 处。当计算模型达到稳定状态后, 水面线在宽顶堰前基本保持平行而且有壅高现象, 宽顶堰阻碍作用得到了体现, 见图 4(b) 和图 4(c) 中断面 6.8~7.0 m 处; 堰顶水流出现了第一次跌落之后, 随后的水面线与堰顶基本保持平行, 计算模型在出堰后成功地展示了出堰流的第二次跌落和宽顶堰末端有回流区现象的存在, 见图 4(b) 和图 4(c) 中断面 7.2~7.6 m 处。这些特性与已知的试验模型宽顶堰堰流特性非常相符。并且从图 4(a) - 图 4(c), 可明显看出自由出流的水跃现象; 图 4(d) 呈现出淹没出流时的水流流态, 由图 4(d) 可得, 淹没出流的水面曲线变化平缓近乎和堰顶平等, 在堰出口处, 下游水深稍有回升, 所以堰下游水位稍高于堰顶水位; 在断面 7.5 m 处还有波状水跃, 由于计算模型入流方式为“大水箱”方式, 在 9.98 s 时, 水位有一定的下降, 故波状水跃现象呈现的并不十分明显。

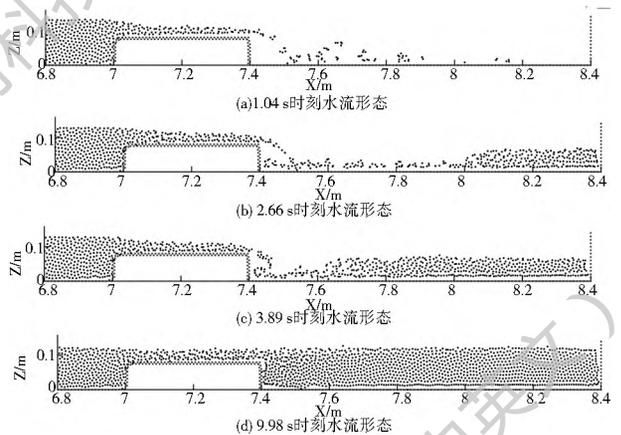


图4 不同时刻水流流态

Fig. 4 Flow regime at different time

2.2.2 流量及流速

试验模型流量通过直角形三角薄壁量水堰来测量, 公式如下:

$$Q = 1.365H^{2.48} \quad (11)$$

其中: $H = H_1 - H_2$ 。在与本文二维计算模型相同水头下, 试验模型数据为: $Q = 6.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$; 单宽流量 $Q_{\text{单}} = Q/B = 4.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$; 下游水位超过堰顶水深 $h_s = 0.056 \text{ m}$, 堰前断面平均流速 $v_0 = Q/A = 0.19 \text{ m/s}$, 故 $h_s/H_0 = 0.84$, 据此可说明发生了淹没出流。

计算模型流量采用积分求和方式, 步骤如下。

(1) 首先从结果文件中选取计算断面的水平流速, 选取方法为: 先从结果文件中读取计算断面上水平速度以及竖直坐标, 读取依据为水平坐标是否等于设定的计算断面位置; (2) 选取数据之后, 将水平速度和竖直坐标按竖直坐标进行排序, 然后根据公式 (12) 进行计算, 见图 (5)。

$$Q = \frac{1}{2} \int_{i=1}^{N-1} (v_i + v_{i+1}) dz \quad (12)$$

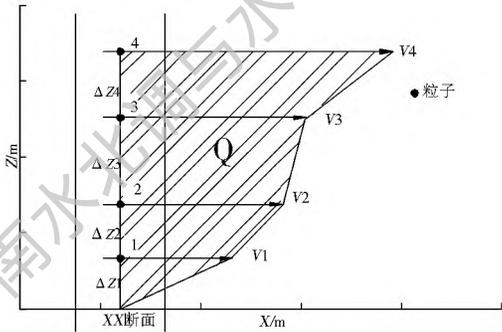


图 5 二维模型流量计算

Fig. 5 Flow calculation of two dimensional model

流量计算断面选为 $x = 6.75 \text{ m}$, 距离堰前端 $\Delta x = 0.25 \text{ m}$, $\Delta x/H = 3.8$; 计算结果见图 (6)。

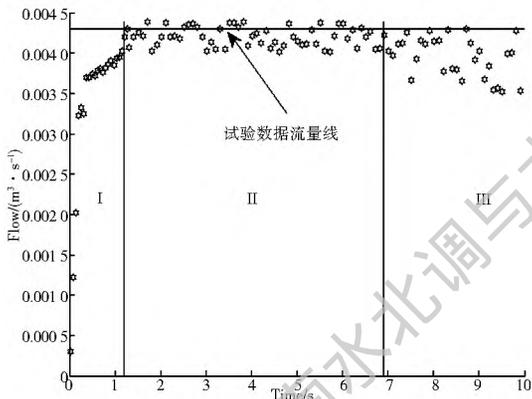


图 6 6.7 m 断面流量变化

Fig. 6 Flow change on section 6.7 m

二维计算模型中, 当 $t < 1.2 \text{ s}$, 模型刚开始运行, 还未达到稳定状态, 其流量变化幅度比较大, 即图 6 中 I 区; 当 $1.2 \text{ s} < t < 6.9 \text{ s}$ 时, 模型运行稳定, 粒子参数变化范围小, 计算流量与试验数据的单宽流量相差不大, 即图 6 中 II 区; 当 $t > 6.9 \text{ s}$ 后, 随着模型运行, 计算模型并没有维持恒定水位, 故计算流量有一定程度的下降, 即图 6 中 III 区。

图 7 展示了堰前断面 6.75 m 在 $t = 2.66 \text{ s}$ 流速变化情况, 由图可知, 在初始状态中入口处水流速度很稳定, 所以从渠底到堰高这段距离内, 流速分布比较均匀; 从堰高至水流表面, 水流速度变化幅度很大。对数据进行拟合, 可得变化曲线为三次方程。由于计算粒子数目有限并且一些参数设定带来的计

算误差等原因, 并没有得到流速分布的对数方程; 不过断面上流速的变化趋势与对数方程很相似。图 8 展示了堰上断面 7.2 m 在 $t = 2.66 \text{ s}$ 的流速变化情况, 该断面上流速明显比 6.75 m 断面上流速大, 主要是由于过流断面面积变小。

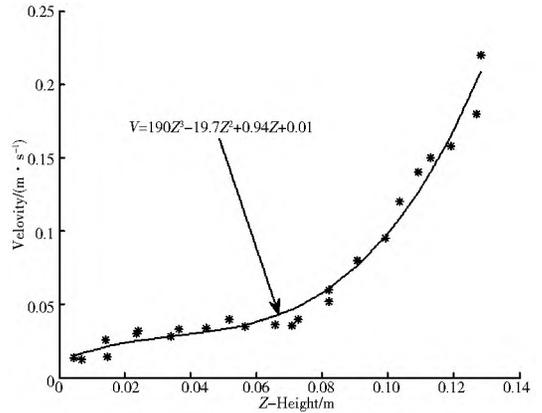


图 7 $t = 2.66 \text{ s}$ 时刻 6.75 m 断面流速分布

Fig. 7 Velocity distribution on section 6.7 m at 2.66 s

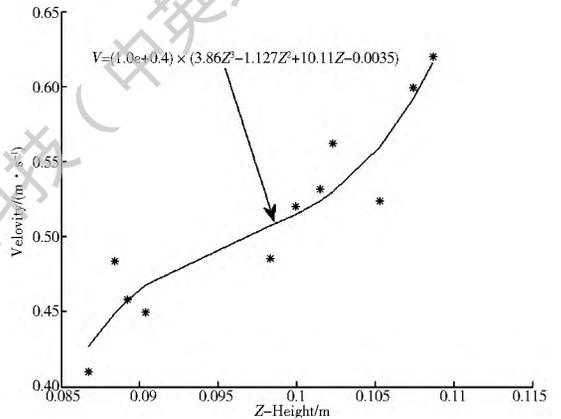


图 8 $t = 2.66 \text{ s}$ 时刻 7.2 m 断面流速分布

Fig. 8 Velocity change on section 7.2 m at 2.66 s

图 9 展示了在 $t = 2.66 \text{ s}$, 从断面 6.75 m 到断面 7.5 m 上平均流速变化情况。由图可得, 断面 6.75 m 至断面 7.0 m 属于堰前, 流速变化不大, 分布比较均匀, 有稍微的增长趋势; 断面 7.0 m 至断面 7.4 m 属于堰上断面, 流速快速增长, 变化趋势为先增大后减小, 最大值在断面 7.2 m 上; 原因是随着堰上断面面积变小, 水流动能增加, 势能减小, 并且断面 7.2 m 为收缩断面, 收缩断面之后水深有一定的增长, 水面线与堰顶基本保持平行。断面 7.4 m 至断面 7.5 m 属于堰后, 流速变大, 是由于水流势能减小, 动能增加。从图 7 图 8、图 9 可看出, 流速存在一定的震荡现象, 主要原因是: (1) 计算粒子数目不足, 导致结果数据过少; (2) 并没有实现恒定流的入流方式, 使水头在逐渐减小。(3) 模型参数设置上还未达到最佳, 还需进一步调试。

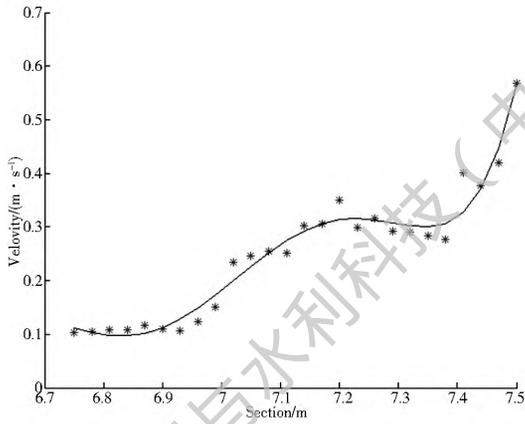
图9 $t = 2.66\text{ s}$ 时刻 6.75~7.5 m 断面流速变化

Fig.9 Velocity change from section 6.75 m to 7.5 m section at 2.66 s

3 结语

本文采用SPH方法对宽顶堰溢流进行了数值模拟, 得出了宽顶堰溢流流态、流量、流速并且观察到了水面跌落、回流区、水跃等现象, SPH方法模拟数值结果与试验数据相近以及所得到的撞击、翻卷及碎波的形态、大小和位置都与实验观察吻合, 证明了SPH方法在模拟自由水面出流方面的独特优势。由于“入流”问题的存在, 对模拟结果带来了一定的误差, 在断面流速变化图上可以看到; 若模型保持水位恒定, 模拟所得的断面流速变化曲线将满足对数方程。本文利用集群进行并行计算, 计算效率高, 节约了计算时间。

在下一步的研究中, 建立三维模型和解决入流问题, 使模拟结果与实际更相近以及水流形态与实验观察更吻合, 使SPH方法在水动力学方面得到了更广泛的应用。

参考文献(References):

- [1] Gong K, Liu H, Wang B L. Water entry of a wedge based on SPH model with an improved boundary treatment [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21 (6): 750-757. DOI: 10.1016/S1001-6058(08)60209-7
- [2] Chen S, Zhou D, Bao Y, et al. A method to improve first order approximation of smoothed particle hydrodynamics [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2008, 13(2): 136-138. DOI: 10.1007/s12204-008-0136-2
- [3] Xu J X, Liu X L. Analysis of structural response under blast loads using the coupled SPH-FEM approach [J]. Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 2008, 9(9): 1184-1192. DOI: 10.1631/jzus.A0720080
- [4] Zeng J B, Jiang F M, Chen Z. A pore scale smoothed particle hydrodynamics model for lithium ion batteries [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59 (23): 2793-2810. DOI: 10.1007/s11434-014-0354-y
- [5] Mao Y M, Fang Q, Zhang Y D, et al. Numerical simulation of water mitigation effects on shock wave with SPH method [J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14: 387-390. DOI: 10.1007/s12209-008-0066-y
- [6] Liu M B, Shao J R, Chang J Z. On the treatment of solid boundary in smoothed particle hydrodynamics [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55: 244-254. DOI: 10.1007/s11434-011-4663-y
- [7] 强洪夫, 刘虎, 陈福振, 等. 基于SPH方法的射流撞击仿真[J]. 推进技术, 2012, 33(3): 424-429. (QIANG Hong-fu, LIU Hu, CHEN Fu-zhen, et al. Simulation on jet impingement based on SPH method [J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(3): 424-429. (in Chinese) DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2012.03.019)
- [8] 缪吉伦, 赵万星, 黄成林. SPH法模拟立面二维溃坝流动应用研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2012, 31(1): 121-123. (MIAO Ji-lun, ZHAO Wan-xing, HUANG Cheng-lin. Application of vertical two dimensional dam break simulated by SPH Method [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2012, 31(1): 121-123. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2012.01.30)
- [9] 张驰, 张雨新, 万德成. SPH方法和MPS方法模拟溃坝问题的比较分析[J]. 水动力学研究与进展, 2011, 26(6): 736-745. (ZHANG Chi, ZHANG Yu-xin, WAN De-cheng. Comparative study of SPH and MPS methods for numerical simulations of dam breaking problems [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 26(6): 736-745. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2011.06.013)
- [10] 陈福振, 强洪夫, 高巍然. 风沙运动问题的SPH-FVM耦合方法数值模拟研究[J]. 物理学报, 2014, 13: 1302021-13020213. (CHEN Fu-zhen, QIANG Hong-fu, GAO Wei-ran. Simulation of aerolian sand transport with SPH-FVM coupled method [J]. Journal of Physics, 2014, 13: 1302021-13020213. (in Chinese) DOI: 10.7498/aps.63.130202)
- [11] 孙贤贤, 彭延军. 基于SPH的管道内液压油可视化仿真研究 减晓惠[J]. 软件导刊, 2014, 13(12): 19-22. (SUN Xian-xian, PENG Yan-jun. Visual simulation of hydraulic oil in pipeline based on SPH [J]. Software Guide, 2014, 13(12): 19-22. (in Chinese) DOI: 10.11907/rjdk.143589)
- [12] 王利平, 王建国, 裴信超, 等. 喷丸残余应力场SPH/FEM耦合建模与仿真[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2014, 35(6): 108-111. (WANG Li-ping, WANG Jian-guo, PEI Xin-chao, et al. Numerical simulating for residual compressive stress of shot peening based on SPH coupled FEM [J]. Journal of Zhengzhou University, 2014, 35(6): 108-111. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1671-6833.2014.06.026)
- [13] 袁军, 王景立. 基于SPH/FEM法的土壤深松过程仿真研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(32): 11580-11581. (YUAN Jun, WANG Jing-li. Simulation of soil deep loosening process based on SPH/FEM method [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(32): 11580-11581. (in Chinese) DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2014.32.129)

(下转第137页)

- local scour at two adjacent cylinders [J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 70(4): 131-147.
- [4] 韦雁机, 叶银灿, 吴珂, 等. 桩周局部冲刷三维数值模拟[J]. *海洋工程*, 2009, 27(4): 61-66. (WEI Yanji, YE Yincan, WU Ke, et al. 3D numerical modeling of flow and scour around a circular pile [J]. *The Ocean Engineering*, 2009, 27(4): 61-66. (in Chinese))
- [5] 祝志文, 刘震卿. 圆柱形桥墩周围局部冲刷的三维数值模拟[J]. *中国公路学报*, 2011, 24(2): 42-48. (ZHU Zhiwen, LIU Zhenqing. Three dimensional numerical simulation for local scour around cylindrical bridge pier [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2011, 24(2): 42-48. (in Chinese))
- [6] Van Rijn L C. Sediment Pick-Up Functions[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1984, 110(10): 1494-1501.
- [7] Melville B W, Raudkivi A J. Flow characteristics in local scour at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1977, 15(4): 373-380.
- [8] Sarker M A. Flow measurement around scoured bridge piers using acoustic Doppler velocimeter [J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 1998, 9(4): 217-227.
- [9] Escarriaza C, Sotiropoulos F. Initial stages of erosion and bedform development in turbulent flow past a bridge pier [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2011, 116(F3): 130-137.
- [10] Escarriaza C, Sotiropoulos F. Lagrangian model of bedload transport in turbulent junction flow [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, 666: 36-76.
- [11] Kirkil G, Constantinescu S G, Ettema R. Detached eddy simulation investigation of turbulence at a circular pier with scour hole [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 135(11): 888-901.
- [12] Guo J, Julien P Y. Shear stress in smooth rectangular open channel flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 131(1): 30.
- [13] Dey S. Experimental Study on Incipient Motion of Sediment Particles on Generalized Sloping Fluvial Beds [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2001, 16(3): 391-398.
- [14] Hager W H. Scour in hydraulic engineering [J]. *Water Management*, 2007, 160(3): 159-168.
- [15] Dargahi B. Controlling mechanism of local scouring [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1990, 116(10): 1197-1214.
- [16] Simpson R L. Junction flows [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2001, 33: 415-430.
- [17] Fleming J, Simpson R, Devenport W. An experimental study of a turbulent wing body junction and wake flow [J]. *Exp Fluids* 1993; 14: 366-378.
- [18] Olcmen M, Simpson R. Influence of wing shapes on surface pressure fluctuations at wing body junctions [J]. *AIAA Journal*, 1994, 32: 615.
- [19] Simpson R L. Junction flows [J]. *Ann Rev Fluid Mech*, 2001, 33: 415-431.

(上接第 131 页)

- [14] Tan J, Yang X B. Physically-based fluid animation: a survey [J]. *Science in China Series F: Information Sciences*, 2009, 52(5): 723-740. DOI: 10.1007/s11432-009-0091-zv.
- [15] 姜峰, 唐晓成. 基于 SPH 方法的开口沉箱水动力数值研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(6): 78-83. (JIANG Feng, TANG Xiaocheng. Hydrodynamic numerical analysis of perforated caisson based on SPH method [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2014, 12(6): 78-83. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nslr
- 2014.06.018
- [16] 许晓阳, 任胜章, 邓方安. 三维溃坝流的光滑粒子动力学方法模拟 [J]. *计算力学学报*, 2016, 33(5): 676-681. (XU Xiaoyang, REN Shengzhang, DENG Fang'an. Numerical simulation of 3D dam-break flow using smoothed particle hydrodynamics [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, 33(5): 676-681. (in Chinese) DOI: 10.7511/jslx201605044