基于SPH的大坝泄流过程仿真分析

何鲜峰^{1,2*}, 汪自力^{1,2}, 张健锋³, 何启⁴

1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 工程力学研究所, 郑州 450003;

2. 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 郑州 450003;

3. 三门峡黄河明珠集团有限公司, 三门峡 472000;

4. 河海大学水电学院, 南京 210098

* E-mail: hexf7403@126.com

收稿日期: 2017-11-21; 接受日期: 2018-05-02; 网络版发表日期: 2018-10-18

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFC0401610)、水利公益性行业科研专项(编号: 201401022)和黄河水利科学研究院基本科研业务费专项(编号: HKY-JBYW-2014-04, HKY-JBYW-2017-21)资助

摘要 采用SPH方法, 对溢流坝泄流过程进行了数值仿真. 通过人工黏度、固壁边界处理、弱可压缩状态方程的使用, 模拟了溢流坝泄流坝面水流演进、水舌空中变化、再入水过程, 以及下游水垫塘涌浪变化过程. 数值模拟结果和物理模型实验结果的对比分析表明, 数值模拟得到的水面线、抛射距离、水舌入水深度与物理模型实验结果基本相符, 说明基于SPH方法的数值模拟在一定程度上可以替代物理模型实验进行大坝泄流分析和优化设计.

关键词 SPH, 大坝泄流, 过程仿真, 优化设计

1 引言

溢流坝泄流过程仿真, 对优化堰面曲线及挑流方式, 改善坝面泄流流态、减少空蚀和磨蚀发生、削弱河床和岸坡冲刷具有重要意义. 目前常用的方法是水工模型验证^[1,2], 但物理模型实验周期长、费用高. 随着数值分析技术的发展, 将物理模型实验与数值仿真相结合, 通过物理模型实验校正数学模型参数, 利用数值模型建模方便、仿真周期短、成本低的特点, 可以比较高效地完成溢流坝设计验证工作. 当前大坝泄流计算主要仿真一般采用有限差分法、有限元法或有限体积法等, 但这些方法的弊端是在处理大变形、冲

击等问题时, 会由于局部计算网格变形过大, 造成网格扭曲、结果失真, 且网格重构与细化将消耗大量计算资源, 使得计算分析等工作难以进行^[3]. 光滑粒子动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)方法作为一种新近发展起来的纯拉格朗日无网格算法^[4], 它以核函数近似为基础, 将问题域离散化为任意分布的有质量粒子, 通过以相邻粒子的求和替代场函数积分表达式来对场函数进行近似, 从而将相关方程离散化. 由于SPH方法不仅简化了建模过程, 而且避免了高维拉氏网格法中的网格扭曲, 已被广泛用于流体、固体及其耦合作用的模拟中, 并取得满意的成果^[5-11]. 本文利用SPH方法, 对大坝溢流坝泄洪过程进行仿真, 并得

引用格式: 何鲜峰, 汪自力, 张健锋, 等. 基于SPH的大坝泄流过程仿真分析. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 109–114

He X F, Wang Z L, Zhang J F, et al. Simulation analysis of dam discharge process based on smooth particle hydrodynamics (SPH) (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 109–114, doi: 10.1360/N092017-00403

到溢流坝的水面线、坝面压力、抛射距离, 并与物理模型实验进行了对比, 相关数据表明, SPH过程仿真与物理模型实验成果符合较好。

2 SPH算法基本原理

2.1 SPH算法控制方程

SPH方法中的每个粒子代表研究对象连续域的一个粒团, 这些粒子包含目标材料的物理性质, 如密度、速度、压力、能量等, 并遵循守恒控制方程以粒子所在位置的速度运动。SPH方法的上述处理方式是一种典型的拉格朗日方法。针对流体力学问题, 相应的拉格朗日控制方程可利用N-S方程表示如下。

连续方程

$$\frac{d\rho}{dt} = -\frac{\partial \mathbf{v}^\beta}{\partial \mathbf{x}^\beta}, \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{d\mathbf{v}^\alpha}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}^{\alpha\beta}}{\partial \mathbf{x}^\beta} + \mathbf{T}, \quad (2)$$

能量方程

$$\frac{de}{dt} = -\frac{\boldsymbol{\sigma}^{\alpha\beta} \partial \mathbf{v}^\alpha}{\rho \partial \mathbf{x}^\beta}, \quad (3)$$

式中, ρ 为密度; t 为时间; $\mathbf{v}$ 为速度矢量 $\mathbf{v}=(v_x, v_y, v_z)$; $\mathbf{x}$ 为位置 $\mathbf{x}=(x, y, z)$; e 为能量; α, β 为坐标方向; $\mathbf{T}$ 为外力, 如重力 $\mathbf{g}$; $\boldsymbol{\sigma}$ 为总应力张量, 包括压力 $\mathbf{p}$ 和黏性应力 $\boldsymbol{\tau}$, 即

$$\boldsymbol{\sigma}^{\alpha\beta} = -\mathbf{p}\delta^{\alpha\beta} + \boldsymbol{\tau}^{\alpha\beta}, \quad (4)$$

其中, δ 为狄拉克函数。

2.2 SPH离散化控制方程

在工程应用中, 为便于编程, SPH方法需要把连续函数离散化为粒子表达形式, 对连续函数 $f(\mathbf{x})$, 其离散表达式可表示为

$$f(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^N m_j \frac{f_j}{\rho_j} W_{ij}, \quad (5)$$

$$\nabla f(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f_j(\mathbf{x}_j) \nabla_i W_{ij}, \quad (6)$$

式中, f 为与位置 $\mathbf{x}=(x, y, z)$ 相关的待求函数, N 为粒子 i 的支持域内的粒子总数; m_j 为粒子 j 的质量; $W_{ij}=W(\mathbf{x}_i$

$-\mathbf{x}_j, h)$ 为光滑函数, $\nabla_i W_{ij} = \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j}{r_{ij}} \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial r_{ij}}$, r_{ij} 为粒子 i 与粒子 j 之间距离, h 为光滑长度。

根据式(5)和(6), 式(1)~(3)利用SPH方法可离散化为如下方程。

连续方程

$$\frac{d\rho_i}{dt} = -\sum_{j=1}^N m_j (\mathbf{v}_i^\alpha - \mathbf{v}_j^\alpha) \frac{\partial W_{ij}}{\partial \mathbf{x}_i^\alpha}, \quad (7)$$

动量方程

$$\frac{d\mathbf{v}_i^\alpha}{dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\boldsymbol{\sigma}_i^{\alpha\beta}}{\rho_i^2} + \frac{\boldsymbol{\sigma}_j^{\alpha\beta}}{\rho_j^2} \right) \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial \mathbf{x}_i^\beta} + \mathbf{T}_i, \quad (8)$$

能量方程

$$\frac{de_i}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{\mathbf{p}_i}{\rho_i^2} + \frac{\mathbf{p}_j}{\rho_j^2} + \varphi_{ij} \right) \cdot \mathbf{v}_{ij}^\beta \cdot \frac{\partial W_{ij}}{\partial \mathbf{x}_i^\beta}, \quad (9)$$

式中, $\mathbf{v}_{ij}^\beta = \mathbf{v}_i^\beta - \mathbf{v}_j^\beta$, $\mathbf{p}$ 为粒子压力, φ_{ij} 为黏度, 分别采用式(10)和(11)计算。

$$\mathbf{p} = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right], \quad (10)$$

$$\varphi_{ij} = \begin{cases} \frac{-9c_{ij}\mu_{ij}}{\rho_{ij}}, & \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij} < 0, \\ 0, & \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{r}_{ij} > 0, \end{cases} \quad (11)$$

其中, γ 为常数, 一般取 $\gamma=7$, ρ_0 为初始密度, B 为压力最大改变量, 一般取初始压力, 式(10)用于消除自由表面流仿真过程中出现的边缘效应; θ 为常数, 一般取值在

$$1.0 \text{ 左右, } c \text{ 为计算声速, } c_{ij}=0.5(c_i+c_j), \mu_{ij} = \frac{h_{ij} \mathbf{v}_{ij} \cdot \mathbf{x}_{ij}}{|\mathbf{x}_{ij}| + 0.1h_{ij}^2},$$

$$h_{ij}=0.5(h_i+h_j).$$

本文使用的核函数为三次样条函数:

$$W(r, h) = \begin{cases} 1 - \frac{3}{2} \left(\frac{r}{h} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{r}{h} \right)^3, & 0 \leq \frac{r}{h} < 1, \\ \frac{1}{4} \left(2 - \frac{r}{h} \right)^3, & 1 \leq \frac{r}{h} < 2, \\ 0, & \frac{r}{h} \geq 2, \end{cases} \quad (12)$$

式中, $b = \frac{10}{7\pi h^2}$ (2D模式)、 $b = \frac{10}{\pi h^3}$ (3D模式)。

2.3 邻域搜索

SPH算法在每个时间步更新粒子状态时, 都需要锁定每个粒子支持域内有哪些粒子, 为此需要进行邻域粒子搜索. 当计算模型包含的粒子总量很大时, 邻域粒子搜索将耗费大量时间. 目前常用的邻域搜索方法有配对搜索法、链表搜索法和树形搜索法3种^[12~14]. 本文采用链表搜索法, 该方法在问题域上虚设一张网格, 网格间距与核函数的支持域 kh 一致. 对每个粒子, 其相邻粒子只可能位于同一网格或周边相邻网格内, 通过链表优化算法, 可以较快实现邻域粒子搜索.

2.4 边界处理

SPH算法中, 由于边界及其附近粒子在积分时的邻域范围受边界影响被截断, 导致这些粒子的计算结果存在不同程度的失真, 因此SPH方法不适用于整个计算范围, 必须对边界条件进行处理. 目前处理边界条件的方式有动态压力边界条件^[15,16]、排斥力边界条件^[17]和周期边界条件, 本文采用动态压力边界条件进行边界处理. 这种处理方式令边界粒子具有与流体粒子相同的控制方程, 但粒子位置保持固定或随外部强制条件(如闸门)移动. 边界粒子以交错方式排列(图1). 由式(7)可知, 当流体粒子接近边界时, 粒子的密度将随着液固粒子间距离的减小而增加, 结合式(10)可知, 此时粒子所受压力随之增加, 动量方程中的压力项也随之增加, 粒子间作用力随液体粒子与边界粒子距离的减小迅速增大^[18](图2), 液固粒子间的这种作用过程可以有效避免流体粒子穿透边界.

图1 (网络版彩图)边界粒子交错排列示意图

图2 粒子接近边界压力变化过程

3 算例

3.1 泄流过程模拟

某水库大坝为混凝土重力坝, 最大坝高125.0 m, 采用溢流坝表孔泄洪, 挑流消能. 水库设计洪水位548.55 m, 相应下游水位462.00 m. 计算采用的水密度 $\rho_{\text{水}}$ 和计算声速 c 分别为1000 kg/m³和10 m/s. 考虑到若上游水库计算长度 $l_{\text{上}}$ 设置过短, 上游水位迅速下降, 影响计算精度, 若上游水库计算长度设置过长, 水粒子数量激增, 会严重影响计算速度. 为此, 分别取 $l_{\text{上}}$ 为50, 100, 150和200 m分别进行试算. 通过比较, 发现当 $l_{\text{上}}$ =200 m时, 既不会因上游水库粒子数量激增导致计算缓慢或系统崩溃, 也不会由于上游水位快速下降影响计算精度, 故本文计算取 $l_{\text{上}}$ =200 m. 此外, 考虑到堰顶高程以下库水对堰面流态影响不大, 因此上游水体取堰顶下2.0 m以上部分. 为模拟坝后挑流和涌浪形态, 自挑流鼻坎末端向下游计算长度为280 m. 本次模拟的是水库在特定水位, 开启溢流坝堰顶闸门时的泄流过程. 溢流坝不同时间步的水流及坝后涌浪形态见图3(因篇幅所限, 模拟长度未完整显示). 由图3可知, SPH算法比较直观地模拟了溢流坝泄洪过程, 并可以动态模拟坝后涌浪和水舌抛射距离. 但图3也反映出泄水初期坝面流态明显不稳, 从而造成水舌在空中出现波动.

此外, 针对该溢流坝还开展了系列水工模型试验. 模型孔宽13 m, 堰顶高程和坝顶高程分别为532和553 m, 坝面反弧半径取26 m, 上下游水位分别取548.55和462.00 m, 均与计算值相同, 坝址上游库区模拟长度500 m, 模型比例为1:100. 模型溢流坝采用混凝土制作, 闸墩用木材制作. 在溢流坝面及反弧面不同位置安装有26个压力观测点. 试验时模型上游水库通过量水堰持续补水. 模型试验水面线及坝面压力见图4(图中坝面压力为折算后相对坝面的水头). 由于泄水初期流态不稳定, 观测不便, 故未对泄水初期的物理

图 3 (网络版彩图)溢流坝泄洪不同时刻水流形态

模型、数学模型流态变化进行比较。

3.2 泄流水面线与挑距

基于SPH数值计算和物理模型实验得到的坝面水流及挑流水舌水面线见图4(a)。由图4(a)可知,数值计算得到的大坝泄流水面线、挑流水舌形态与模型实验成果基本一致。坝前水库部分,数值计算得到的水面线略低于模型实验值,这是由于数值计算时,坝前水库模

拟长度有限,上游没有持续来水补给造成的;坝面水面线计算值与实验值一致性较好;在溢流坝末端,下泄水流被挑流鼻坎挑起,形成水舌,计算水舌和实验水舌形态相符,但计算水舌位置偏上,这与计算时未考虑高速水舌与空气的相互作用有关。

分别采用规范公式计算、SPH计算和模型实验得到的泄流挑距分别为183, 172, 168 m。数据显示,3种方法中利用规范公式计算的泄流挑距最大,模型试验值

图 4 大坝泄流水面线(a)和坝面水压分布图(b)

最小, 基于SPH算法求得的挑距介于规范法和模型实验值之间, 但更贴近于实验值。

3.3 坝面压力

模型实验和SPH计算得到的坝面压力分布曲线见图4(b)。图中曲线表明, SPH计算得到的坝面压力与模型实验值变化趋势基本一致, 从堰顶至约2/3坝高位置, SPH计算的坝面水压略大于模型实验值, 自2/3坝高位置至接近反弧段最低点, SPH计算值略小于模型试验值, 反弧段最低点至挑流鼻坎末端, SPH计算值与模型试验值基本相同。SPH计算值与模型实验值存在不同程度的误差, 这种误差一方面来自算法自身, 另一方面来自计算模型粒子间距设置, 本次计算初始粒子间距为1.0 m, 对粒子间距进一步优化, 有助于提高模型

精度, 但会相应增加时间成本。

4 结论

(1) 通过基于SPH算法的溢流坝泄流过程模拟, 较完整地得到了坝面泄流过程流态变化以及下游挑流入水和涌浪变化。

(2) 通过与物模实验结果的对比分析, 验证了SPH算法的可靠性和可行性。结果表明, SPH算法得到的水舌跳距与物模试验相差不大, 水面线和坝面压力分布与物理模型实验基本一致, 可供物模实验参考。

(3) 在溢流坝选型优化过程中, 把SPH数值模拟与物模实验相结合, 可快速进行方案筛选, 有助于提高效率、降低成本。

参考文献

- 1 中华人民共和国水利部. 混凝土重力坝设计规范(SL319-2005). 2005
- 2 水利水电规划总院. 混凝土重力坝设计规范(NB/T 35026-2014). 2014
- 3 徐志宏, 汤文辉, 罗永. 光滑粒子模拟方法在超高速碰撞现象中的应用. 爆炸与冲击, 2006, 1: 53-58
- 4 Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. Astron J, 1977, 82: 1013-1024
- 5 Liu G R. Mesh Free Methods-Moving Beyond the Finite Element Method. Boca Raton: CRC Press, 2009
- 6 杨秀峰, 彭世铎. 溃坝流的光滑粒子法模拟. 计算物理, 2010, 2: 173-180
- 7 刘谋斌, 宗智, 常建忠. 光滑粒子动力学方法的发展与应用. 力学进展, 2011, 2: 217-234
- 8 周光正, 葛蔚, 李静海. 传统光滑粒子动力学方法的适用性分析. 科学通报, 2013, 15: 1414-1421
- 9 Crespo A J C. Application of the smoothed particle hydrodynamics model SPHysics to free-surface hydrodynamics. Dissertation for Doctoral Degree. Galician: Universidade de Vigo, 2008
- 10 Toosi S L R, Ayyoubzadeh S A, Valizadeh A. The influence of time scale in free surface flow simulation using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). KSCE J Civ Eng, 2015, 19: 765-770
- 11 Wang D, Zhou Y, Shao S. Efficient implementation of smoothed particle hydrodynamics (SPH) with plane sweep algorithm. Commun Comput Phys, 2016, 19: 770-800
- 12 Monaghan J J, Gingold R A. Shock simulation by the particle method SPH. J Comput Phys, 1983, 52: 374-389
- 13 Monaghan J J. Particle methods for hydrodynamics. Comput Phys Rep, 1985, 3: 71-124
- 14 Rhoades Jr. C E. A fast algorithm for calculating particle interactions in smooth particle hydrodynamic simulations. Comput Phys Commun, 1992, 70: 478-482
- 15 Monaghan J J. Simulating free surface flows with SPH. J Comput Phys, 1994, 110: 399-406
- 16 Monaghan J J, Kos A. Solitary waves on a cretan beach. J Waterway Port Coast Ocean Eng, 1999, 125: 145-155
- 17 Crespo A J C, Gómez-Gesteira M, Dalrymple R A, et al. Boundary conditions generated by dynamic particles in SPH methods. Comput Mater Contin, 2007, 5: 173-184
- 18 Gómez-Gesteira M, Rogers B D, Dalrymple R A, et al. User guide for the SPHysics code. Manchester: University of Manchester, 2010. 1-106

Simulation analysis of dam discharge process based on smooth particle hydrodynamics (SPH)

HE XianFeng^{1,2}, WANG ZiLi^{1,2}, ZHANG JianFeng³ & HE Qi⁴

¹ Department of Civil Engineering Mechanics, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China;

² MWR Center for Levee Safety and Disease Prevention Engineering and Technology Research, Zhengzhou 450003, China;

³ Sanmenxia Yellow River Pearl Group Co., LTD, Sanmenxia 472000, China;

⁴ College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

The numerical simulation of spillway discharge process is carried out by smoothed particle hydrodynamics (SPH) method. Through the artificial viscosity, the boundary treatment, and the weakly compressible state equation, the evolution of water flow, the change of water tongue, the process of water reentry, and the variation process of the surge in the downstream plunge pool are simulated. The comparison between numerical simulation results and physical model test results show that the numerical simulation of surface line, throwing distance, underwater penetration of water tongue and the physical model test results are basically consistent. It explains that numerical simulation based on SPH method can substitute the physical model test for dam discharge analysis and optimization design to a certain extent.

SPH, dam discharge, process simulation, optimization design

doi: [10.1360/N092017-00403](https://doi.org/10.1360/N092017-00403)