

二维水动力学模型在蓄滞洪区洪水演进模拟分析中的应用

李允军¹, 徐 青¹, 周元斌², 吉庆伟², 向小华³

(1. 南瑞集团有限公司, 江苏 南京 210003; 2. 江苏省骆运水利工程项目管理处, 江苏 宿迁 223800;
2. 河海大学, 江苏 南京 210003)

摘要: 在黄墩湖滞洪区建立二维浅水流洪水演进模拟模型, 采用基于有限体积法的数值求解, 了解蓄滞洪区洪水波运动传播特性, 有效捕捉洪水间断波。模拟不同组合分流方式下洪水演进过程, 水量是守恒的, 统计洪水淹没历时、淹没范围、淹没水深等致灾参数均比较合理, 对蓄滞洪区的科学运用和防洪减灾具有指导意义。

关键词: 二维水动力学模型; 有限体积法; 洪水演进分析; 蓄滞洪区

中图分类号: TV12 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2018) 12-0068-05

Application of 2-D hydrodynamic model on flood routing simulation analysis in flood storage and detention area

LI Yunjun¹, XU QING¹, ZHOU Yuanbin², JI Qingwei², XIANG Xiaohua³

(1. Nanrui Group Co., Ltd., Nanjing 210003, Jiangsu;
2. Luoyun Hydraulic Project Management Division of Jiangsu Province, Suqian 223800, Jiangsu;
3. Hohai University, Nanjing 210003, Jiangsu)

Abstract: two-dimensional model for shallow water flood routing simulation of Huangdun Lake detention area was established. The numerical solution based on the finite volume method was adopted to understand the characteristics of flood wave motion and propagation in the flood storage and detention area and effectively capture the intermittent flood waves. The simulation of flood routing process under different combinations of diversion modes showed that the water volume was conservative. The statistical parameters of flood submergence duration, submergence range and submergence depth were reasonable, which was of guiding significance to the scientific application of flood storage and detention areas and flood control and disaster reduction.

Key words: 2-D hydrodynamic model; finite volume method; flood routing analysis; flood storage and detention area

1 概述

洪水时空迁移、波动特性复杂, 加之近年来

极端性气候频发, 水文情势多变, 影响了洪水调度决策的科学性。开展洪水演进规律研究, 对于蓄滞洪区的科学运用和防洪减灾具有重要的指导意义

收稿日期: 2018-04-26

作者简介: 李允军 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文水资源相关工作。

义。

国内外洪水淹没分析方法经历了从根据历史洪灾调查资料勾画洪水范围, 到采用水文学和水力学方法建立数学模型模拟洪水演进过程获得丰富的洪水水力特征值的过程。二维水动力学模型用于蓄滞洪区、堤防保护区等洪水风险分析始于 20 世纪末^[1], 结合当时的最新技术, 中国水利水电科学研究院研发了基于二维不规则网格和有限体积法的二维水动力学模型软件。采用二维数学模型能够提供更加详细的水情信息, 目前国内外越来越注重采用水力学方法进行数值模拟。

2 二维水动力学模型

2.1 基本方程

河流平面二维水动力学模型基本方程^[2]为:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2 + gh^2/2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} &= \\ -gh \frac{\partial zb}{\partial x} - g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} & \\ \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2 + gh^2/2)}{\partial y} &= \\ -gh \frac{\partial zb}{\partial y} - g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} & \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: h 为水深, g 为重力加速度, zb 为河底高程, n 为糙率系数, x 、 y 为纵向坐标和横向坐标, u 、 v 为垂向平均流速的纵向分量和横向分量。

令 $qu=hu$ 、 $qv=hv$, 将上述方程写成矢量形式^[3]如下:

$$\left\{ \begin{aligned} U = \begin{bmatrix} h \\ q_u \\ q_v \end{bmatrix} \quad F(U) = \begin{bmatrix} q_u \\ q_u^2/h + gh^2/2 \\ q_u q_v/h \end{bmatrix} \\ G(U) = \begin{bmatrix} q_v \\ q_u q_v/h \\ q_v^2/h + gh^2/2 \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} + S_{fx}) \\ gh(S_{0y} + S_{fy}) \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } S_{0x} &= -\frac{\partial zb}{\partial x}, \quad S_{0y} = -\frac{\partial zb}{\partial y}, \\ S_{fx} &= -\frac{n^2 q_u \sqrt{q_u^2 + q_v^2}}{h^{10/3}}, \quad S_{fy} = -\frac{n^2 q_v \sqrt{q_u^2 + q_v^2}}{h^{10/3}}, \end{aligned}$$

且 $U_t + F(U)_x + G(U)_y = S$ 。

定义雅可比矩阵 A_F 、 A_G :

$$\left\{ \begin{aligned} A_F(U) = \frac{\partial F}{\partial U} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a^2 - u^2 & 2u & 0 \\ -uv & v & u \end{bmatrix} \Rightarrow F(U)_x = \\ \frac{\partial F}{\partial U} \cdot U_x &= A_F(U) \cdot U_x \\ A_G(U) = \frac{\partial G}{\partial U} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -uv & v & u \\ a^2 - v^2 & 0 & 2v \end{bmatrix} \Rightarrow G(U)_y = \\ \frac{\partial G}{\partial U} \cdot U_y &= A_G(U) \cdot U_y \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中: $a = \sqrt{gh}$ 为静水中的波速。

由式(3)将式(2)写成非守恒形式即:

$$U_t + A_F(U) U_x + A_G(U) U_y = S \quad (4)$$

分析其特征结构, 计算特征值和相应的右特征向量分别为:

$$\text{特征值} \begin{cases} s_{F1} = u - a & s_{F2} = u & s_{F3} = u + a \\ s_{G1} = v - a & s_{G2} = v & s_{G3} = v + a \end{cases} \quad (5)$$

特征向量

$$\left\{ \begin{aligned} R_F^1 &= \begin{bmatrix} 1 \\ u - a \\ v \end{bmatrix} & R_F^2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} & R_F^3 &= \begin{bmatrix} 1 \\ u + a \\ v \end{bmatrix} \\ R_G^1 &= \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ v - a \end{bmatrix} & R_G^2 &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} & R_G^3 &= \begin{bmatrix} 1 \\ u \\ v + a \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

通常情况下(即 $h \neq 0$ 时)雅可比矩阵 A_F 、 A_G 的特征值 s_{F1} 、 s_{F2} 、 s_{F3} 、 s_{G1} 、 s_{G2} 、 s_{G3} 两两不相等, 说明式(2)、式(4)为双曲型方程组。

2.2 模型的数值解

模型的数值解法包括有限差法(FDM)、特征法(MOC)、有限元法(FEM)、有限体积法(FVM)等, FVM 将计算域划分成若干规则或不规则形状的单元或控制体。在计算出通过每个控制体边界沿法向输入(出)的流量和动量通量后, 对每个控制体分部进行水量和动量的平衡计算, 便得到计算时段末各控制体平均水深和流速。因此, FVM 正是对于推导原始微分方程所用控制体的回归, 与 FDM 和 FEM 的数值逼近相比, 其物理意义更直接明晰^[4-5], 其控制体示意图如图 1。

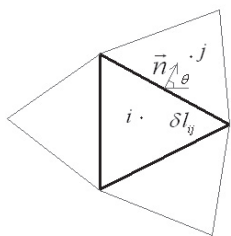


图 1 控制体示意图

在图 1 中的控制体上建立积分方程, 并进行离散, 可得控制体的离散形式:

$$\Delta U_i = -\frac{\Delta t}{\Delta V_i} \sum_{j=1}^N \delta l_{ij} H_{ji} \cdot n_{ij} + \Delta t S_i \quad (7)$$

式中: ΔV_i 为控制体 i 的面积, N 为控制体的界面数, $S_i = \frac{1}{\Delta V_i} \int_{V_i} S dV$ 为源项 S 在控制体 i 上的平均值, δl_{ij} 为控制体 i 、 j 之间的界面长度。

2.3 定解条件

2.3.1 初始条件

二维模型给定各计算网格点上水位、流速初值:

$$\begin{aligned} h(x, y)|_{t=0} &= h_0(x, y) & u(x, y)|_{t=0} &= u_0(x, y) \\ v(x, y)|_{t=0} &= v_0(x, y) & s(x, y)|_{t=0} &= s_0(x, y) \end{aligned} \quad (8)$$

2.3.2 边界条件

固壁边界为:

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

开边界给定水位过程线:

$$H=H(t) \quad (10)$$

2.3.3 模型计算的条件设定

(1) 初始条件设定

网格产生以后, 必须给各个计算单元赋予初始状态。初始条件可以是网格结点的初始水面高程或水深, 或者 x 、 y 方向上的初始流速。初始条件的规定, 一是根据问题的物理需求, 如静水或均匀流; 二是根据部分地点的观测数据, 所缺空间分布由内插估计。常设初始流动为已达平衡态的恒定流, 初始条件的误差随着时间会很快衰减^[6]。

(2) 边界条件设定

边界可分为 2 类: 一是陆边界 (闭边界), 是实际存在的, 是水域与陆地或器壁的交界面; 二是水边界 (开边界), 是人为规定的, 是截取的一部分水体所形成的有界计算域。与初始条件相比,

边界条件对数值计算的结果影响很大。边界处理的 2 个基本要求是: 使计算问题在数学上适定, 在物理上合理, 尽量不影响内点数值解的精度和稳定性, 内点与边界点的格式不一致和开边界对输入波的虚假反射都是误差扰动源。对于陆边界, 一般使用无滑移条件来设定, 即认为水深在边界的法向方向没有变化, 而水流速度在边界的法向方向导数为零。

(3) 动边界处理

动边界是水平计算域中有水与无水区域的界线。水陆边界的外移是由于内侧水位高于外侧地面, 而内缩则由于内侧水位低于同侧地面。在边界附近水深通常较小, 同时边界处存在法向流速, 不同于一般的陆地边界。

(4) 参数的选择

糙率是反映下垫面地表粗糙程度的参数, 是水力模型中的重要参数。模型控制参数主要有演算时段控制参数和结果输出控制参数。演进时段控制参数包括起始计算时间、终止计算时间和计算时间步长。结果输出控制参数是结果文件输出的时间步长间隔数^[7]。

3 黄墩湖滞洪区概况

黄墩湖滞洪区列入了国家蓄滞洪区名录, 是沂沭泗流域防洪体系重要组成部分。黄墩湖滞洪区位于骆马湖西侧, 2009 年国务院批复水利部《全国蓄滞洪区建设与管理规划》明确, 以邳洪河大堤 (中运河、骆马湖二线大堤) 房亭河南堤、徐洪河、废黄河高滩地为界, 地跨徐州、宿迁 2 市, 分属邳州、睢宁、宿豫 3 县 (市、区), 总面积 230 km²。蓄滞洪区内有黄墩湖滞洪闸、爆破口门 (胜利段、曹甸段)、防洪大堤等防洪建筑物。

按国家防汛防旱总指挥部《关于沂沭泗河洪水调度方案的批复》规定: “如预报骆马湖水位超过 26.0 m, 当骆马湖水位达到 25.5 m 时, 启用黄墩湖滞洪区滞洪, 确保宿迁大控制安全”。黄墩湖的滞洪方式为, 开启进洪闸和爆破口门相结合。当骆马湖水位超过 24.5 m 并预报继续上涨时, 退守宿迁大控制。同时, 做好黄墩湖滞洪准备, 如预报骆马湖水位超过 26.0 m, 当水位达到 25.5 m 时, 启用黄墩湖滞洪。

4 应用分析

根据黄墩湖滞洪区不同分洪组合得到边界洪水过程, 作为黄墩湖滞洪区二维水流数学模型的输入边界条件, 根据黄墩湖滞洪闸、胜利口门、曹甸口门的不同开启组合, 可制定出不同的洪水计算方案, 采用模型进行模拟计算得到方案结果。对

传播, 由于蓄滞洪区南部地势比较高, 所以洪水主要集中在中部低洼地带。上述分析表明, 流场计算结果符合水流运动的基本规律。

(3) 洪水特征要素分析

对模型计算结果进行洪水演进分析计算, 统计得到最大淹没范围、最大淹没水深、洪水到达时间、洪水淹没历时等洪水特征要素, 如图 2 所示。

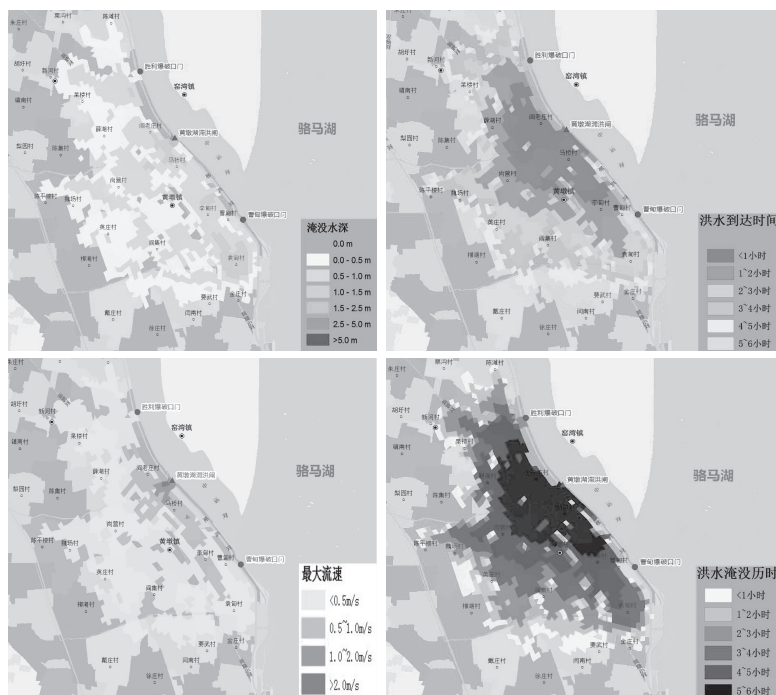


图 2 洪水特征要素图

模型计算结果进行洪水演进分析计算, 得到可能最大淹没范围、淹没水深等洪水风险计算结果。选取黄墩湖滞洪闸启用、胜利口门不启用、曹甸口门不启用的计算方案进行洪水计算成果进行合理性分析, 包括水量守恒、局部流场、淹没过程分析等。

(1) 水量平衡分析

由于黄墩湖滞洪闸启用后, 骆马湖洪水进入蓄滞洪区, 随着闸门泄洪过程, 蓄滞洪区内的蓄水总量加上骆马湖的当前水量应该等于滞洪闸启用时骆马湖初始水位下的蓄水库容。

(2) 局部流场与淹没过程分析

选择黄墩湖滞洪闸下游附近的局部流场进行分析, 结合蓄滞洪区的地形和典型时刻流场分布图, 由下面的洪水淹没流场与水深分布图可知, 滞洪闸下游处流速较大, 距离闸下游越近流速越大。骆马湖洪水由滞洪闸进入蓄滞洪区后, 在水流惯性和地形地势的双重影响下向周围低洼地带扩散

5 结语

在黄墩湖滞洪区建立二维浅水流洪水演进模拟模型, 采用基于有限体积法的数值求解, 准确反映了蓄滞洪区洪水波运动传播特性, 有效捕捉了洪水间断波, 准确描述洪水传播特性和传播时间。

针对黄墩湖蓄滞洪区分洪问题采用滞洪闸、胜利口门、曹甸口门来模拟不同组合分流方式下洪水演进过程, 并对模型计算成果进行了合理性分析, 可知:

(1) 基于 FVM 格式的二维水动力学模型计算的河道水位、流速和断面实测流态具有较好的吻合度, 计算精度较高, 适用于河道二维流态的全程模拟。

(2) 整个洪水模拟过程, 水量是守恒的, 统计洪水淹没历时、淹没范围、淹没水深等致灾参数

均比较合理。

(3) 此法为蓄滞洪区的洪水演进模拟分析提供了一条行之有效的途径。

参考文献:

- [1] 刘树坤,等.黄河滩区及分滞洪区风险分析和减灾对策[M].郑州:黄河水利出版社,1999.
- [2] 王春宇.基于二维水动力学模型的河流水力学特征分布研究[J].水利技术监督,2016,24(4):56-58.
- [3] 吴其彰.梅山水库下游河道二维数值模拟研究,工程与

建设[J]. 2013, 27(2):162-163.

- [4] 田伟林, 荣维志. 基于 FVM 格式的二维水动力学模型在河道整治工程流态分析中的应用研究[J]. 吉林水利, 2017(5):1-8.
- [5] 谭维炎. 计算浅水动力学有限体积法的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [6] 李昂, 胡帅, 张光碧, 等. 山区河流建防洪堤对行洪的影响研究[J]. 西北水电, 2013(3):5-11.
- [7] 崔占峰, 张小峰. 分蓄洪区洪水演进的并行计算方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(5):24-29.