

Study and Application of the Numerical Simulation of the Channel Regulation Project in Xijiang River

Wanxing Zhao¹, Cen Wen², Jingqiu Chen³, Zhengang Ji³

¹Research Center of Flow, Chongqing Academy of Metrology and Quality Inspection, Chongqing

²Southwest Research Institute for Waterway Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing

³Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing

Email: noease9918@yahoo.com.cn

Received: Aug. 21st, 2012; revised: Aug. 24th, 2012; accepted: Aug. 27th, 2012

Abstract: A model of Xijiang channel regulation project was developed, which used the curvilinear and orthogonal coordinate system, the primitive variable and suspended sediment concentration field was simulated by coupling method. After the model was calibrated, the modeling effect was good. The model constructed here is a powerful tool for those similar projects.

Keywords: The Channel Regulation Project; Numerical Simulation

西江航道整治工程中的数值模型研究和应用

赵万星¹, 文 岑², 陈景秋³, 季振刚³

¹重庆市计量质量检测研究院, 重庆

²重庆西南水运工程研究所, 重庆

³重庆大学工程力学系, 重庆

Email: noease9918@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012年8月21日; 修回日期: 2012年8月24日; 录用日期: 2012年8月27日

摘 要: 以西江四滩河道整治工程为例, 建立了航道整治工程数值模型, 模型采用正交贴体网格, 耦合求解水动力场和悬移质浓度场, 数值模拟了工程前后的流场变化和河床冲淤过程。经校准后, 模拟效果较好, 可以为整治工程提供定量预测, 并为今后类似工作提供借鉴。

关键词: 航道整治工程; 数值模拟

1. 概述

西江航道整治工程拟采用筑坝和疏浚等措施, 以稳定河道, 提高通航能力。工程的重点区域是梧州以下(界首~肇庆)的四滩(界首滩、蟠龙滩、新滩和都乐滩), 该河段处于潮区界的终点, 如图1。河段内礁石众多, 水流条件复杂。数值模型拟采用计算机模拟和预测整治工程给该河段水动力条件和河床变化带来的影响, 为工程设计提高优化。

模拟对象存在以下特点: 1) 河段地形复杂, 滩涂、

丁坝众多; 2) 来流条件时序分布不均, 在模拟期存在明显的自由边界变化; 3) 泥沙以悬移质为主。根据工程需求, 模型应覆盖四滩, 模拟周期取三年, 应具有处理复杂的边界、模拟非定常水沙运动和河床冲淤变形的能力。该模型采用正交贴体网格, 耦合求解水动力过程和非粘性悬移质输运, 结合沉积物沉床模型, 模拟了整治工程前后的水流条件和河道冲淤变化。研究结果表明, 该模型能准确模拟河道流场变化和河床演变规律, 能为航道整治工程提供方案优化和科学评估^[1-3]。

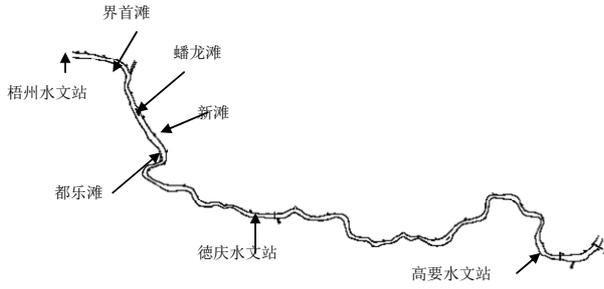


Figure 1. The location of four shoals in Xijiang River
图 1. 西江四滩分布图

2. 模型方程

2.1. 基本方程

河流水、沙运动具有明显的三维特点，直接离散 N-S 方程极不经济。基于浅水近似，正交贴体坐标系下的水动力方程和悬移质输运方程有^[4]:

$$\partial_t(m_x \zeta) + \partial_x(m_y Hu) + \partial_y(m_x Hv) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(m_x m_y Hu) + \partial_x(m_y Huu) \\ & + \partial_y(m_x Hvu) + \partial_z(mwu) \\ & = -m_y gH \partial_x \zeta - m_y C_B Uu \\ & + \partial_x(m_y HA_H \partial_x u) + \partial_y(m_x HA_H \partial_y u) + \tau_x \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(m_x m_y Hv) + \partial_x(m_y Huv) + \partial_y(m_x Hvv) \\ & = -m_x gH \partial_y \zeta - m_x C_B Uv \\ & + \partial_y(m_x HA_H \partial_y v) + \partial_x(m_y HA_H \partial_x v) + \tau_y \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \partial_t(m_x m_y HS) + \partial_x(m_y HuS) + \partial_y(m_x HvS) \\ & = \partial_z(m_y m_x^{-1} HK_H \partial_x S) + \partial_y(m_x m_y^{-1} HK_H \partial_y S) + Q_S \end{aligned} \quad (4)$$

式中: u, v 为 x, y 方向流速, $H = \zeta + h$ 是水深, m_x, m_y 是坐标变化张量, ζ 是水位, $U = \sqrt{u^2 + v^2}$, τ_x, τ_y 为水面风应力, S 为悬移质浓度, C_B 为河底阻尼系数, A_H 为水平涡粘项, 按照 Smagorinsky 公式计算, 有^[4]:

$$A_H = C \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

这里, C 为水平混合常数; Δx 为 x 方向网格尺寸; Δy 为 y 方向网格尺寸。参数 C 一般在 0.1 到 0.2 之间。Smagorinsky 公式将模型的水平混合与网格尺寸和剪切力联系起来。

式(2)左边第一项表示水平动量的时间变化率, 第

二项和第三项是 x, y 方向的水平对流项, 右边第一项是水平压力梯度施加的力, 第二项是水底摩擦, 第三项和第四项是动量在 x, y 方向的水平耗散。式(3)各项含义相同^[5]。

2.2. 水流挟沙模型

定义 Rouse 数: $R = \frac{w_{sc}}{u^* \kappa}$, u^* 是摩阻流速, κ 是 von Karman 常数。

床面与水体的悬移质交换通量有:

$$J_o = w_s \left(\frac{2(1+R)}{2+R(1-z_{eq})} \right) (S_{eq} - S) \quad (5)$$

这里 S_{eq}, z_{eq} 为平衡浓度和高度, 一般按实测或试验确定。

有悬浮通量: $w_r S_r = w_s \left(\frac{1+R}{2+R(1-z_{eq})} \right) S_{eq}$, 沉淀通量, $P_d w_s = \left(\frac{1+R}{2+R(1-z_{eq})} \right) w_s$ 稳定条件下, 可以用挟沙力 S^* 代替平均含沙量 S_{eq} ^[6,7]。

张瑞瑾挟沙力公式:

$$S^* = k \left(\frac{U^3}{gHw} \right)^m \quad (6)$$

这里, k, m 为常数, $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ 。

2.3. 河床变形计算

采用多层沉积物沉积模型求解床面冲淤厚度变化。垂向离散河床沙质, 定义单元层 B_k , 可以建立泥沙和水量守恒方程:

$$\partial_t \left(\frac{\rho_s B_k}{1 + \varepsilon_k} \right) = J_{s:k-} - J_{s:k+} \quad (7)$$

$$\partial_t \left(\frac{\rho_w \varepsilon_k B_k}{1 + \varepsilon_k} \right) = J_{w:k-} - J_{w:k+} \quad (8)$$

这里 $\varepsilon, \rho_s, \rho_w$ 是空隙率, 泥沙密度和水的密度, J_s, J_w 分别是在 k 层单元面的泥沙和水量通量。垂向边界条件: 在最底层没有物质交换, 而在水床界面处, 物质通量满足(5)式^[8]。

3. 计算网格的生成

为便于模拟主流, 模型采用正交贴体网格, 将物

理坐标 (x, y) 线性变换到计算坐标 (ζ, η) 。对丁坝等建筑物进行了局部加密, 利用局部样条插值和径向基函数结合, 形成数字地形; 在数字地形上插值, 获取网格的地理信息。模型网格为 381×41 , 如下图 2 是模型地形, 图 3 是计算网格。

4. 边界条件

开边界条件: 模型方程属于抛物型方程, 上游给流量、下游给水位。

垂向边界条件: 自由面和床底。

对河流, 风应力可以忽略。

河床底部的剪切力:

$$(\tau_{xz}, \tau_{yz}) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) = c_B \sqrt{u_1^2 + v_1^2} (u, v) \quad (9)$$

5. 模型校准

模型验证所采用的资料主要是 2004 年 9 月 21 日实测的水面线及断面流速流量资料, 从验证结果来看, 水位误差一般小于 0.05 m, 从 3 个测流断面流速与计算流速比较来看, 流速误差一般小于 0.15 m/s, 个别点误差达到 0.21 m/s, 相对误差一般小于 10%。

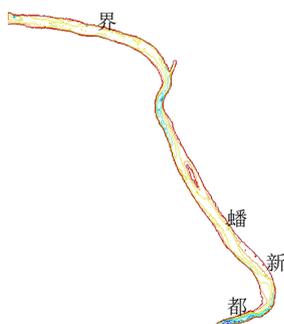


Figure 2. The bottom topography of three shoals
图 2. 三滩河段地形图

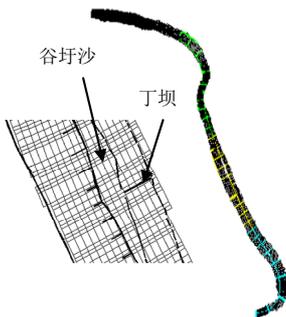


Figure 3. The model grid
图 3. 模型的计算网格

冲淤计算采用 2001~2003 高要水文站提供的日平均含沙量过程量。主要验证有实测资料的三滩河段的淤积量。从计算结果来看, 三滩河段在这期间共淤积 $46,072 \text{ m}^3$, 而实际测量结果为 $43,017 \text{ m}^3$, 两者相差 3059 m^3 , 相对误差 6.6%, 符合计算精度要求, 可以用于工程后的冲淤计算。

6. 模型应用

6.1. 流场分析

模型模拟了不同水流条件的流场分布, 如图 4、5 所示, 其结果可用于分析工程实施后, 该河段水流条件的变化。上游来流主要居于谷圩沙的右侧, 过谷圩沙后, 水流分散, 挟沙力降低, 泥沙淤积形成蟠龙滩。洪水时, 蟠龙滩下游流场顺直, 直冲都乐滩凹岸; 而低水位时, 主槽水流成蛇形, 在新滩集中在右岸, 过新滩则偏向左岸, 沿弯道凹岸而下。工程后, 主槽流速有明显增加, 一般流速增加 5~10 cm/s, 最大增加 10~15 cm/s, 工程可以达到增加主流流速、加大主河道输沙能力的作用。

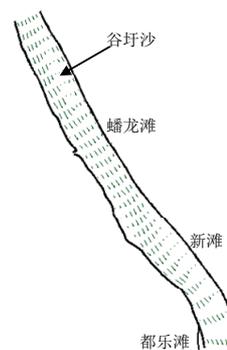


Figure 4. The $3450 \text{ m}^3/\text{s}$ flow field of three shoals
图 4. $3450 \text{ m}^3/\text{s}$ 三滩流场分布

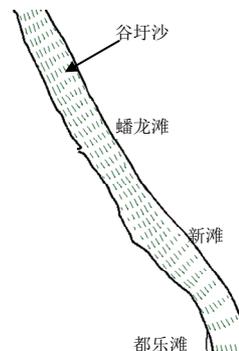


Figure 5. The $8000 \text{ m}^3/\text{s}$ flow field of three shoals
图 5. $8000 \text{ m}^3/\text{s}$ 三滩流场分布

6.2. 河床冲淤变化分析

模型采用对流扩散模型模拟了悬移质水沙运动, 基于此模拟了河床冲淤变化, 如图 6 所示, 负值表示河道被冲刷, 正值表示淤积。结果表明: 1) 工程后, 航道河床的冲刷力度加大。2) 从河段淤积分布看, 呈现上淤下冲的特点。流速增大的地方, 河床冲刷, 流速减小的地方, 泥沙有所淤积。3) 从河床冲淤时段看, 呈现涨淤落冲的特点。



Figure 6. The isograph of erosion and deposition of the channel
图 6. 河道冲淤变化图

7. 总结

天然河流的水沙运动和河床过程非常复杂, 实验室模拟和现场观测往往很难满足要求。数值模拟技术在河流工程中应用日益广泛, 高性能计算机为数值模拟提供了重要工具。西江三滩河道整治工程的数值模拟基于浅水方程, 建立了复杂河道的二维非定常水沙模型。模型采用正交贴体网格, 耦合求解水动力过程和非粘性悬移质输运, 结合沉积物沉床模型, 模拟了整治工程前后的水流条件和河道冲淤变化。研究结果表明, 该模型能准确模拟河道流场变化和河床演变规律, 能为航道整治工程提供方案优化和科学评估。

参考文献 (References)

- [1] Z.-G. Ji. Hydrodynamics and water quality modeling rivers, lakes and estuaries. New York: Wiley, 2008.
- [2] J. X. Shi, K. T. Le, et al. Numerical simulation of the tidal motion and suspended sediment transport in the radial sandbank area of the southern yellow sea. *Journal of Hydrodynamics, Series B*, 2004, 16(5): 555-563.
- [3] 陈景秋, 赵万星, 季振刚. 重庆两江汇流水动力模型[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2005. http://www.cfluid.com/cgi-bin/LB5000/attachment.cgi?forum=15&topic=148&postno=&name=07_2D6D8C7ECC1BD_1129795746&type=.pdf
- [4] 陈景秋, 赵万星, 季振刚等. 滨江路对重庆两江水流条件影响的研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2005, 27: 47-51.
- [5] 赵万星, 缪吉伦等. 嵌套模型在航道整治工程中的研究和应用[J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 33(增刊 2): 106-109.
- [6] Z.-G. Ji. Water quality modeling-case studies. In: *Water encyclopedia, Volume 2: Water quality and resources development*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005: 255-263.
- [7] Z.-G. Ji, K.-R. Jin. Gyres and seiches in a large and shallow lake. *Journal of Great Lakes Research*, 2006, 32(4): 764-775.
- [8] 王光谦. 河流泥沙研究进展[J]. *泥沙研究*, 2007, 2: 64-80.