



安庆河段航道整治工程数学模型的建立

岳志远¹, 张妍妍², 李有为¹, 沈磊¹

(1. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011; 2. 交通运输部长江航务管理局, 湖北 武汉 430014)

摘要: 为研究安庆河段航道整治工程对水流的调整效果, 建立了覆盖安庆、太子矶和贵池3个连续的弯曲分叉型水道的平面二维水流数学模型, 采用原型观测水文和地形资料对模型参数进行验证, 模型计算的河道分流比、水位和流速与实测值符合较好, 表明所建立的模型能够反映安庆河段的水流运动及分布规律, 可以进一步用于安庆河段航道整治工程的方案效果研究工作。

关键词: 安庆河段; 数学模型; 模型验证; 模型精度

中图分类号: U 612.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)12-0058-04

Establishment of mathematical model for Anqing river waterway regulation project

YUE Zhi-yuan¹, ZHANG Yan-yan², LI You-wei¹, SHEN Lei¹

(1. Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China;

2. Changjiang River Administration of Navigational Affairs, MOT, Wuhan 430014, China)

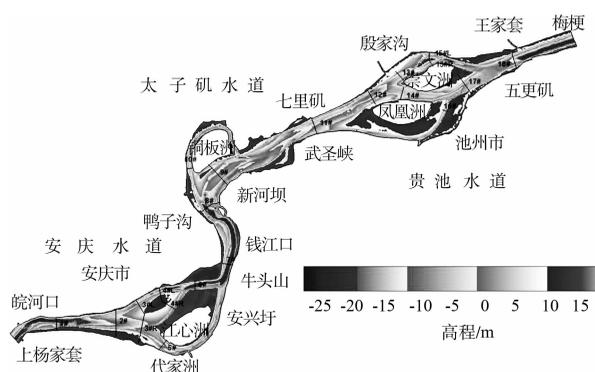
Abstract: This paper presents a new two-dimensional finite-volume numerical model to study the adjusting effect of the Anqing river waterway regulation, covering three continuous bending braided channels, i. e. Anqing, Taiziji and Guichi Waterway. A series of prototype observed hydrologic data are adopted to verify the model's parameters. The computed water level, splitting ratio, and cross section velocities of the model agree well with the measured values, which indicate that the model may be used to model the flow processes in Anqing channel.

Keywords: Anqing channel; mathematical model; model validation; model accuracy

安庆河段位于长江下游安庆至南京之间, 上起皖河口, 下至五更矶, 全长约71 km, 由安庆、太子矶和贵池3个连续的弯曲分叉型水道组成(图1)。安庆水道和贵池水道各汊道周期性交替发展, 洲头各低滩冲刷后退和淤涨交替, 局部河段航道水深不稳定、主航槽摆动, 从而对通航带来不利影响, 成为“长江黄金水道”畅通的瓶颈之一。

为稳定航道水深和航路, 进而达到稳定航道条件的目的, 遵照《长江干线航道总体规划纲要》的相关精神, 2010年11月长江航道局组织实施了安庆水道先期航道整治工程建设, 并于2012年又

分别对安庆和贵池水道开展后续的航道整治工程可行性研究。



a) 河势

收稿日期: 2014-10-08

作者简介: 岳志远 (1982—), 男, 博士, 工程师, 从事水沙动力学研究。

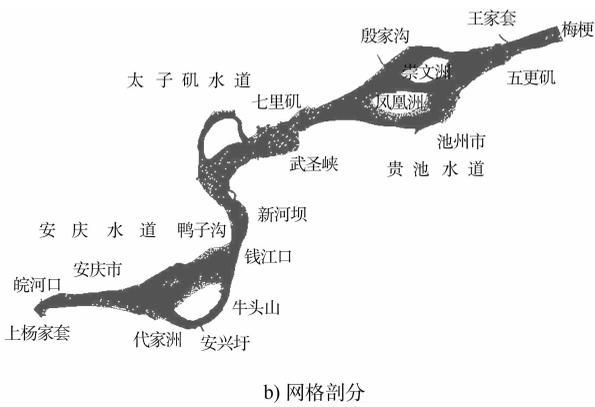


图 1 安庆河段河道形式及网格剖分

本文建立平面二维水动力数学模型, 用以研究安庆河段的水流特性和航道整治工程对水流的调整效果, 为安庆河段航道整治工程可行性研究提供技术支撑。作为本次数学模型研究的第一部分, 本文重点阐述模型的建立与验证过程。数学模型基本控制方程为浅水二维水动力学模型, 采用高性能有限体积方法数值求解控制方程; 同时, 采用非结构三角网格离散计算区域, 便于对重点研究区域进行局部加密。采用安庆河段近年来的实测水文资料对模型参数进行率定和验证, 为下一步进行安庆河段相关治理方案的研究工作做准备。

1 模型基本原理

1.1 基本控制方程

基本控制方程采用基于深度平均的浅水二维动力学模型, 守恒形式如下:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{\mathbf{F}}}{\partial x} + \frac{\partial \tilde{\mathbf{G}}}{\partial y} + \mathbf{S} \quad (1)$$

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + gh^2/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\tilde{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \nu_t h (\partial u / \partial x) \\ \nu_t h (\partial v / \partial x) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \nu_t h (\partial u / \partial y) \\ \nu_t h (\partial v / \partial y) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh(S_{bx} - S_{fx}) \\ gh(S_{by} - S_{fy}) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: t 为时间 (s); x 和 y 为空间坐标 (m); h 为水深 (m); u 和 v 为 x 和 y 方向的水流流速 (m/s); g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 ; \mathbf{U} 为守恒量向量; \mathbf{F} 和 \mathbf{G} 为 x 和 y 方向的通量向量; $\tilde{\mathbf{F}}$ 和 $\tilde{\mathbf{G}}$ 为 x 和 y 方向的扩散项向量; \mathbf{S} 为源项向量; $S_{bx} = \partial z_b / \partial x$ 、 $S_{by} = \partial z_b / \partial y$ 分别为 x 和 y 方向的地形坡度, z_b 为河床高程; S_{fx} 和 S_{fy} 分别为 x 和 y 方向的阻力坡度, n 为 Manning 糙率系数, 其中:

$$S_{fx} = n^2 u \sqrt{(u^2 + v^2)} / h^{4/3} \quad (8)$$

$$S_{fy} = n^2 v \sqrt{(u^2 + v^2)} / h^{4/3} \quad (9)$$

1.2 数值方法

模型数值离散格式见文献[1-6], 简述如下: 采用非结构三角形网格剖分计算区域; 运用基于 HLLC 的近似黎曼算子求解界面通量, 并采用 MUSCL 空间数据重构和预测-校正法实现模型的二阶精度。采用精确方法处理动边界, 应用 DFB 方法和隐式方法处理底坡源项和阻力源项, 模型具有稳定性与和谐性。模型建立后首先采用了一系列经典算例对其进行验证^[6], 并针对实际问题也进行了相关研究, 可靠性较好^[7]。

2 安庆河段二维数学模型的建立

模型上起杨家套下至梅埂, 研究范围全长约 78 km, 覆盖安庆、太子矶和贵池 3 个水道(图 1)。采用 78 029 个网格单元剖分计算区域, 网格单元边长为 20 ~ 200 m。为了达到模型计算效率与工程研究对网格精度要求的最佳平衡, 根据不同情况采用不同密度的网格: 对于地形变化较缓的滩地采用稀网格, 对于主河槽和工程区域附近采用密网格。

3 模型验证

当模型应用于具体的河段时, 需根据实测地形和水文资料对模型参数进行率定和验证, 以获取适用于该河段的模型参数。本模型采用安庆全河段 2012 年 11 月、2013 年 3 月和 7 月同步测次的水文地形资料对模型参数进行率定和验证, 水文测验断面布置见图 1。这样, 验证资料包括了 2

次枯季资料和 1 次洪季资料, 基本上能够覆盖近年来安庆河段出现的流量情况。分别通过汉道分流比、水位和断面流速等实测资料对模型参数开展验证工作。

3.1 分流比验证

表 1~3 统计了计算与实测的分流比。可以看出, 安庆、太子矶和贵池 3 个水道各组次模型计算与实测分流比误差均在 1% 以内, 符合较好, 说明模型能够准确地反映不同流量级下安庆河段各汉道的过流情况。

3.2 水位验证

安庆全河段各测次计算与实测水位比较见表 4。据统计, 全河段枯季测次水文条件下计算与实测水位误差基本都在 0.06 m 以内, 洪水流量下计算与实测水位误差也基本都在 0.1 m 以内, 计算水位与实测水位符合较好, 说明验证的参数基本能够反映研究河段的水位变化情况。

表 1 安庆水道不同测次计算与实测分流比

%

时间	左汉			中汉			右汉		
	实测	计算	误差	实测	计算	误差	实测	计算	误差
2012 年 11 月	61.28	60.28	-1.00	23.05	23.36	+0.31	15.67	16.36	+0.69
2013 年 3 月	63.10	63.01	-0.09	20.49	20.61	+0.12	16.42	16.39	-0.03
2013 年 7 月	48.51	48.02	-0.49	23.16	23.99	+0.83	28.33	27.20	-1.12

注: 符号“+”表示增加,“-”表示减小(下同)。

表 2 太子矶水道不同测次计算与实测分流比

%

时间	左汉			右汉		
	实测	计算	误差	实测	计算	误差
2012 年 11 月	11.64	11.03	-0.61	88.36	88.97	+0.61
2013 年 3 月	11.75	10.87	-0.88	88.15	89.13	+0.88
2013 年 7 月	10.82	10.26	-0.56	89.18	89.74	+0.56

表 3 贵池水道不同测次计算与实测分流比

%

时间	左港			中港			右港		
	实测	计算	误差	实测	计算	误差	实测	计算	误差
2012 年 11 月	35.70	35.54	-0.16	60.87	60.93	+0.06	3.43	3.53	+0.10
2013 年 3 月	35.81	35.85	+0.04	61.90	61.81	-0.09	2.29	2.33	+0.05
2013 年 7 月	43.86	42.93	-0.92	52.33	51.31	-1.02	4.84	4.32	-0.51

表 4 计算与实测水位比较 m

测次	断面	实测	计算	差值
2013 年 3 月	1#	5.57	5.66	+0.09
	2#	5.47	5.52	+0.05
	5#	5.39	5.42	+0.03
	6#	5.28	5.21	-0.07
	7#	5.18	5.25	+0.06
	9#	4.99	5.06	+0.07
	10#	5.01	5.08	+0.07
	15#L	4.50	4.59	+0.09
	15#R	4.49	4.55	+0.06
	16#	4.55	4.57	+0.03
2013 年 7 月	1#	11.15	11.12	-0.03
	2#	10.99	11.03	+0.04
	5#	10.89	10.97	+0.08
	6#	10.73	10.78	+0.06
	7#	10.64	10.61	-0.03
	9#	10.38	10.34	-0.05
	10#	10.38	10.39	+0.01
	15#L	9.72	9.79	+0.08
	15#R	9.72	9.78	+0.06
	16#	9.70	9.76	+0.06

3.3 流速验证

限于篇幅, 本文仅介绍 2013 年 7 月份的流速验证情况 (图 2)。从图 2 中可以看出, 模型计算主流分布与实测一致, 计算与实测误差基本都在 0.1 m/s 以内, 说明采用验证参数, 模型在定量上能够较准确地反映安庆河段的流速分布情况。

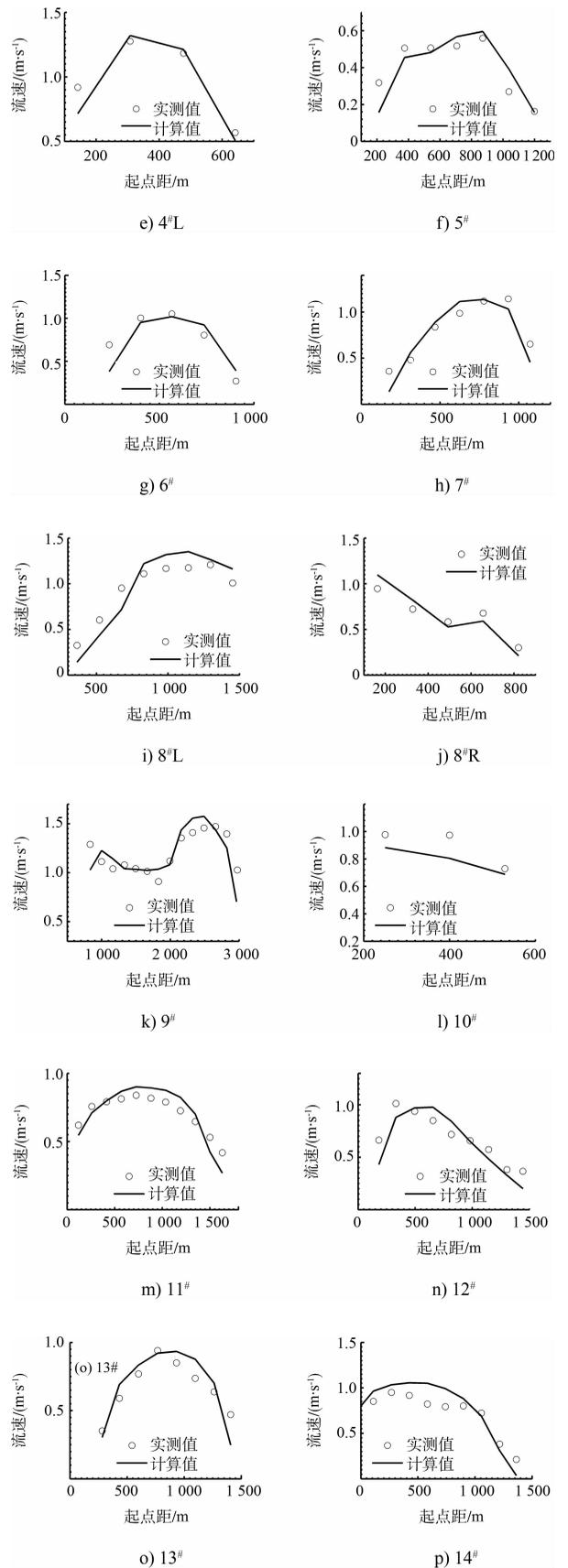
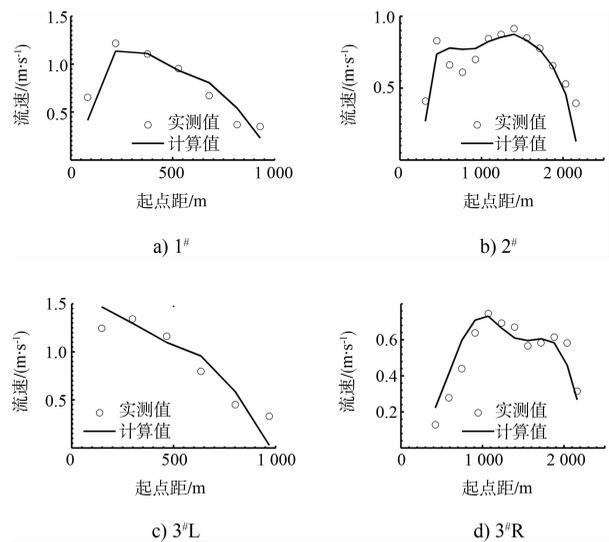


图 2 安庆河段计算流速与实测断面流速比较

(下转第 73 页)