



心滩守护工程影响航道水流特性的数值模拟*

闫 军^{1,2}, 刘怀汉², 岳志远², 曹志先¹, 郑 立², 付中敏²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

摘要: 心滩是位于河心的浅滩, 一般位于放宽河道内, 会随水位涨落及水沙条件变化而十分不稳定, 往往给航道条件带来十分不利的影响。为了改善航道条件, 需要通过航道整治工程来稳定心滩, 如软体排护滩工程、鱼骨坝护滩工程等。运用基于非结构三角形网格的平面二维水流数学模型对不同类型的心滩守护工程进行了研究。研究表明, 建立的数学模型能够较好地模拟心滩周边的水流特性, 较好地揭示了心滩守护工程对航道水流的影响特点, 这对长江中下游航道涉及心滩的浅滩河段航道治理中具有一定的指导意义。

关键词: 数值模拟; 心滩守护; 航道水流; 影响特点

中图分类号: TV 133

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0117-07

Numerical simulation of impact from protection engineering for central bar on current characteristics

YAN Jun^{1,2}, LIU Huai-han², YUE Zhi-yuan², CAO Zhi-xian¹, ZHENG Li², FU Zhong-min²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Yangtze River Waterway Research Institute, Wuhan 430011, China)

Abstract: The central bar refers to the shoal located in the centre of the river. It is generally found in rivers with enlarged width and is very unstable with the stage fluctuations and changes in water and sediment conditions, which often results in very adverse impacts on the waterway conditions. In order to improve the waterway conditions, regulation projects of the waterway like the beach protecting project with soft mattress and the fish-bone dike project are absolutely necessary. This paper investigates different types of central bar protection projects based on two-dimensional mathematical model of water flow with unstructured triangular mesh method. The results indicate that the mathematical model proposed can capture the flow characteristics around the central bar very well, and further reveal the impact features of the central bar protection projects to the waterway flows which facilitates guiding significance to the regulation of the middle and lower reaches of the Yangtze River waterway with shoals and central bars.

Key words: numerical simulation; central bar protection; waterway flow; impact characteristics

航道作为通江达海的水上主通道, 其战略地位和开发利用价值十分显著。航道条件的好坏, 直接关系到水运主通道的畅通, 以及区域间物质交流和经济交往。

在自然情况下, 冲积河流的河床总是处于不断地变化和发展过程中。河床演变是指河床在自然条件下或受人类活动干扰情况下发生的变化^[1]。河床的演变是水流、泥沙与河床相互作用的反映。

收稿日期: 2012-02-15

*基金项目: 长江航道规划设计研究院基金(2011-02-029)

作者简介: 闫军(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事水沙动力学研究。

从河床演变的广义角度,通常把河床凹低之处(水深比邻近水深为大)的水域称之为深槽,凸起之处(水深比邻近水域的水深为小)的水域称为浅区。从通航角度,把不能满足通航要求的浅区称之为浅滩。心滩是位于河心的浅滩,与复式环流作用有关,是相对独立的水下淤积体^[2]。从定义上看,心滩的演变反映了河流航道的冲淤变化,属河床演变学研究的范畴。

三峡工程蓄水运用后,上游来水来沙条件发生了重大改变,长江中游航道受三峡工程的影响,将产生长距离的冲刷,各种滩体的水力特性和冲刷变形显得更加复杂,特别是长江中游部分心滩的演变给航道带来新的碍航问题^[3]。随着长江干线航道整治工程的全面展开,对心滩的守护方式越来越多。从现有的护滩建筑物结构来看,大致可分为3类:散抛块体护滩、坝体护滩、软体排护滩^[4]。第1类是散抛块体护滩,即在滩面上散抛50~80 cm的块石进行护滩,这种结构形式主要应用于闽江水口电站下的护滩工程,西江鲫鱼滩、盐蛇滩的护滩工程,汉江襄利河段航道整治工程中采用过这种散抛块体护滩;第2类是坝体护滩,通过建设坝体(坝体群)达到护滩的效果,坝体形式有丁坝、顺坝、鱼骨坝等,主要在黄河、闽江、西江等河流治理中应用,长江上也有一定应用,其中丁坝、顺坝主要用于守护边滩,鱼骨坝主要用于守护心滩;第3类是软体排护滩——护滩带,针对历史上曾经出现过较为严重的碍航现象的水道,目前正处于演变周期中河势条件较好、洲滩较为高大完整的有利形势时,采用软体排护滩这样一种新型整治建筑物结构形式将有利的滩槽形态加以稳定。

但从目前已实施的航道整治工程来看,所采用的心滩护滩建筑物受损或破坏的问题较为突出,直接影响整治效果并增加维护难度,加之对于心滩护滩建筑物的破坏机理和平面布置及结构稳定性方面的实体模拟技术尚不成熟^[5],因此,研究解决心滩守护工程技术已成为长江航道治理的迫切需求,研究心滩守护前后的水力特性及其演变特点是解决心滩守护工程技术的重要组成部分。

本文通过建立基于能够有效捕捉激波的HLLC近似黎曼算子求解界面通量的浅水二维水流数学模型方程,针对不同类型的心滩守护工程,运用该数学模型对概化心滩守护工程周边的水流影响进行了数值模拟计算,并与水槽模型实测数据进行了对比,揭示了不同类型心滩守护工程实施后对水流的影响机理。

1 数学模型建立

1.1 控制方程

基本控制方程采用浅水二维动力学方程,可以表述为如下的守恒形式:

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

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

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

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

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}_b + \mathbf{S}_f = \begin{bmatrix} 0 \\ ghS_{bx} \\ ghS_{by} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: t 为时间; x, y 为笛卡尔坐标; h 为水深; u, v 为 x, y 方向的流速; g 为重力加速度,取值 9.8 m/s^2 ; $S_{bx} = -\partial z_b / \partial x, S_{by} = -\partial z_b / \partial y$ 分别为 x, y 方向的地形坡度, z_b 为河床高程; $S_{fx} = n^2 u \sqrt{(u^2 + v^2)} / h^{4/3}, S_{fy} = n^2 v \sqrt{(u^2 + v^2)} / h^{4/3}$ 分别为 x, y 方向的阻力坡度, n 为Manning糙率系数。

1.2 数值方法

为了更好地模拟天然河道边界,本文计算网格采用非结构三角形网格,三角网格拓扑关系见图1。对于某一个单元而言,模型基本变量 h, u 和 v 存储在单元中心;地形高程则存储在单元节点上,从而保证了地形在各单元界面处的连续变化。

根据图1所示计算网格拓扑关系,方程(1)的离散方程可以写成如下形式:

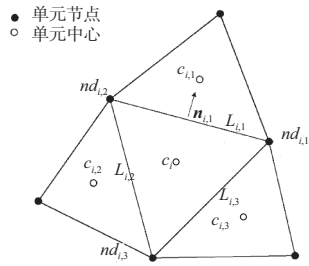


图1 三角单元控制体

$$\frac{dU_i}{dt} = -\frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^3 \mathbf{E}_{ij}^* \times \mathbf{n}_{ij} \Delta L_{ij} + \frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^3 \mathbf{S}_{b_{ij}}^* \Delta L_{ij} + \mathbf{S}_{fi} \quad (6)$$

式中: U_i 和 S_{fi} 为体积平均值, 存储在网格中心; \mathbf{E}^* 为单元界面的法向通量, $\mathbf{n}=(n_x, n_y)$ 为界面法向单位向量; ΔL_{ij} 为第 i 个单元对应的第 j 条边的长度。

方程 (6) 中通量 \mathbf{E}^* 计算是本文模型关键, 本文模型采用 HLLC 近似黎曼算子计算界面通量^[6]。为了实现模型的二阶精度, 在空间上采用 MUSCL 数据重构, 在时间上采用预测-校正步。方程 (6) 的源项由底坡项和阻力项组成, 采用 Valiani 和 Begnudelli^[7] 提出的 DFB 方法处理底坡项, 为了避免小水深情况下出现不稳定现象 (特别是在干湿边界附近), 并采用全隐式方法处理阻力项^[8]。对

于模型建立的细节可以参考文献^[9]。

模型在时间上的离散采用的是显示格式, 为了保证模型的稳定性, 需要满足 CFL (Courant-Friedrichs-Levy) 线性稳定条件:

$$\Delta t = \frac{Cr}{\max_{i=1, \dots, N_c} (A_i / 3 \max_{k=1, 2, 3} |\lambda_k^\perp L_k|)} \quad (7)$$

式中: N_c 为单元数; λ_k^\perp 为垂直于第 k 条边的特征值; Cr 为柯朗数, 一般需要满足 $Cr \leq 1$, 本文所有算例计算中, 取 $Cr=0.95$ 。

2 模型率定及验证

2.1 模型试验简介

针对航道内心滩周边的水流特性问题, 重庆交通大学进行了水槽试验^[10], 研究了滩体附近水流运动规律, 获取了较为丰富的研究成果, 试验所取得的水位、断面流速资料能够用于检验率定本文数学模型。试验水槽长 25 m, 宽 3 m, 高 0.6 m, 水槽纵向坡度为 1/10 000。

本文分别选择平滩、轻度淹没和深度淹没 3 种条件的试验资料验证数学模型, 具体工况条件见表 1。

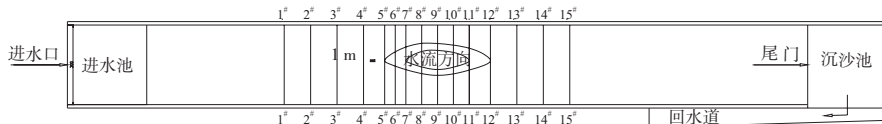


图2 心滩试验水槽平面布置

表1 定床试验工况

工况	流量/(L · s ⁻¹)	控制水深/cm	心滩顶控制水深/cm
1	80.64	10	0
2	105.56	14	4
3	131.70	20	10

2.2 模型验证

2.2.1 计算网格

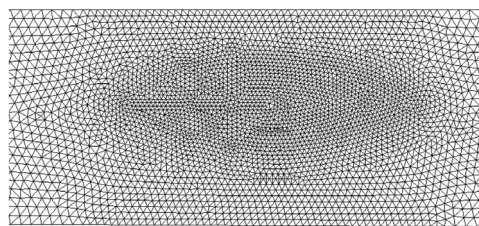
本文共采用了 10 652 个非结构网格单元离散计算区域, 为了精确模拟滩体附近地形, 在滩体附近对网格进行了局部加密处理, 网格剖分图见图 2。

2.2.2 水位验证

图 3~5 分别为工况 1~3 条件下在 $y=0.5$ m, 1.5 m 及 2.5 m 共 3 个纵剖面上计算值与实测值的比较。从图上可以看出, 不同试验条件下, 不同纵剖面上模



a) 整体网格



b) 局部网格

图2 模型计算网格

型计算值与实测值吻合较好, 变化趋势基本一致, 但仍略有偏差, 究其原因主要由实测和计算过程中产生的误差造成。但总体而言所得计算结果真实、可信, 精度满足要求, 能够重现试验过程中的水深变化情况。具体比较分析来看, 心滩顶控制水深越

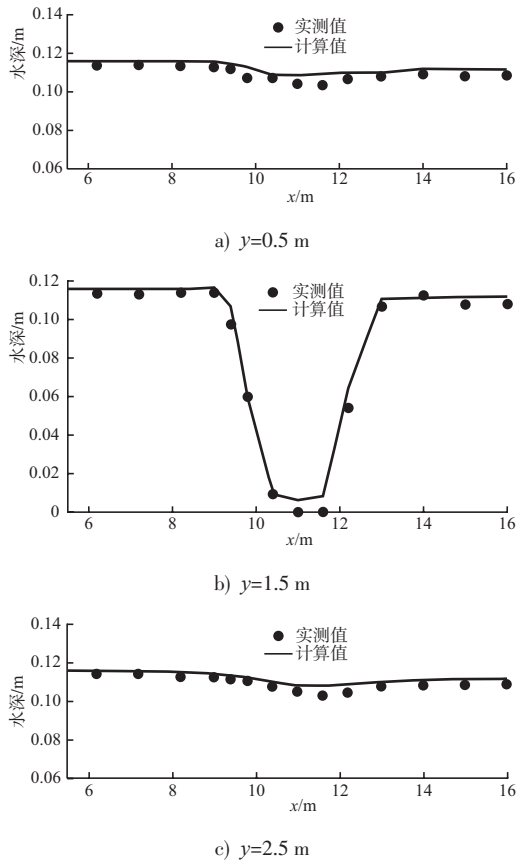


图3 工况1条件下纵剖面水深计算值与实测值对比

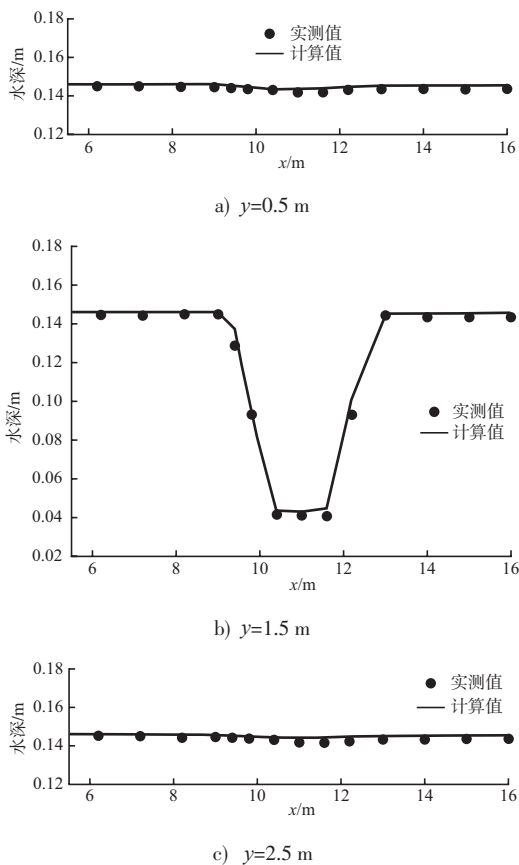


图4 工况2条件下纵剖面水深计算值与实测值对比

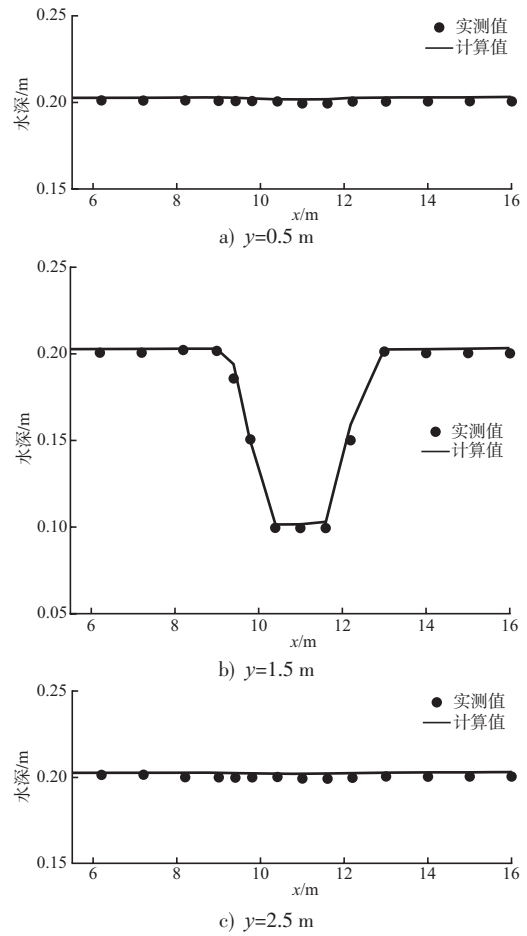


图5 工况3条件下纵剖面水深计算值与实测值对比

大，模拟值越接近实测值，特别是对于 $y=1.5\text{ m}$ 的纵剖面（穿越整个心滩），反映的特点更为明显。

2.2.3 流速验证

图6~8分别为3种工况下代表断面的垂线平均流速计算值与实测值的对比情况，其中CS5断面位于心滩头部分流点位置、CS8位于心滩顶、CS12位于心滩尾汇流点位置、CS13位于汇流点下游（图2）。总的来看，模型的计算值与实测值吻合较好，变化趋势保持一致。具体分析来看，工况1为平滩流量工况，这种工况下水深相对较小（图3），而试验中采用流速旋浆测量将不可避免对这种工况产生较大影响，因此计算值与实测值略有差异；同时在试验过程中对于确保心滩顶水深为零的临界状态也较难控制，因此在CS8断面滩顶位置计算值与实测值出现较大差异，从实际分析来看，这种工况计算值更为接近水流的实际状态。对于工况2和工况3，随着心滩顶水深的不断增加，由流速旋浆对水流引起的干扰越来越小，

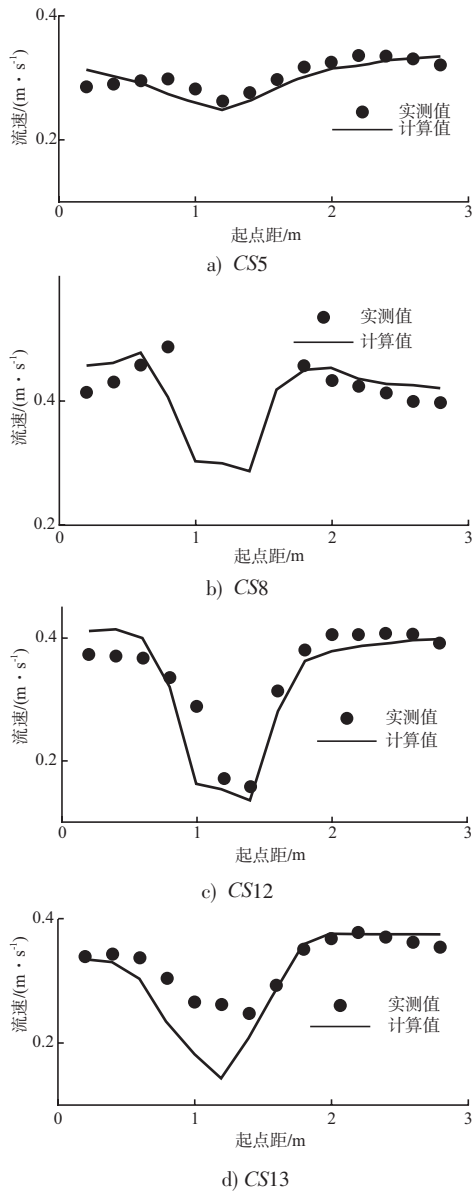


图6 工况1条件下代表断面垂线平均流速计算值与实测值对比

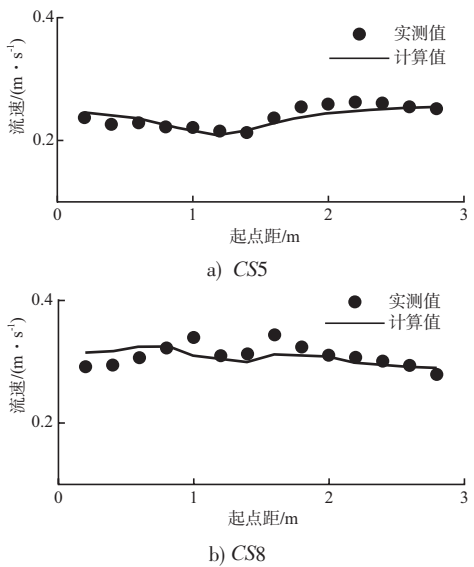


图7 工况2条件下代表断面垂线平均流速计算值与实测值对比

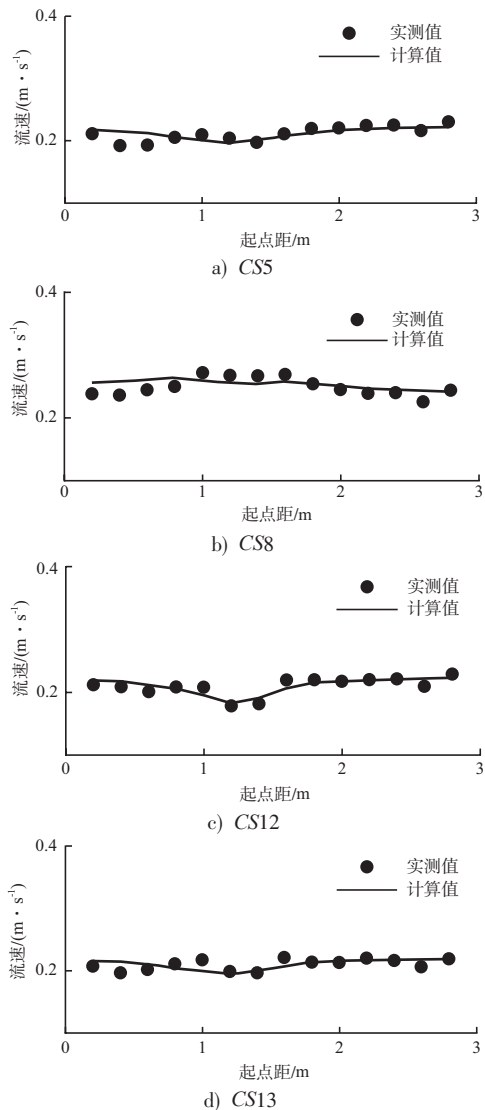


图8 工况3条件下代表断面垂线平均流速计算值与实测值对比

因此，计算值与实测值吻合的越来越理想。

3 心滩守护工程对航道水流影响特点分析

3.1 软体排护滩带工程

软体排护滩带从滩头护到8#断面，护滩面积约占心滩总表面积的1/3，模型计算过程中的概化主要通过调整工程区域糙率系数来实现，见图9。

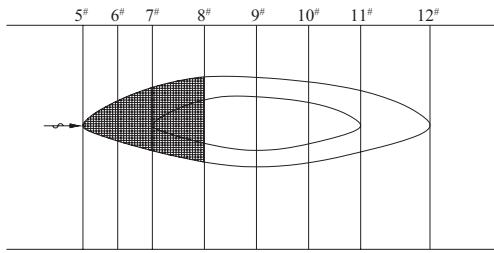


图9 软体排护滩带工程

3.1.1 水位影响

图10为3种工况下软体排护滩带实施前后航道内水位差等值线的变化。

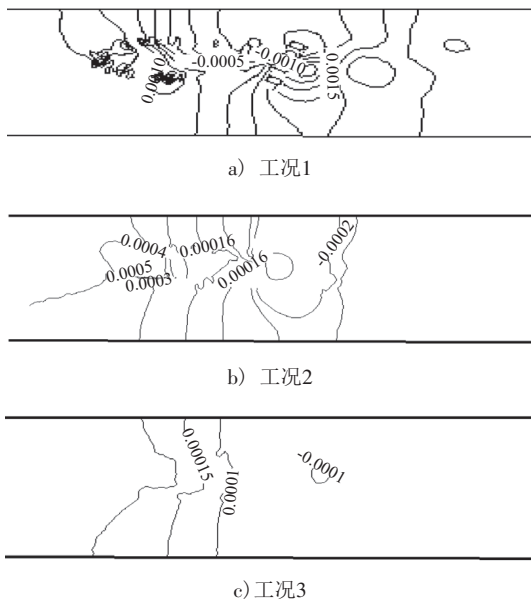


图10 软体排护滩带实施前后水位差等值线(单位: m)

从图上可以看出，软体排护滩带工程实施后，对航道内水位的影响主要集中在工程区及其上下游，且随着心滩顶控制水深的增加，对水位的影响程度越来越小。具体分析来看，工程实施后在建筑物上游侧水位略有升高，而下游侧水位略有降低，特别是在小流量情况下(工况1)这种变化特点更为明显。

3.1.2 流速影响

图11为3种工况下软体排护滩带实施前后航道内流速等值线的变化。从图上可以看出，软体排护滩带工程实施后，对航道内流速的影响主要集中在工程区及其上下游，且随着心滩顶控制水深的增加，对流速的影响程度越来越小。具体分析来看，工程实施后在心滩头部及其下游流速明显减小，而两侧航道内流速明显增加，特别是在平滩流量下(工况1)这种变化特点更为明显。

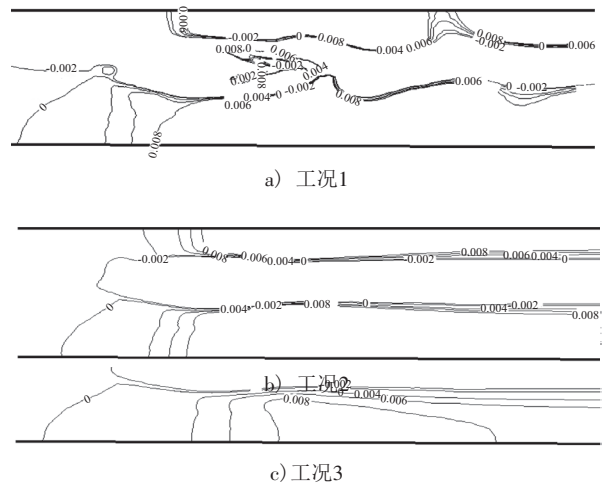


图11 软体排护滩带实施前后流速等值线(单位: m/s)

3.2 鱼骨坝护滩工程影响

鱼骨坝的布置方式为脊坝沿心滩脊线从滩头前沿15 cm处到9#断面，两条刺坝的轴线分别与7#和8#断面重合。脊坝和刺坝的高度均为3 cm，见图12。

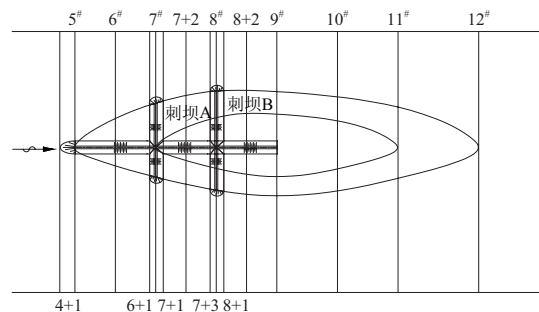


图12 鱼骨坝护滩工程

3.2.1 水位影响

图13为3种工况下鱼骨坝护滩工程实施前后航道内水位差等值线的变化。从图上可以看出，随着心滩顶控制水深的增加，鱼骨坝护滩工程实施后的水位变化特点同软体排护滩带工程实施引起

的水位变化特点,但引起的变化幅度明显较大。

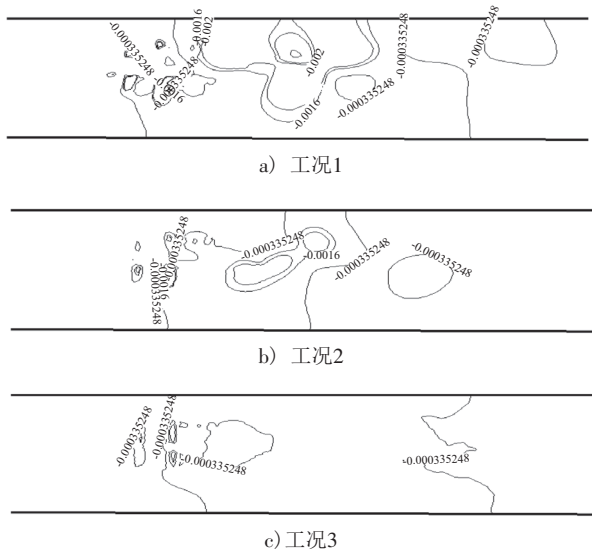


图13 鱼骨坝工程实施前后水位差等值线(单位:m)

3.2.2 流速影响

图14为3种工况下鱼骨坝护滩工程实施前后航道内流速等值线的变化。从图上可以看出,随着心滩顶控制水深的增加,鱼骨坝护滩工程实施后的流速变化特点同前述软体排护滩带工程实施引起的流速变化特点,但引起的变化幅度明显较大。

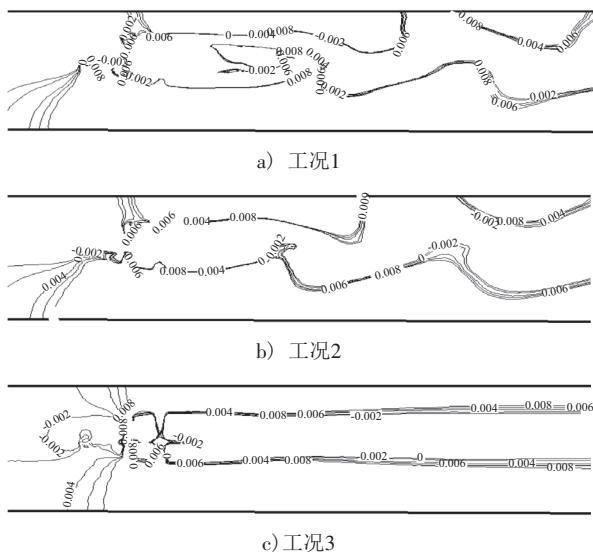


图14 鱼骨坝工程实施前后流速等值线(单位:m/s)

4 结论

1) 本文建立的基于非结构网格的浅水二维数学模型,通过与水槽试验的水位、流速验证模型对比,计算值与实测值吻合较好,表明模型能够

较好地模拟心滩守护工程实施前后航道内的水流特点。

2) 研究表明,软体排护滩带工程实施后,对航道内水位的影响主要集中在工程区及其上下游,且随着心滩顶控制水深的增加,对水位的影响程度越来越小;对航道内流速的影响同样主要集中在工程区及其上下游,且随着心滩顶控制水深的增加,对流速的影响程度越来越小。特别是在平滩流量下(工况1)对航道水流的影响特点最为明显。

3) 研究表明,鱼骨坝护滩工程实施后引起的航道水流变化特点同软体排护滩带工程实施后引起的航道水流变化特点相同,但引起的变化幅度明显较大,也即鱼骨坝护滩工程实施后对航道水流的影响特点更为明显。

参考文献:

- [1] 钱宁,张仁,周志德.河床演变学[M].北京:科学出版社,1987.
- [2] 左东启.中国水利百科全书:水力学、河流及海岸动力学分册[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [3] 余文畴,卢金友.长江河道演变与治理[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [4] 长江航道局.长江航道整治建筑物稳定关键技术研究总报告[R].武汉:长江航道局,2006.
- [5] 王伟峰.心滩守护前后泥沙运动规律及冲刷变形特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.
- [6] Toro E F. Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows [M]. England: Wiley, 2001.
- [7] Valiani A, Begnudelli L. Divergence form for bed slope source term in shallow water equations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(7): 652-665.
- [8] Yoon T, Kang S. Finite-volume model for two-dimensional shallow water flows on unstructured grids[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(7): 678-688.
- [9] 岳志远,曹志先,李有为,等.基于非结构网格的非恒定浅水二维有限体积数学模型研究[J].水动力学研究与进展: A辑, 2010, 26(3): 359-367.
- [10] 喻涛.心滩守护前后水力特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.

(本文编辑 武亚庆)