



长江铜锣峡河段炸礁整治 数学模型计算及验证*

陈勇康^{1,2}, 胡江^{1,2}, 宋丹丹^{1,2}, 刘海婷^{1,2}, 包明金^{1,2}

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点试验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 采用平面二维数学模型对铜锣峡炸礁方案进行论证研究。模型对铜锣峡河段的实测水面线和流速分布进行验证, 计算结果与天然实测资料较为一致, 可正确模拟实际河道的水流运动。方案实施后, 铜锣峡河段在设计水位及设计水位以上2 m时航道通航水流条件变化不明显, 断面平均水位降低幅度较小, 断面平均流速和比降无明显变化, 炸礁区域设计水深足够; 且铜锣峡河段流态尚好, 航槽内左侧流向较方案前更加顺直, 流速总体不大。总体来说, 炸礁方案实施后航道通航条件较好, 炸礁方案可行。

关键词: 变动回水区; 铜锣峡; 数学模型; 炸礁方案

中图分类号: U 616⁺.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0131-06

Mathematical model and verification of reef-blasting regulation for Tongluoxia reach of Yangtze River

CHEN Yong-kang^{1,2}, HU Jiang^{1,2}, SONG Dan-dan^{1,2}, LIU Hai-ting^{1,2}, BAO Ming-jin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The Tongluoxia reef-blasting scheme is demonstrated by a 2-D mathematical model. The measured surface line and the velocity distribution of Tongluoxia reach are verified by the model, and the calculation results are almost consistent with the real-measured data, which can simulate the actual water flow motion correctly. After the program implementation, the navigable channel flow conditions of the Tongluoxia reach change little when the water level equals to the design level and 2 m above the design level, the section's average water level reduces within a small range, the average velocity profile and gradient have no obvious change, and the reef-blasting area has enough design depth; Tongluoxia reach's flow condition is favorable, the left-side flow direction in the channel is straighter than that of the previous scheme, and the flow velocity is generally small. The channel navigation conditions are better after the reef-blasting scheme is carried out, which shows that the reef-blasting scheme is feasible.

Keywords: fluctuating backwater area; Tongluoxia reach; mathematical model; reef-blasting scheme

收稿日期: 2014-11-01

*基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAB05B03); 重庆交通大学研究生教育创新基金项目(2014110)

作者简介: 陈勇康(1990—), 男, 硕士研究生, 从事航道整治方面的研究。

1 滩险概况

铜锣峡进口位于长江、嘉陵江汇合口朝天门下游约 10 km。该河段平面上为一“哑铃”型峡谷河段，进口为唐家沱，出口为郭家沱，中部峡谷区长约 2.5 km，上游进口为约 90°急转弯河段。铜锣峡河段两岸多为悬崖峭壁，枯水河宽 150~200 m，洪水河宽 250~350 m；枯水期水深约 40 m，最深处可达 54 m。随着水位上涨，河面展宽较少，过水面积增加不大。河道两岸基岩突嘴参差不齐，左岸中段以大磨石、小磨石最为突出，右岸进口处的鸡公嘴、中段的搬针背和出口处的商王石伸出岸边较长。铜锣峡河段河势见图 1。

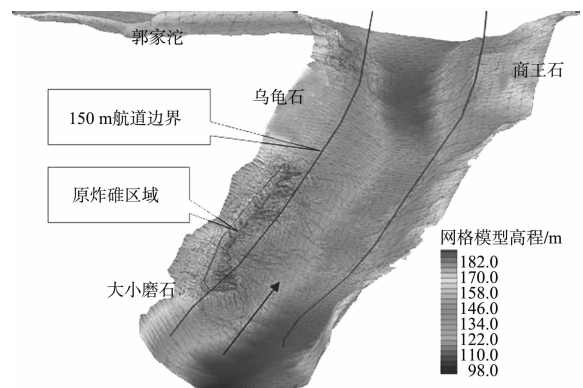


图 1 铜锣峡河段河势及滩情

2 河床演变及发展趋势

2.1 河床组成

铜锣峡河段的床沙组成主要是沙质（表 1）。

表 1 铜锣峡河段床水下沙粒径分析

垂线号	起点距/m	小于某粒径沙质量百分比/%										特征粒径/mm			
		0.004	0.008	0.016	0.031	0.062	0.125	0.250	0.500	1.000	2.00	4.00	D_{max}	D_{50}	\bar{D}
1	110					2.5	50.6	99.5	99.9	99.9	100		2.000	0.124	0.127
2	130	9.2	13.3	19.6	30.1	48.1	74.9	99.9	100				0.470	0.068	0.081
3	240	13.0	20.4	33.1	50.8	75.0	93.5	99.9	100				0.285	0.030	0.045

2.2 演变趋势

铜锣峡河道宽窄相间，涨水时峡谷段形成卡口，卡口上游宽谷段水流不畅，水位壅高，比降变小，泥沙落淤，而峡谷段则与之相反——随着水位升高，比降流速增大，河床发生冲刷；落水期峡谷壅水影响消除，卡口上游宽谷段比降与流速增大，河床发生冲刷，而峡谷段则淤积。因此，峡谷段年内表现为汛期冲、枯期淤；宽谷段为汛期淤、枯期冲。

三峡库区蓄水后出现明显淤积，2003年3月—2010年11月库区大坝至铜锣峡河段干流淤积总量为 11.932 亿 m^3 ，泥沙淤积分布和淤积强度与河道形态存在着密切的关系，河道宽谷段淤积强度较大，窄深段淤积强度较小甚至局部出现冲刷现象，蓄水后大坝—铜锣峡干流宽谷段总淤积量为 11.106 亿 m^3 ，占全河段总淤积量的 93.1%，窄深河段总淤积量为 0.826 亿 m^3 ，仅占全河段总淤积量的 6.9%。

3 碍航分析

铜锣峡河段是典型的洪水激流滩险。其枯水期水流平缓，尤其是三峡水库 175 m 蓄水以来，枯水期航道条件改善较明显^[1]。

在汛期，受整体河势限制和鸡公嘴突出石嘴挑流作用，在进口处主流更加向对岸莲花背直冲，受其反击后向右急转扫弯而下，沿左岸深槽下泄直冲大小磨石突嘴。大小磨石淹没前挑流强，淹没后滑梁水势明显，局部流速、比降较大。主流经大小磨石突嘴挑流，移至江心偏右下泄，受右岸商王石阻截挑流，形成较强泡漩水、滑梁水等不良流态和较大的流速、比降，影响船舶安全航行。当地水位 15 m 以上遇陡涨水时，现行船队上下水均需扎水停航。铜锣峡河段碍航特性主要是水流急、流态坏，影响大型船队自航上行和上、下水航行的船舶安全^[2]。根据《三峡库尾激流滩航道条件变化研究》的成果，在汛期坝前 145 m 水位时，3 000 吨级船舶的最高通航流量在 27 000 m^3/s 左右。

该河段4处礁石在2008年铜娄段炸礁工程中按照100 m的航宽已经进行了炸除,炸礁工程不仅拓宽了低水位期铜锣峡河段的航道尺度,而且改善了汛期通航条件,尤其是汛期的不良流态影响范围减小。2012年汛期在三峡水库坝前不同水位及流量期3次对铜锣峡进行现场考察,结果均表明:铜锣峡洪水期水流顺直,除主流流速较大外,其它不良流态不明显。

总体看,铜锣峡经2006年炸礁工程后,流态已大为改善。但目前仍存在2个问题:1)在汛期因急流导致上行通航流量不高,但是该问题很难通过现有炸礁工程解决,且不属于本文研究的范畴,故不做深入研究;2)在最低通航水位时,大、小磨石处不满足航道尺度的要求,需要通过炸礁进行加深^[3]。

4 工程方案布置

2008年铜娄段炸礁曾对鸡公嘴、大小磨石、搬针背、商王石4处礁石进行了炸除,除大小磨石外,其余3处主要以改善流态、保障通航安全作为主要整治思路,因此,本次无需进行继续拓宽加深。根据《三峡库区(175 m运用初期)设计最低通航水位计算与分析》的研究结果,本河段设计最低通航水位在2004年时为155.94 m,在2010年时为155.09 m,降低了0.85 m。由于设计最低通航水位的降低,大小磨石礁石处水深不能满足要求,故须继续炸深。因此,大小磨石沿原炸礁基线位置,继续加深炸至设计水深。铜锣峡出口左岸有一大块直径在8 m左右的大石头(称为“乌龟石”(图2)。水位较高淹没时,它形成暗礁,给船舶安全航行带来隐患,也给维护部门设标维护等带来很大的困难。因此,在本炸礁工程中对乌龟石进行整体清除,总计炸礁量约为22 100 m³。大小磨石处设计最低通航水位为158.80 m,炸礁水深3.7 m,相应设计炸礁底高程为155.10 m。炸礁边坡均为1:0.5。礁石处理区位于上游航道里程645 km附近的莲花背深潭,抛石厚度约2 m,抛石顶部高程控制在设计最低通航水位40 m以下^[4]。炸礁方案平面布置见图2。

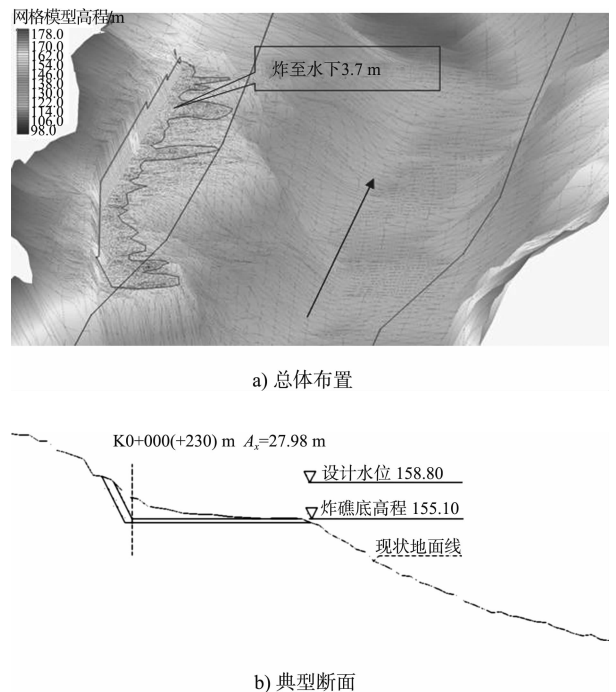


图2 铜锣峡炸礁方案布置

5 数学模型计算及验证

5.1 二维数学模型的建立

对于炸礁工程中的河段,如因滩险碍航特性复杂,需通过二维数学模型研究炸礁工程方案的合理性。本河段研究采用能较好地模拟复杂边界条件的沿平均水深的有限元法二维水流数学模型进行分析计算。

5.1.1 控制方程

采用沿水深平均的封闭浅水方程组描述二维水流运动,基本控制方程如下:

水流连续方程

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \quad (1)$$

x方向动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial x} \right) - fv - \frac{\varepsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{\frac{4}{3}}} = 0 \quad (2)$$

y方向动量方程

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a}{\partial y} \right) - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{\frac{4}{3}}} = 0 \quad (3)$$

式中： t 为时间； u 、 v 分别为沿 x 、 y 方向的流速； h 为水深； η 为床面高程； g 为重力加速度； ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{xy} 为紊动黏性系数，取为 $\alpha u_* h$ ， $\alpha = 3 \sim 5$ ， n 为糙率系数； u_* 为摩阻流速。

5.1.2 边界条件

平面二维水流数模中，边界条件通常包括岸边边界、进口边界、出口边界以及动边界等，本模型采用了如下边界条件。

1) 初始条件。

对于给定的研究域，在时间 $t=0$ 时有

$$h(x, y, t)|_{t=0} = h_0(x, y) \quad (4)$$

$$r(x, y, t)|_{t=0} = r_0(x, y) \quad (5)$$

$$s(x, y, t)|_{t=0} = s_0(x, y) \quad (6)$$

式中： h_0 、 r_0 、 s_0 分别为初始时刻的水位和流量分量。

2) 边界条件。

岸边界：该边界为非滑动边界，即 $u=0$ ， $v=0$ 。

进口边界：进口边界位于计算河段的进口断面，其 ξ 方向给定入流单宽流量沿断面的横向分布，即 $u(\eta) \cdot h(\eta) = f(\eta)$ ，并给定 $\partial v / \partial \xi = 0$ 。进口、出口断面一般布置在顺直、单一、无回流等特殊流态的河段。

出口边界：计算河段的出口断面给定水位沿河宽的分布，同时给定流速边界条件： $\partial v / \partial \xi = 0$ ， $\partial u / \partial \xi = 0$ 。

动边界：根据网格节点处河底高程和水位，可以判断该网格单元是否出露水面，若不露出，糙率值采用正常值；若出露，糙率值取无穷大值。

5.1.3 基本方程的数值离散与求解

浅水方程的离散包括时间离散和空间离散，时间的离散采用差分法，空间的离散采用有限单元法：运用伽辽金加权余量法把浅水方程离散成非线性代数方程，然后采用Newton-Raphson方法求解。离散区域内采用三角形六节点等参单元和四边形八节点等参单元相耦合。单元插值采用混

合插值方法。

5.1.4 计算域的选取及网格的生成

铜锣峡河段二维数学模型涵盖了水葬和野土地2个炸礁点，因此模拟范围较长，上起大石鼓，下至鱼嘴，航道里程在629~649 km，长约20 km。在该河段内共计布置104 456个网格节点，网格间距20~50 m。其中对铜锣峡大小磨石、乌龟石、野土地、水葬等有1:500局部地形的区域进行网格加密，网格间距约为5 m。工程河段二维数模网格平面布置见图3。

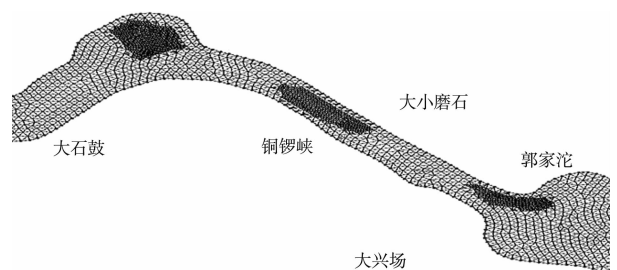


图3 铜锣峡河段二维数模网格平面布置

5.2 二维数模的验证

本模型对铜锣峡河段的实测水面线和流速分布进行验证。模型验证采用了如下资料：

- 1) 工程河段河床地形图(2012年5月测图，比例尺1:2 000)；
- 2) 工程河段河床地形图(2012年5月测图，比例尺1:500)；
- 3) 长江铜锣峡实测水面线及流速流向(2009年6月施测， $Q = 24\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$)；
- 4) 长江铜锣峡实测水面线及流速流向(2009年7月施测， $Q = 17\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$)；
- 5) 长江铜锣峡实测水面线及流速流向(2012年5月施测， $Q = 9\ 930\ \text{m}^3/\text{s}$)。

5.2.1 水位验证

利用建立的二维数学模型对工程河段进行水面线验证计算。从图4的计算水位与实测水位对比可见，一般偏差在 $\pm 0.030\ \text{m}$ 之内，最大不超过 $0.05\ \text{m}$ ，可见二维数模与实际情况吻合较好。

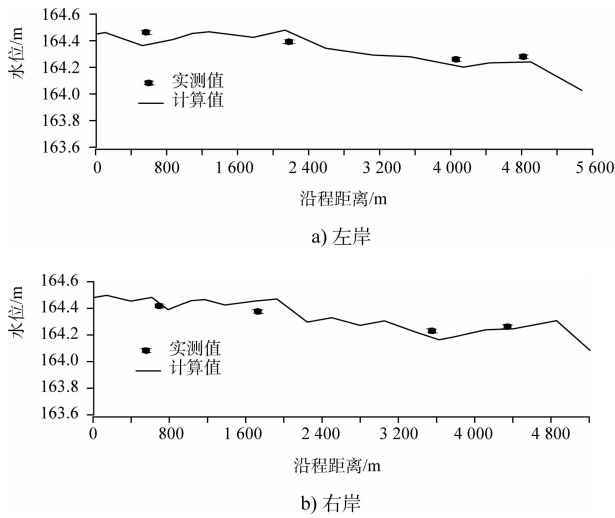


图 4 铜锣峡二维数模水位验证

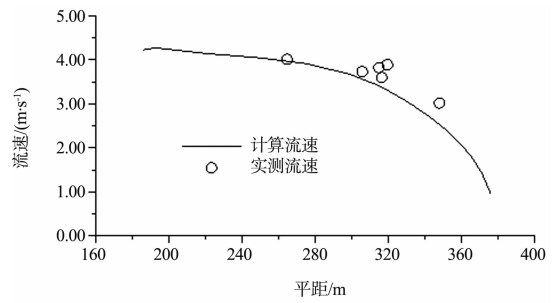


图 5 铜锣峡二维数模流速验证

二维数模计算的流速大小和分布均与实测资料较为一致, 各测点流速的计算值与实测值之间的差值大多在 $\pm 0.1 \text{ m/s}$ 内, 极个别误差较大的也不超过 $\pm 0.2 \text{ m/s}$, 偏差均在 $\pm 10\%$ 以内。

可见, 采用有限元法二维水流数学模型可克服模拟复杂河道边界形状困难。对工程选址区河段水位的验证表明, 计算结果与天然实测资料较为一致, 说明二维水流数学模型的建立和数值计算方法合理^[5], 能正确模拟实际河道的水流运动, 可进行下一步的方案论证计算。

5.3 数模计算条件

为了研究炸礁方案实施后该河段的航道条件变化情况, 选取了 2 级水位及流量进行计算分析 (表 2)。在工程方面的组合考虑了 2 种情况: 方案前、方案 1。二维数模计算分析考虑了 2 级流量及 2 种工况, 共进行了 4 个组次计算。

表 2 铜锣峡炸礁方案二维数模计算条件

水位/m	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	说明
158.81	2 900	最低通航水位
160.90	4 500	设计水位以上 2 m

5.4 数模计算结果

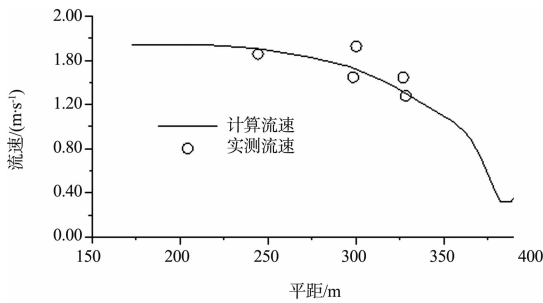
用二维数模进行 2 个方案、2 级流量共 2 个组次的计算。表 3 统计了炸礁方案实施后航槽内水位变化值和断面平均水位变化值, 图 6、7 分别统计了方案后工程河段的断面流速分布及流场分布情况。

表 3 铜锣峡炸礁后水流条件变化

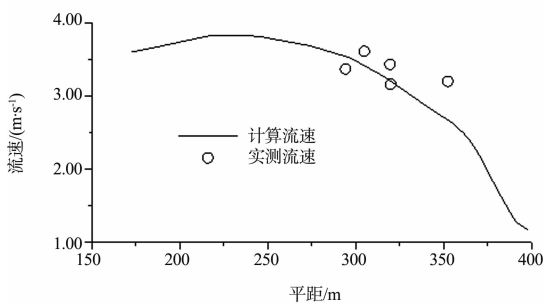
流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	断面水位最大降幅/m	断面平均流速最大变幅/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	比降最大变化值/m
2 900	0.003	-0.007 ~ 0.009	0.10
4 500	0.001	-0.004 ~ 0.005	0.06

5.2.2 流速验证

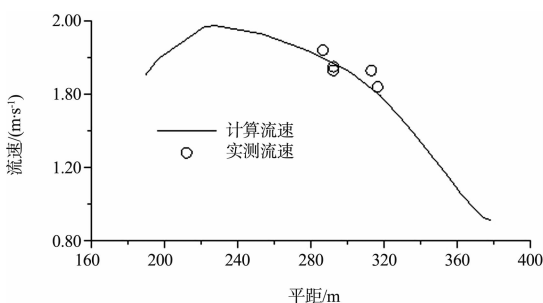
应用已建立的水流数学模型, 对 $Q=5\,520 \text{ m}^3/\text{s}$ 进行断面流速验证, 实测断面流速分布与数模计算结果对比见图 5。



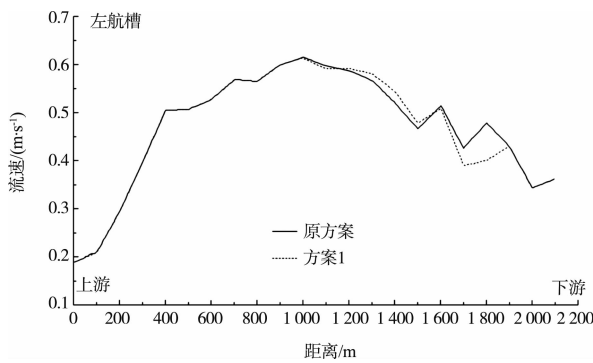
a) 断面SC2, $Q=9\,930 \text{ m}^3/\text{s}$



b) 断面SC2, $Q=24\,800 \text{ m}^3/\text{s}$



c) 断面SC4, $Q=9\,930 \text{ m}^3/\text{s}$



注：距航槽左边界 20 m, $Q=2\ 900\ m^3/s$ 。

图 6 炸礁方案实施后炸礁一侧航槽内水流变化

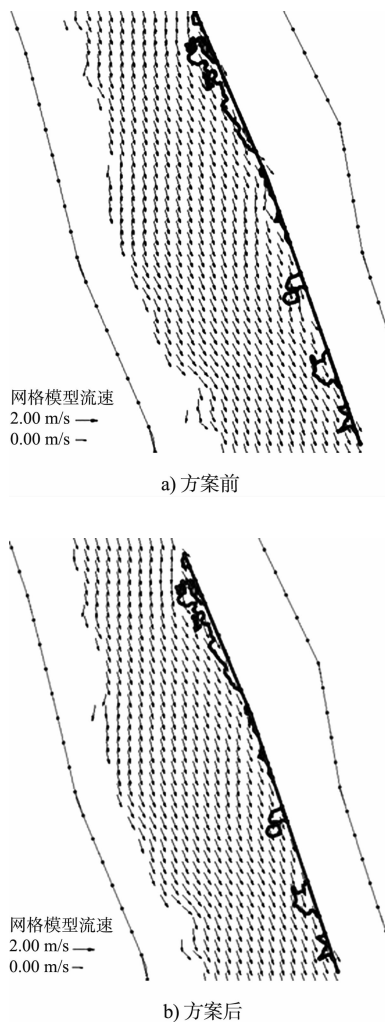


图 7 炸礁方案实施前后流场分布 (设计水位)

6 结语

铜锣峡河段的主要问题在最低通航水位时峡

谷左侧不满足航道尺度的要求, 需要通过炸礁进行加深。方案实施后, 铜锣峡河段在设计水位及设计水位以上 2 m 时航道通航水流条件变化不明显, 断面平均水位降低仅 0.003 m, 断面平均流速和比降无明显变化, 炸礁区域设计水深足够; 且铜锣峡河段流态尚好, 航槽内左侧流向较方案前更加顺直, 流速总体不大, 基本上在 1 m/s 以下。

炸礁方案实施后航道通航条件较好, 通航环境得以改善, 炸礁方案可行。

参考文献:

- [1] 张莉莉, 陈进. 长江上游水沙变化分析[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(6): 34-37.
- [2] 河海大学, 重庆交通学院. 航道整治[M]. 北京: 北京人民交通出版社, 1987.
- [3] 卢汉才. 内河航道整治工程科技进步的回顾和展望[J]. 水道港口, 2004, 25(S1): 3-7.
- [4] 赵志舟, 周华君, 杨胜发. 长江上游铜鼓滩航道整治数值模型研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008(2): 290-292.
- [5] 罗宏, 朱俊凤. 三峡库区涪陵至铜锣峡河段航道炸礁工程设计与整治效果分析[J]. 水运工程, 2007(3): 78-81.
- [6] 罗宏. 三峡库区铜锣峡河段航道整治方案研究[J]. 水运工程, 2010(5): 111-115.
- [7] 陆永军, 张华庆. 平面二维河床变形的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 1993, 8(3): 273-284.
- [8] 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆交通大学. 三峡库区(175 m 运用初期)设计最低通航水位计算与分析[R]. 重庆: 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆交通大学, 2010.
- [9] Papantonis D E, Athanassiadis N A. A numerical procedure for the generation of orthogonal body-fitted coordinate system with direct determination of grid points on the boundary [J]. Inter J for Numerical Method in Fluids, 1985 (5): 245-255.

(本文编辑 郭雪珍)