

· 航道及通航建筑物 ·



岷江朱石滩航道整治工程方案计算与分析*

倪志辉^{1,2}, 孔祥远¹, 张绪进²

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学, 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 朱石滩下游 1.4 km 拟建的岷江二桥其 215 m 主通航孔位于航道右侧, 与新槽的衔接存在较大问题; 目前老槽水深不足, 不能通行大件运输船舶。首先建立平面二维水流泥沙数学模型, 并由实测资料验证其相似性。数学模型计算的水面线、流速分布及河床冲淤等与原型实测资料基本吻合, 验证精度符合规范的要求。在掌握河床演变、滩险成因和碍航情况的基础上对老槽、新槽方案进行比较分析, 提出达到 IV 级航道标准, 满足大件运输需要。结果表明: 该数学模型可较好地模拟河段水流的运动及航槽泥沙的淤积过程, 从整治效果看 (通航水流条件、航槽稳定等), 3 个方案各有优劣, 相对而言, 老槽方案较好, 更能满足航道通航条件要求。

关键词: 数学模型; 流速分布; 优化方案; 通航条件

中图分类号: U 617.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)09-0112-05

Calculation and analysis of channel improvement scheme in Zhushitan reservoir area of Minjiang river

NI Zhi-hui^{1,2}, KONG Xiang-yuan¹, ZHANG Xun-jin²

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education,

National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Southwestern Research Institute of Water Transportation Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: The second Minjiang river bridge to be built locates 1.4 km downstream of Zhushitan, the 215 m-long main navigable hole of which locates on the right side of the channel, and the linking of which to the new groove faces a big problem. At present, the old groove is not deep enough for the passing of large transport ships. The 2-D flow sediment mathematical model is established, and the similarity is verified by the measured data. The calculating results of the water line, the velocity distribution and the river bed scour are consistent with the measured data, so the accuracy meets the specification requirements. To reach the IV channel standard and meet the need of large transport ships, we compare the schemes of old groove and new groove. The results show that the mathematical model can simulate the movement of the river flow and sediment deposition process of navigation channel. It shows that three schemes all have their own advantages and disadvantages from the regulation effect (the flow condition for navigation, navigation channel stability, etc.). Relatively speaking, the old groove scheme is better, since it can meet the requirements of the channel's navigation condition.

Keywords: mathematical model; velocity distribution; optimization scheme; navigation condition

收稿日期: 2014-12-31

*基金项目: 重庆市自然科学基金 (cstc2012jjA30002); 省部共建水利水运工程教育部重点实验室暨国家内河航道整治工程技术研究中心开放基金 (SLK2012A02)

作者简介: 倪志辉 (1980—), 男, 博士, 副研究员, 从事河流海岸水动力学、环境及数值模拟方面的研究。

水流泥沙数学模型研究的内容主要包括水沙运动规律、模型验证与应用、数值计算方法等。其中,韩其为^[1]、徐国宾等^[2]对一维、二维和三维水沙模型建立及控制方程求解进行了研究,曹文洪^[3]建立黄河河口海岸的平面二维动边界非恒定水流泥沙数学模型。近来,二维泥沙数学模型发展迅速,并在工程实际中普遍应用,如陆永军等^[4]利用二维水沙数学模型,预测了三峡工程蓄水初期该河段的冲淤过程与分布。不少学者^[5-6]将数学模型应用到工程实际中,且取得较好效果。倪志辉等^[7-9]建立的潮流数学模型,分析了倒运海水道整治方案的效果及合理性,为航道稳定性分析和整治方案的优化提供了依据。

建立岷江朱石滩航道整治工程水沙数学模型,模拟河段水流的运动及航槽泥沙的淤积过程,进一步对老槽、新槽方案进行比较研究,提出保障航道安全畅通的整治方案。利用二维水流泥沙数学模型模拟工程河段水流条件、河床演变规律,提出对策措施,确保工程修建后航道畅通和港口正常使用。

1 工程概况

岷江是长江上游的主要支流之一,岷江下游航道是四川航运“一横两纵”水运进出川的主通道。朱石滩位于犍为县城下游5 km,下距宜宾市(河口)105 km,该滩位于规划的龙溪口库区内,距上游规划的犍为枢纽8.8 km,距下游规划的龙溪口枢纽23.0 km。朱石滩原为岷江乐宜段著名的礁石险滩,航槽弯窄、水急、浪大。

为满足大件运输需要,乐山市航务管理局对左岸边滩进出口进行了疏浚,左汊成为新航槽,供大件运输船舶临时通航之用。但新槽位于弯道凸岸,不易稳定,有淤积的可能,并且左汊打开后引起上游水位的明显降落。此外于朱石滩下游1.4 km拟建的岷江二桥其215 m主通航孔位于航道右侧,与新槽的衔接存在较大问题。目前老槽水深不足,不能通行大件运输船舶。朱石滩现为IV级航道,航道尺度为1.5 m×45 m×500 m(航

深×航宽×弯曲半径)。在掌握河床演变、滩险成因和碍航情况的基础上对老槽、新槽方案进行比较研究,提出达到IV级航道标准、满足大件运输需要、保障航道安全畅通的整治方案十分必要。

1.1 整治方案

1.1.1 老槽方案

整治线走向和位置依托主导河岸,利用比较坚实的河岸、硬角、矾头作为整治线的控制点,沿河道深泓布置成微弯平顺的连续曲线,两组反向曲线间以直线连接,进口段整治线靠左布置,滩段逐渐向右岸过渡,其后穿越拟建的岷江二桥主通航孔,出口段再平顺过渡到左岸下深槽(图1)。

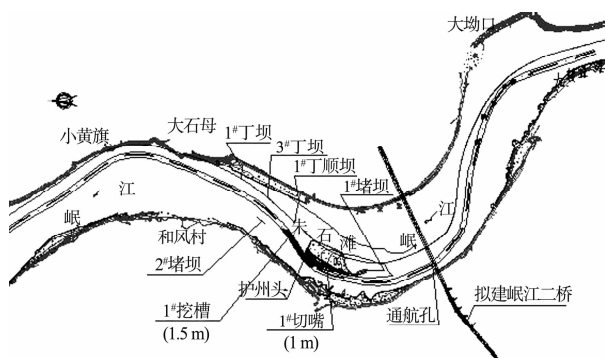


图1 老槽方案布置

主要整治措施:在该滩上段左岸筑1#、3#勾头丁坝2座,1#丁顺坝1座,以束水归槽,维护航槽稳定,并调顺水流由左向右过渡。在上、下边滩筑1#、2#堵坝2座,以封堵漏流、拦截横流、改善流态。在水深不足1.5 m浅区布置1#、2#挖槽2处,以满足航道尺度要求。部分切除江心洲右侧,以拓宽航槽、减缓流速。

1.1.2 新槽方案

该滩上、下游整治线布置基本同老槽方案,但滩段却明显不同,其最大的区别是拟在左岸边滩开挖新航槽,并考虑与滩下拟建的岷江二桥通航孔位置的衔接,又分为新槽方案1(与215 m主孔衔接)和方案2(与左通航副孔衔接)(图2)。

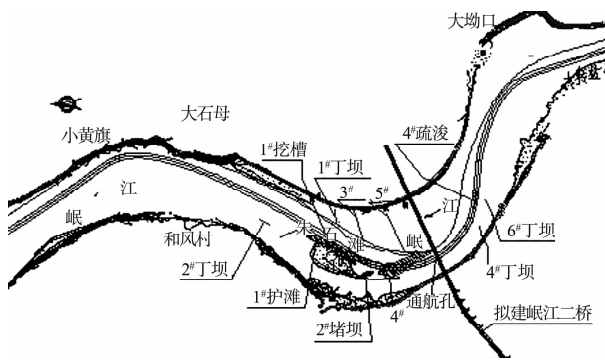


图2 新槽方案布置

新槽方案1 整治措施：在滩段及进出口浅区布置挖槽4处，以满足设计航深要求。在滩上右岸（水14）筑堵坝1座，用以封堵支汊、束水归槽。右岸洲头建丁顺坝1座，同时对边滩进行防护，用以束水归槽、保护边滩。右岸弯顶附近修建2座长丁坝及左岸边滩修建3座丁坝，用以控制新开航槽、束水冲沙。拟建岷江二桥下游右岸修建2座丁坝，用以调顺水流、冲刷浅区。

新槽方案2 整治措施：在该滩上段水深不足1.5 m 浅区布置挖槽1处，以达到设计航深的要求。在该滩上段右岸修建丁顺坝、护滩及格坝等，以导顺水流、促进边滩淤积。在滩段左岸修建3座丁坝，以束水归槽、冲刷浅区。

2 数学模型

2.1 水流运动方程

1) 水流连续方程。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (h v C_\xi) + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial}{\partial \xi} (h u C_\eta) = 0 \quad (1)$$

2) ξ 方向动量方程。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta u^2) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi v u) \right] + v u \frac{\partial C_\eta}{\partial \eta} - v^2 \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} = \\ -g \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial H}{\partial \xi} - \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta \sigma_{\xi\xi}) + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi \sigma_{\eta\xi}) + \sigma_{\xi\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - \sigma_{\eta\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

3) η 方向动量方程。

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta u v) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi v^2) \right] + v u \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - u^2 \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} = \\ -g \frac{1}{C_\eta} \frac{\partial H}{\partial \eta} - \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta \sigma_{\xi\eta}) + \right. \\ \left. \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi \sigma_{\eta\eta}) + \sigma_{\xi\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \sigma_{\xi\xi} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中： ξ 、 η 分别为正交曲线坐标系中的两个正交曲线坐标； u 、 v 分别为沿 ξ 、 η 方向的流速； h 为水深； H 为水位； g 是重力加速度； C_ξ 、 C_η 是正交曲线坐标系中的拉梅系数， $C_\xi = \sqrt{x_\xi^2 + y_\xi^2}$ ， $C_\eta = \sqrt{x_\eta^2 + y_\eta^2}$ ； $\sigma_{\xi\xi}$ 、 $\sigma_{\eta\eta}$ 、 $\sigma_{\xi\eta}$ 、 $\sigma_{\eta\xi}$ 表示紊动切应力； ν_t 是紊动黏性系数， $\nu_t = \alpha u_* h$ ， $\alpha = 0.1 \sim 0.3$ ， h 为水深； u_* 为摩阻流速。

2.2 计算范围及网格布置

根据计算需要的进出口长度，选取的计算区域全长约 8.8 km。主要采用四边形网格离散计算区域，网格大小疏密沿河道地势宽窄变化不等，在岷江二桥上下游附近的网格进行局部加密。计算网格布置见图3。

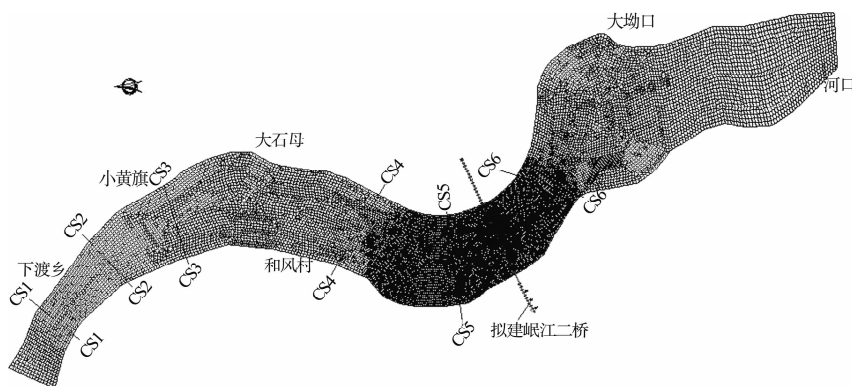


图3 正交网格

2.3 模型验证

2.3.1 水面线验证

本文采用现场实测的 $Q = 1\ 830\ \text{m}^3/\text{s}$ 及 $Q = 820\ \text{m}^3/\text{s}$ 时各水尺断面水位资料进行验证。图4对平面二维数模的计算水位与原型实测水位进行比较, 二者符合程度较高。从水位偏差值可见, 一般偏差在 $0.08\ \text{m}$ 以内, 个别水尺最大偏差也未超过 $0.1\ \text{m}$, 可见数模计算与原型实测资料吻合较好。

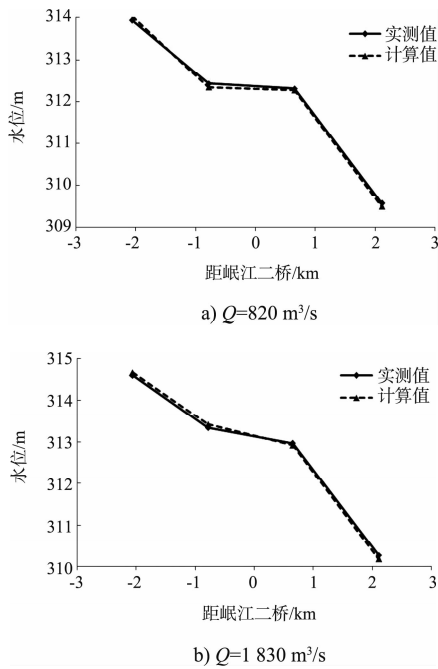


图4 水位验证

2.3.2 流速流向验证

应用建立的水流数学模型, 对拟定的验证流量进行流场数值模拟。并对数模计算流速与原型实测流速进行了对比, 从图5可见, 两者流速大小和分布以及最大值、最小值的位置均较为一致。各测点流速的计算值与实测值之间的差值大多小于 $0.1\ \text{m/s}$, 极个别误差较大的也不超过 $0.15\ \text{m/s}$, 相对偏差均在 10% 以内。

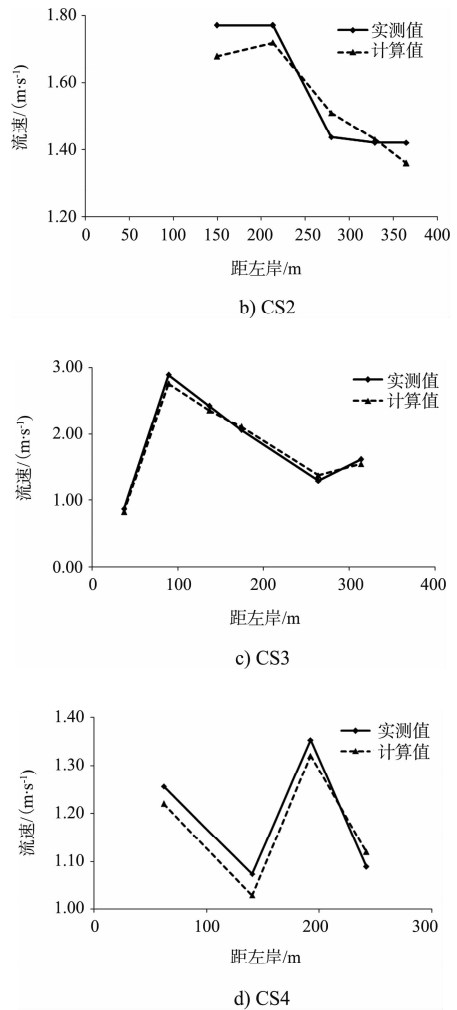
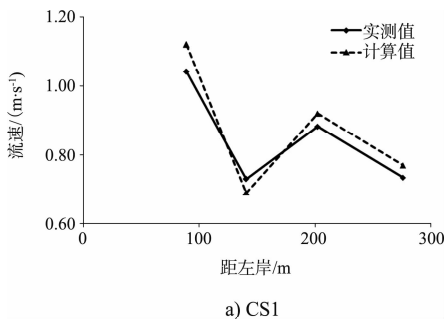


图5 $Q = 1\ 830\ \text{m}^3/\text{s}$ 实测流速验证

2.3.3 河床冲淤验证

河床冲淤验证以沙、卵石推移质运动为主, 根据实测河床地形资料, 选取岷江河段 ($8.8\ \text{km}$) 作为验证范围。以2010年4月实测地形建立模型, 按2010年4月至2014年2月之间的水沙过程进行计算。经过对冲淤时间比尺、输沙率比尺的反复调整, 最终达到与原型河床冲淤相似的要求。

表1 河段冲淤量验证

条件	冲刷量/万 m^3	淤积量/万 m^3	验证河段
实测	97.8	78.2	岷江河段
计算	42.3	85.4	(8.8 km)
相对误差/%	56.7	9.2	

通过验证, 实测与计算的淤积量相差不大, 但冲刷量却存在明显差别, 究其原因主要是受人 为大量采砂的影响。计算河段上游右岸即和风村

附近人为挖沙最大挖深将近7 m, 河床平均下降约2 m; 拟建岷江二桥左岸上游约1 000 m范围内有较大规模的采砂活动, 河床高程普遍降低1.7~2.2 m; 左岸大坳口附近也有采砂活动, 河床高程降低1.2~1.8 m。

3 整治工程方案比选

3.1 通航水流条件

1) 老槽方案。

整治后与天然水流比较, 当流量594 m³/s时, 工程河段水流平缓, 航槽流速在0.58~2.60 m/s, 较整治前均有所增加, 主流流向与桥轴线法向的夹角在左2°~左5°。水面比降在0.06‰~3.20‰, 较整治前有所减小; 当流速达到2.60 m/s时, 水面比降为3.20‰时, 航槽内不能满足通航。当流量2 010 m³/s时, 航槽流速在1.42~4.89 m/s, 流速略有增加, 主流流向与桥轴线法向的夹角在左1°~左4°, 比降在0.08‰~3.08‰, 较整治前略有减小, 减幅为0.01‰~0.04‰; 当流量12 000 m³/s时, 航槽流速在2.35~2.98 m/s, 主流流向与桥轴线法向的夹角在右1°~左3°, 流速均有所增加, 增幅为0.01~0.81 m/s, 比降在0.05‰~3.16‰, 较整治前略有减小, 减幅为0.01‰。

2) 新槽方案1。

当流量594 m³/s时, 工程河段水流平缓、航槽流速多在0.51~0.94 m/s, 增幅为0.01~0.61 m/s, 水面比降在0.11‰~3.20‰, 较整治前有所减小, 主流流向与桥轴线法向的夹角在左2°~左6°; 当流量2 010 m³/s时, 航槽流速在0.75~2.05 m/s, 增幅为0.01~0.17 m/s, 主流流向与桥轴线法向的夹角在左1°~左4°; 比降在0.13‰~3.08‰, 较整治前有所减小, 减幅为0.01‰~0.04‰; 当流量12 000 m³/s时, 航槽流速在2.50~3.00 m/s, 除个别断面较整治前的航槽流速略有降低外, 其余断面流速均有所增加, 增幅为0.01~0.97 m/s, 主流流向与桥轴线法向的夹角右1°~左3°; 比降在0.06‰~3.16‰, 较整治前有所减小, 减幅为0.01‰。

3) 新槽方案2。

当流量为594、2010 m³/s时, 与方案1基本相同; 当流量12 000 m³/s时, 航槽流速在2.48~2.98 m/s, 除个别断面较整治前的航槽流速略有降低外, 其余断面均有所增加, 增幅0.01~0.86 m/s, 主流流向与桥轴线法向的夹角右1°~左3°; 比降在0.07‰~3.16‰, 较整治前略有减小, 减幅为0.01‰。

3.2 泥沙淤积分析

1) 老槽方案。

该方案整治后, 挖槽淤积并不明显, 淤积厚度在0.02~0.61 m, 淤积量约1.18万m³。各浅段挖槽切边回淤情况见表2。

表2 重点浅段挖槽回淤情况

挖槽区	淤积部位	淤积量/万 m ³	浅段长度/m	最小航道宽度/m
①	挖槽	0.33	360	45
②	江心洲右侧	0.49	450	45
③	挖槽	0.36	205	66

2) 新槽方案1、2。

相对于老槽方案, 新槽方案1整治后的河道淤积量增加了0.39万m³, 淤积量为1.57万m³。淤积的厚度约0.06~0.82 m。新槽方案2整治后, 3 a的淤积厚度约0.12~0.88 m, 淤积量为1.68万m³, 较老槽方案增加了0.5万m³, 各浅段挖槽切边回淤情况见表3。

表3 重点浅段挖槽回淤情况

挖槽区	淤积部位	淤积量/万 m ³	浅段长度/m	最小航道宽度/m
①	江心洲左侧	0.75	295	45
②	挖槽	0.34	165	45
③	挖槽	0.48	255	66

4 结论

1) 数学模型计算的水面线、流速分布及河床冲淤等与原型实测资料基本吻合, 验证精度符合规范的要求, 为该滩航道整治工程研究提供了良好平台。

(下转第137页)