

二维水流数学模型在通江河大桥防洪评价的应用

蒋友祥, 文 岑

(重庆交通大学 西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 修建跨河桥梁直接影响河道的行洪安全, 因此, 有必要对跨河桥梁建设项目进行防洪影响评价。为评价通江河大桥建成后对河道行洪可能带来的影响, 建立了基于非结构网格的平面二维水流数学模型, 并验证了其可靠性。采用该模型对通江河大桥工程河段进行了模拟计算, 计算结果表明河段上拟建大桥的存在对河段的防洪和水流特性无明显影响, 从而为该工程的审批和建设提供了有力的科学依据。

关键词: 防洪影响; 数学模型; 非结构网格; 跨河桥梁

中图分类号: TV131.2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2012)06—0114—03

Application of 2D Flow Mathematical Model in Flood Control Evaluation of Tongjiang River Bridge

JIANG You-xiang, WEN Cen

(Southwest Water Transportation Engineering Research Institute, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: It is necessary to evaluate the impact on flood control of a river-crossing bridge. To evaluate the influence on the flood control after Tongjiang River Bridge is built, a two-dimensional flow mathematical model based on unstructured grids has been built and tested. The model is adopted to simulate the flow in the engineering reach of Tongjiang River Bridge, and the simulation results show that the influence of the proposed bridge on flood control and flow characteristics is unobvious, thus to provide a strong scientific basis for the approval and construction of the project.

Keywords: influence on flood control; mathematical model; unstructured grids; river-crossing bridge

0 前 言

拟建通江河大桥位于巴中市梨子坪附近的通江河上, 在通江河口段和风滩大坝库区之间, 距通江入汇口约 2 km, 下距风滩大坝约 19 km, 左岸为梨子坪, 右岸为牟家河。大桥路基全宽为 23.5 m, 桥面宽度为 28 m, 大桥全桥长 1 105 m。大桥横跨通江河, 其中有 2 个桥墩位于水中, 其余桥墩位于岸上。

修建跨河桥梁必将侵占河道行洪断面, 壅高河道水位, 改变水流局部流态, 影响河道防洪安全^[1]。因此, 根据有关法律法规的要求^[2-3], 对通江河大桥建设项目防洪影响进行评价。防洪评价计算是防洪评价的主要内容^[4], 数学模型和物理模型是防洪评价常采用的两种方法, 其中物理模型虽较直观, 但在缩尺模拟时存在观测精度问题^[5], 且时间周期长、费

力。随着计算技术的快速发展, 二维水流数学模型因其模拟精度高、计算周期短而得到最广泛的应用^[6-7]。本文采用二维水流数学模型对通江河大桥防洪影响问题进行研究。

1 二维水流数学模型

1.1 守恒型宽浅河道水流的基本方程

水流连续方程:

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

X 方向动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) - \frac{\partial}{\partial x}\left(vh \frac{\partial u}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(vh \frac{\partial u}{\partial y}\right) + gh \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{gn^2u}{h^{1/3}} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (2)$$

Y 方向动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}(hvw) - \frac{\partial}{\partial x}\left(vh \frac{\partial u}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(vh \frac{\partial u}{\partial y}\right) + gh \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{gn^2u}{h^{1/3}} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (3)$$

其中: t 为时间; x, y 为空间坐标; z 为水位; h 为水深, $h = z - z_b$, z_b 为河床高程; u, v 分别为沿 x, y 方向的垂线平均流速; g 为重力加速度; n 为糙率系数; v_t 为湍流动能扩散系数。

本二维水流数学模型采用基于非结构网格的有限体积法,变量布置采用部分变量网格的节点布置水位和高程 z, z_b , 在单元的质心布置垂线平均流速 u, v 。具体布置见图 1 的网格布置情况。

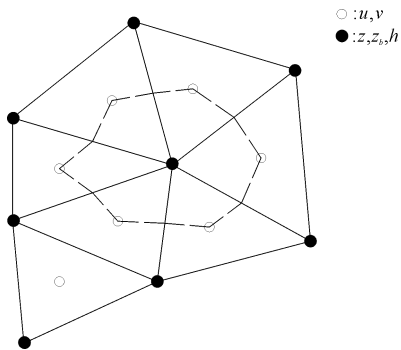


图 1 网格单元的分布及变量布置的示意图

1.2 网格划分

模型建立后,计算区域为:全长约 1.61 km,其中桥轴线上 0.98 km,桥轴线下约 0.63 km。主要采用三角形网格离散计算区域。网格大小疏密沿河道河势宽窄变化不等,在拟建桥墩附近的网格进行局部最密,将桥墩作为内部边界处理。由于本工程影响水流位于水中的桥墩,因此对此进行了概化处理,以尽可能反映其影响。本模型利用网格加密直接模拟桥墩形状,在建桥后将桥墩所在单元作为不过流单元处理。计算网格大小为 2 027 个单元,计算网格如图 2。

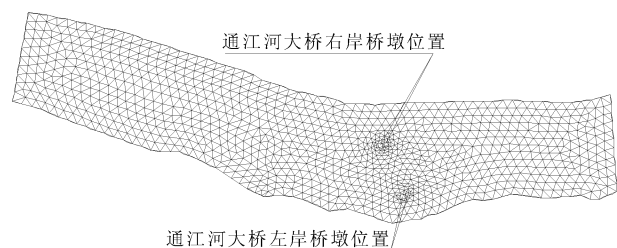


图 2 数学模型计算网格

1.3 初始条件

对于给定的研究域,在时间 $t = 0$ 时有:

$$\begin{aligned} h(x, y, t) |_{t=0} &= h_0(x, y) \\ r(x, y, t) |_{t=0} &= r_0(x, y) \\ s(x, y, t) |_{t=0} &= s_0(x, y) \end{aligned} \quad (4)$$

其中: h_0, r_0, s_0 分别为初始时刻的水位和流量分量。

1.4 边界条件

(1) 开边界

$$r = r_B(t), s = s_B(t), \text{ 或 } h = h_B(t) \quad (5)$$

其中: r_B, s_B 分别为已知流量过程线; h_B 为已知水位过程线。

(2) 固壁边界,即水与陆的边界,由壁面的不透水性,可令法向流速等于零,切向流速由曼宁—谢才公式确定。若法向流速与 X 轴夹角为 θ ,则 r 和 s 与 v_n 和 v_t 之转换关系为:

$$\begin{Bmatrix} v_n \\ v_t \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} r \\ s \end{Bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.5 模型验证

1.5.1 水位验证

依据实测资料对模型枯水流量水位进行了验证(施测水位分别为 291.26 m,对应流量为 $Q = 2\ 194\ \text{m}^3/\text{s}$),成果显示各水尺水位误差均在 0.04 m 以内,满足计算精度要求(见表 1)。由此验证率定得到的糙率为 0.030 ~ 0.038。

表 1 水位验证表

水尺号	实测水位/m	计算水位/m	差值/m
N ₁	291.284	291.309	0.025
N ₂	291.250	291.260	0.010
N ₃	291.308	291.280	-0.028
N ₄	291.305	291.336	0.031

1.5.2 流速验证

根据桥位河段实测流速资料,对模型流速进行了验证,在桥轴线(中断面)、桥轴线上 400 m(上断面)和桥轴线下 326 m(下断面)分别取验证断面共 3 个。计算流速按照指数流速分布公式转化为表面流速与实测值进行比较,验证结果见图 3 ~ 图 5。

研究建立的二维数学模型,通过工程河段水位、流速的验证,计算结果与实测资料吻合较好。说明本数学模型的建立和数值计算方法合理,模型基本能模拟实际河道的水流,可以进行下一步工程前后的行洪影响计算。

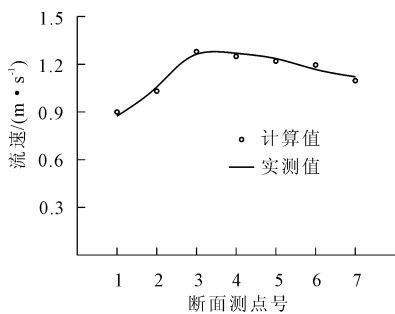


图 3 上断面流速验证图

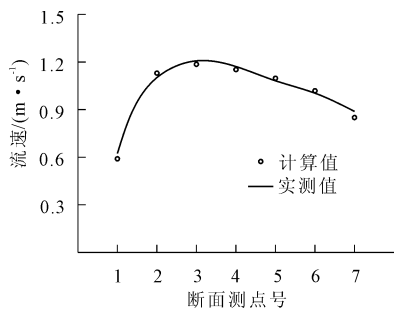


图 4 中断面流速验证图

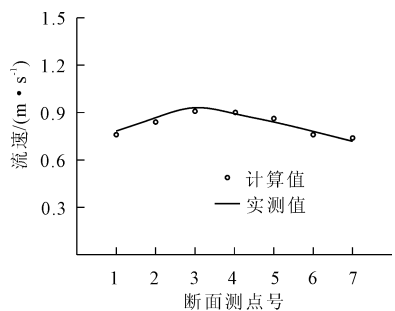


图 5 下断面流速验证图

2 计算分析

2.1 水文和边界条件计算

根据工程河段的防洪标准以及拟建工程的特点,选用 $P = 1\%$ 、 $P = 5\%$ 、 $P = 10\%$ 三级流量的水流工况下,计算流量水位见表 2。

表 2 计算工况

工况	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水位/m	洪水频率/%
I	20263	313.26	1
II	14585	308.3	5
III	12094	305.2	10

2.2 计算结果分析

2.2.1 过水面积缩窄率

在 $P = 1\%$ 、 $P = 5\%$ 、 $P = 10\%$ 三级流量工况下,桥墩占据的过水面积分别为 5.17%、5.78%、5.94%;原因主要是 2 个主墩承台位于水中,为尽量

减少桥墩占据的过水面积,建议将承台顶面高程降低至所在位置河床床面以下,则可有效减少过水面积占据率。

2.2.2 最大壅水高度

遇 $P = 5\%$ 洪水(巴中市郊区防洪标准为 $P = 5\%$),流量为 $14\,585\text{ m}^3/\text{s}$ 时,建桥造成桥墩上游的局部最大壅高值为 6 cm,桥墩下游局部水位略有降低,最大水位降低值为 5 cm。与该河段在天然情况下水位的涨落幅度相比较,建桥引起的水位壅高是微小的,水位壅高对该河段河势条件影响较小(见图 6)。

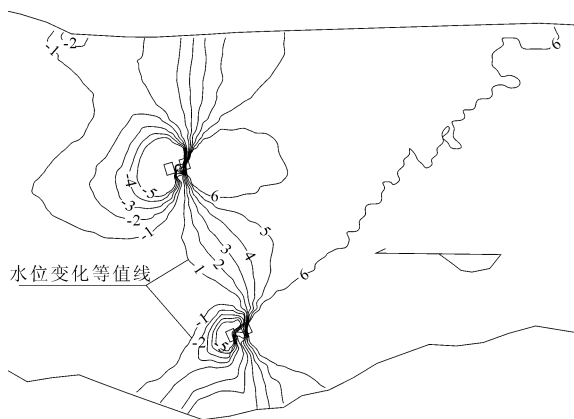


图 6 工程后桥位附近水位变化等值线图(单位:cm)

2.2.3 平面流速变化

模型计算表明,建桥后遇 $P = 5\%$ 洪水时,桥孔及其下游附近水域流速有一定的增加,流速最大增加值为 0.30 m/s ,桥墩后的掩流带流速减小,流速最大减小值为 0.30 m/s ,其余水域流场在建桥前后基本一致,工程前后主流线基本重合,建桥对流速分布及流向影响也是局部的。即除桥墩周围以外,各断面的流速分布、主流线位置都无明显变化(见图 7)。

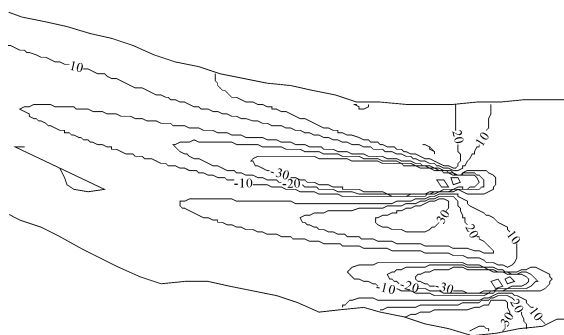


图 7 工程后桥位附近流速变化等值线图

由此可见,根据二维水流数学模型计算成果,工程实施后,其附近水域水位、流速、水流动力轴线变化均较小,工程对所在河道总体的河势稳定影响不大。

(下转第 150 页)

3 结 论

采用基于非结构的有限体积法建立了平面二维水流数学模型,研究了在通江河大桥工程修建对河道水流的影响。采用三角形网格对计算区域进行了网格划分,可以较好地让通江河大桥涉水桥墩在数学模型中反映出来。验证计算表明,采用的数学模型计算精度较高,能较好地模拟通江河的水流运动。计算结果分析从过水面积缩窄率、壅水水位、平面流速等 3 方面反映了修建通江河大桥工程对河段水流的影响;从计算结果看,拟建大桥的修建不会对工程河段的防洪和水流特性产生明显的不利影响。

在实际应用中,可根据工程特点不断完善,优化模型,使模型计算更加合理、可靠,让二维水流数学模型在防洪评价中更好地发挥作用。

参考文献:

- [1] 张家福.桥梁墩台对河道防洪影响的分析计算[J].广东水利电力职业技术学院学报,2006,4(1):35-38.
- [2] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家计划委员会.河道管理范围内建设项目管理的有关规定[Z].1992.
- [3] 中华人民共和国水利部.河道管理范围内建设项目防洪评价报告编制导则(试行)[Z].2004.
- [4] 胡清玲,蔺秋生,高海静,等.河道范围内修建码头工程的防洪影响评价[J].人民长江,2008,39(10):23-25.
- [5] 耿艳芬,王志力.桥渡对河道水流影响的二维无结构网格模型[J].水利水运工程学报,2008,(4):78-83.
- [6] 陈绪坚.胡春宏.桥渡壅水平面二维数学模型模拟研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2003,1(3):194-199.
- [7] 彭 凯.张绪进.赵世强.桥位附近水流及局部冲刷的数值模拟[J].水科学进展,2001,12(2):196-200.