

涉河桥梁阻水影响因素研究

丁 伟¹, 唐洪武^{1,2,3}, 戴文鸿^{1,2,3} 肖 洋^{1,2,3}

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用 VOF (volume of fluid) 方法和标准 $k-\varepsilon$ 模型, 对涉河桥梁桥墩附近河段三维流场进行了精细模拟, 通过不断改变桥墩宽、桥墩数、桥梁跨径、桥墩和水流的夹角、桥梁和水流的夹角和桥墩的布置形式等, 进一步分析各个因素对桥梁壅水的影响. 计算分析成果表明桥墩在桥梁稳定的前提下, 减少其宽度可以有效地降低壅水高度, 同时双圆柱型桥墩有利于降低壅水高度. 桥墩轴线尽可能顺应水流流向, 桥梁轴线尽可能与水流流向垂直, 至少要将夹角控制在 65° 以上.

关 键 词: 桥梁壅水; 数值模拟; VOF 方法

中图分类号: TV131.2⁺2; U442.3⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2011)04-0052-05

跨河桥梁的修建势必会侵占河道行洪断面, 水流流线在桥梁的上游收缩, 下游扩散, 加上桥体本身的阻力等因素, 使河流的局部阻力增大, 造成局部水头损失, 形成桥梁上下游的水位差, 也就是桥梁壅水^[1]. 桥梁壅水直接影响到两岸堤防、城市及沿岸企业的安全. 要有效降低壅水, 就需要对造成壅水的因素进行分析, 在以往的桥梁壅水分析中, 主要包括经验公式法、水工模型法和数值计算法, 而其中大多数公式对于桥墩壅水的计算都采用了保守的计算方法, 这显然也是出于安全的考虑, 但由于水流运动的复杂性, 对桥梁壅水规律的掌握是个渐进过程, 所以还需要对桥墩壅水进行更深层次的研究. 因此运用数学模型对壅水进行进一步的研究是十分必要的. 桥梁对壅水的影响是多方面的, 本文考虑桥梁和桥墩的主要参数和布置形式对壅水和流态的影响, 包括桥墩宽、桥梁跨径、桥墩数、桥墩轴线与水流的夹角、桥梁轴线与水流的夹角及桥墩形状.

1 模型及基本方程

桥墩附近流场是典型的三维气液两相流, 为了精确模拟桥墩附近的水流状况和周围流场, 计算时采用 VOF 模型^[2-3], 它主要适用于多种互不渗透且不可压缩流体运动截面的模拟. 在 VOF 模型中, 假设第 a 相流体的体积函数为 α_a , 当 $\alpha_a = 0$ 时, 表明该控制体积内无第 a 相流体; 当 $\alpha_a = 1$ 时, 表明该控制体积内充满第 a 相流体; 当 $0 < \alpha_a < 1$ 时, 表明该控制体积内包含第 a 相流体和其他流体的相间界面, 那么第 a 相流体的体积函数输移扩散方程为:

$$\frac{\partial \alpha_a}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_a}{\partial x_i} = 0 \quad \sum_{a=1}^n \alpha_a = 1 \quad (1)$$

连续方程:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

动量方程:
$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

收稿日期: 2011-08-10

基金项目: 水利部公益性科研专项经费项目(200901005); 国家自然科学基金面上项目(50779014); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009B02214); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(水利工程)

作者简介: 丁 伟(1985-), 男, 江苏大丰人, 博士研究生, 主要从事水力学及河流动力学方面研究.

通信作者: 戴文鸿(E-mail: wdai@hhu.edu.cn)

$$k - \varepsilon \text{ 方程: } \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$G = \mu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$$

式中: u_i 为流体速度; ρ 为流体密度; p 为包含重力的压力项; μ 和 μ_t 分别为流体分子黏性系数和紊动黏性系数; k 为紊动能; ε 为紊动能耗散率; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的紊流普朗特数. 上述方程中 $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$, $C_\mu = 0.99$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 均为经验常数.

2 数值模拟及结果分析

本文主要研究其中几个对桥梁壅水影响大的参数,具体研究方法是变化参数中的1个,固定其他参数,逐个研究. 建立数学模型后,运用商业软件作为求解器来模拟桥梁壅水,得到桥墩附近流场、水面线等进行比较分析. 涉河桥梁由于桥墩占用过水面积引起水流收缩和扩散,相应引起上游水流压缩,水位增高,形成壅水. 壅水高度与桥梁阻水面积百分比、流速、桥墩和河床底质等有关^[4-5],阻水面积百分比是比较明确的参数,也易于控制. 而桥墩宽、桥墩轴线与水流的夹角、桥墩数、跨径均会对阻水面积百分比造成影响.

本文首先选用概化的河道参数:顺直河道, V 型断面, 河长 $L = 2\,250$ m, 河宽 $B = 350$ m, 下游水位 $Z = 10$ m, 平均水深 $H = 10$ m, 河道底坡 $i = 0.000\,16$, 糙率 $n = 0.035$. 无桥梁存在时,水流基本呈均匀流态,即水力坡降 $J = i = 0.000\,16$. 模型计算时,给定上游流量边界条件 $Q = 3\,000$ m³/s. 桥梁各工况下参数见表1.

表1 各工况下桥梁参数

Tab. 1 Bridge characteristics in all conditions

	桥墩数/个	桥墩宽/ m	桥墩轴线与水流向夹角/ (°)	桥梁轴线与水流向夹角/ (°)	跨径/ m
工况1	4	0.5 ~ 7.0	0	90	≈21
工况2(图1)	4	3.0	0 ~ 45	90	21
工况3(图2)	4	3.0	0	45 ~ 90	21
工况4	1 ~ 4	3.0	0	90	随墩数变化

2.1 桥墩宽、数目及跨径的模拟结果及分析

桥墩宽是桥梁的重要参数,由图1可见,对于工况1,加大桥墩宽度,壅水和流速都会有所增加. 桥墩数和跨径对桥梁壅水也有一定的影响,在其他因素相同的情况下,桥墩数越多,跨径就会相对越小,桥梁的阻水面积也就越大,对水流影响也就越大. 图2的计算结果表明这两点都是通过改变阻水面积来影响壅水,且从图中可见对壅水的影响基本上是线性的.

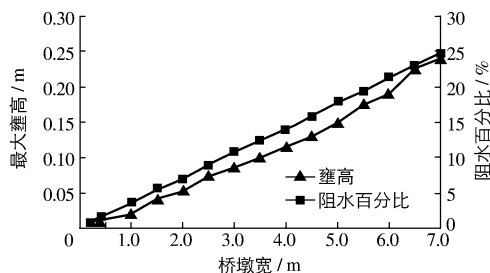


图1 桥墩宽度变化影响

Fig. 1 Effects of width of bridge piers

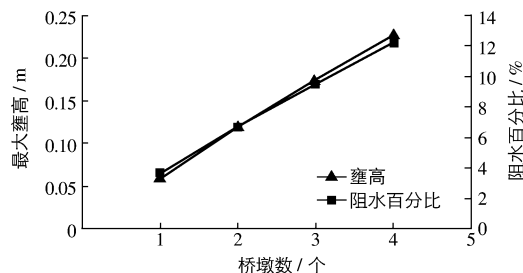


图2 桥墩数变化影响

Fig. 2 Effects of numbers of bridge piers

2.2 斜交桥模拟结果及分析

受地形、地貌、地质、水文条件和人为因素的影响,许多跨河桥梁往往设计成与河道斜交的形式,桥墩的阻水更加复杂.通常情况下有桥梁轴线与水流方向有夹角(工况 2)和桥墩轴线与水流方向有夹角(工况 3)的 2 种斜交问题^[6-7].

桥墩轴线与水流夹角的改变会对壅水产生很大的影响,在计算壅水的时候需要考虑夹角的影响.如图 3(a)中所示,从 0° 到 10° ,阻水百分比增加 7.87%,壅高增大 0.12 m;从 10° 到 20° ,阻水百分比增加 7.39%,壅高增大 0.14 m;从 20° 到 30° ,阻水百分比增加 6.69%,壅高增大 0.18 m;从 30° 到 40° ,阻水百分比增加 5.74%,壅高增大 0.2 m.可以看出随着桥墩轴线与水流的夹角逐渐增大,最大壅水高度随着斜交角度的增大而增大.

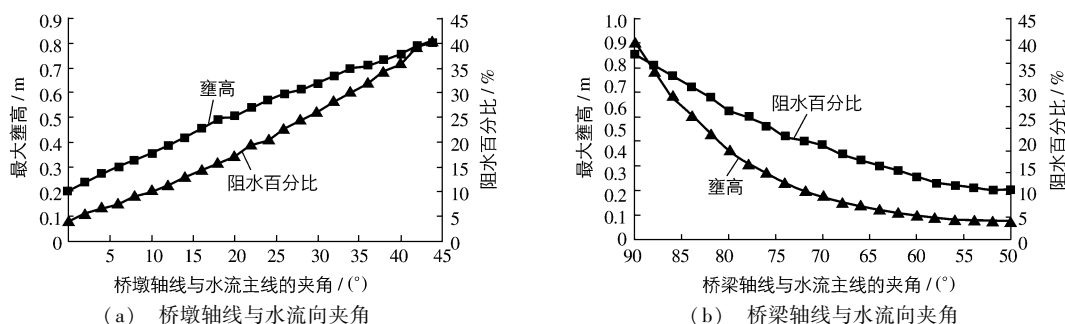


图 3 桥墩轴线及桥梁轴线与水流向夹角的影响

Fig. 3 Effects of angles between axis of bridge pier and axis of bridge and flow direction

除了桥墩轴线与水流的夹角会对壅水产生影响以外,桥梁轴线与水流主线的夹角也会影响到壅水.由图 3(b)中计算结果可以明显看出,当桥梁轴线与水流主线的夹角大于某一值时,对壅高的影响呈线性,随着夹角的减小,壅高的增幅逐渐增大,在夹角为 65° 时增幅已较为明显,尤其是从 60° 到 45° 的时候,最大壅水高度随着斜交角度的增大而增大的趋势进一步增强.这是因为斜交角度较大时,上下游桥墩在正交断面上的投影间距较小,水流被压缩,上游桥墩尾流和下游桥墩加速区水流产生相互叠加的现象(图 4).在孔距一定的情况下,上下游桥墩的相互干扰是不可忽略的,干扰程度随相邻桥墩间距的增大而减弱.

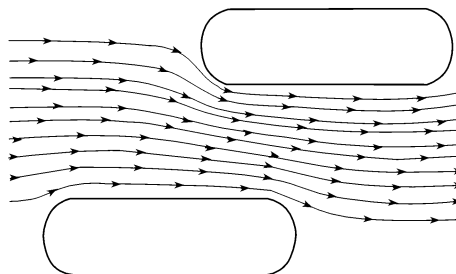


图 4 斜交桥桥墩附近流线

Fig. 4 Sketch of flow velocities around bridge piers

2.3 不同形状桥墩模拟结果及分析

对于常见不同形状桥墩对壅水的影响,需要进行更为精细的模拟. FLUENT^[8-9] 提供了灵活的网格特性,用户可方便使用结构网格和非结构网格对各种复杂区域进行网格划分,同时可以对网格进行整体或局部的细化,可以得到桥墩附近高精度的流场图和壅水图.

比较常见的有双圆柱串联型桥墩、半圆形头尾桥墩和等腰三角头尾桥墩.采用概化模型,在其他条件固定的情况下,分别对上述 3 种不同形状的桥墩进行模拟分析.为避免计算区域顶部边界对计算结果带来的影响,流体空气部分与液体部分的深度之比应大于 $1/3$.本文选用以下概化模型参数:计算区域为长 4 m,宽 0.7 m,高 0.12 m,初始水面高 0.08 m,河道糙率为 0.015,流速 $v=0.4$ m/s,压缩段取在河道中间位置,分别采用双圆柱串联型桥墩、半圆形头尾桥墩和等腰三角头尾桥墩进行模拟计算.其中 3 种桥墩迎水面宽度一样,均为 0.02 m.模拟结果可见图 5(图中长度均以 m 为单位,流速以 m/s 为单位,壅水高度图中灰色和黑色分界线为液气分界线,即水面线).

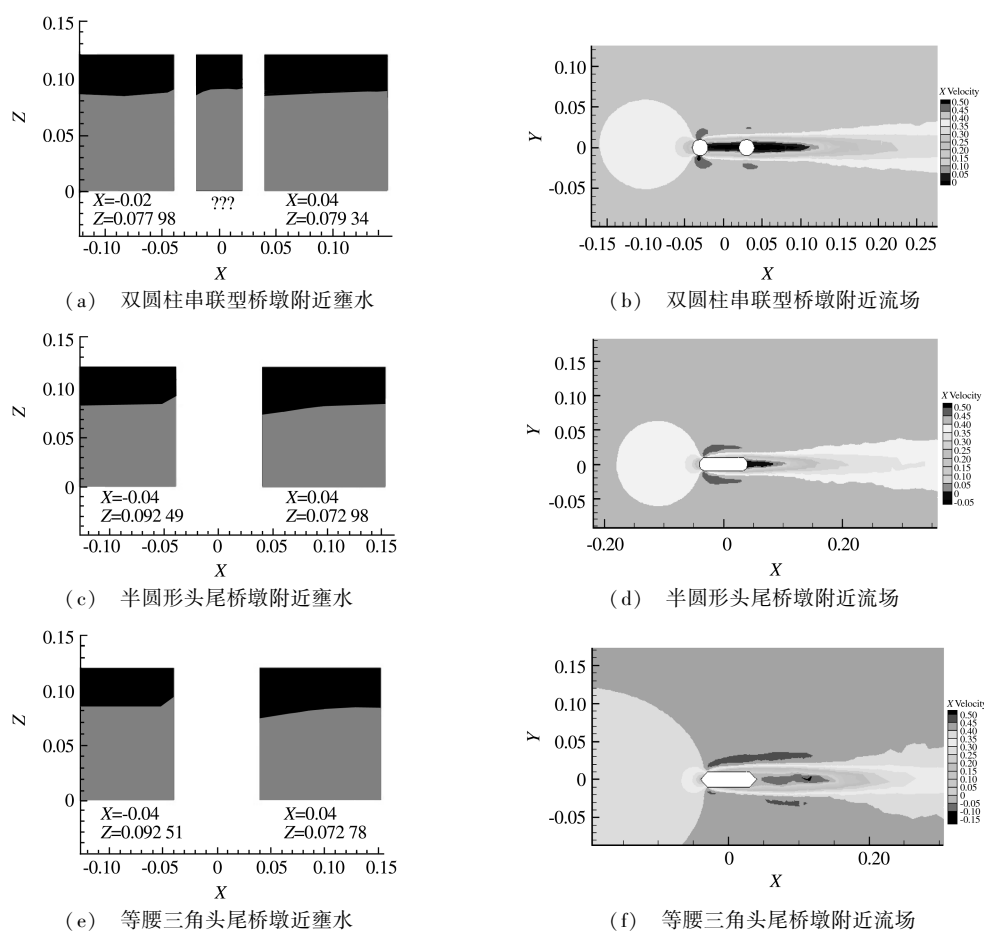


图5 各种桥墩对水流的影响

Fig.5 Influences of different kinds of bridge piers on flow field

模拟分析结果表明,在桥墩迎水面宽度一样的情况下,双圆柱串联桥墩的水流加速区范围最小,同时壅水高度相比其他两种桥墩较低,而半圆形头尾桥墩和等腰三角头尾桥墩的壅水高度基本一致,且水流加速区范围相差不大.

3 结 语

河道上桥梁的设置会对附近的流场产生影响,研究桥梁附近的壅水和流场分布,有助于涉河桥梁的防洪分析,进而在桥梁设计及布置时采取有效的措施.本文采用VOF方法对桥梁附近的流场进行了精细模拟,取得了较为理想的结果,结果显示,桥墩在桥梁稳定的前提下,减少其宽度可以有效地降低壅水高度,同时双圆柱型桥墩比半圆形头尾桥墩和等腰三角头尾桥墩更有利于降低壅水高度.桥墩轴线尽可能顺应水流流向,桥梁轴线尽可能与水流流向垂直,如有需要,存在一定偏角对水流影响不大,但夹角应控制在 65° 以上.需要注意本文研究工况中所采用的参数与实际河流有一定差距,如河道形状,且河道水流流速和糙率等在同一横断面不同位置也不尽相同^[10],这需在下一步工作中着重探讨.

参 考 文 献:

- [1] 陆浩,高冬光. 桥梁水力学[M]. 人民交通出版社,1991. (LU Hao, GAO Dong-guang. Bridge hydraulics[M]. China Communications Press, 1991. (in Chinese))

- [2] 张健, 方杰, 范波芹. VOF 方法理论与应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 67-70. (ZHANG Jian, FANG Jie, FAN Bo-qin. Advances in research of VOF method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(2): 67-70. (in Chinese))
- [3] HIRT C W, HICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for dynamics of free boundaries[J]. J Copm Phys, 1981, 39: 2012221.
- [4] 张细兵, 余新明, 金琨. 桥渡壅水对河道水位流场影响二维数值模拟[J]. 人民长江, 2003, 34(4): 23-24. (ZHANG Xi-bing, YU Xin-ming, JIN Kun. Numerical simulation of water levels and flow field in upstream back water area of bridge and aqueduct[J]. Yangtze River, 2003, 34(4): 23-24. (in Chinese))
- [5] 郑仰奇, 李怀恩, 张强, 等. 河道多桥连续壅水分析[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 37-39. (ZHENG Yang-qi, LI Huai-en, ZHANG Qiang, et al. Analysis of backwater on multi-successive bridges in river course[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2005, 16(3): 37-39. (in Chinese))
- [6] 李付军, 张佰战, 林桂宾. 斜交桥下水流流向偏转角度的理论分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 634-637. (LI Fu-jun, ZHANG Bai-zhan, LIN Gui-bin. Theoretical analysis of the deflection degree of the flow direction under bevel bridge[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 634-637. (in Chinese))
- [7] 季日臣, 何文社, 房振叶. 斜交桥壅水试验研究与理论探讨[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 504-508. (JI Ri-chen, HE Wen-she, FANG Zhen-ye. Experimental and theoretical study of skew bridge backwater[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(4): 504-508. (in Chinese))
- [8] 韩占忠, 王敬, 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008. (HAN Zhan-zhong, WANG Jing, LAN Xiao-ping. Application example of CFD with fluent[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008. (in Chinese))
- [9] 黄国鲜, 周建军, 陈界仁. 复杂边界下同位网格和交错网格水流模型收敛性[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2006, 46(6): 785-788. (HUANG Guo-xian, ZHOU Jian-jun, CHEN Jie-ren. Convergence of flow models using staggered and collocated grids with complicated boundaries[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2006, 46(6): 785-788. (in Chinese))
- [10] 浙江省涉河桥梁水利技术规定(试行)[S]. (Technical regulation for river bridges of Zhejiang Province[S]. (in Chinese))

On resistance factors of river bridges

DING Wei¹, TANG Hong-wu^{1,2,3}, DAI Wen-hong^{1,2,3}, XIAO Yang^{1,2,3}

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;
3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Three dimensional flow fields around bridge piers are simulated accurately by using VOF method and standard model. Factors affecting blocking water of piers including width of bridge piers, numbers of bridge piers, angle of axis of bridge pier and flow direction, angles between axis of bridge and flow direction and arrangement form of bridge piers reacting on blocking water height are analyzed in this paper. Analysis shows that VOF model can be used to track the free surface flow and applicable to numerical simulation of the water flow, and that it can lower the bridge blocking water effectively as the decrease of width of bridge piers. Compared with other types of bridge piers, dual cylinder bridge piers have superiority to some extent, and the angle between the middle-line of the bridge and the river flow should be larger than 65° . The result shows that this research is somewhat helpful to the prediction of bridge blocking water and the design of bridges.

Key words: blocking water of bridges; numerical simulation; volume of fluid method