

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.04.009

异形孔桥墩附近河道水流流动特性

傅宗甫¹,赵春潮²,安建峰¹

(1.河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098;2.淮安市水利勘测设计研究院有限公司,江苏 淮安 223005)

摘要:采用三维水力数学模型,计算分析了异形孔桥墩附近河道的水流流动特征,比较了建桥前后桥址附近河道的流场分布,得到了异形孔桥墩附近河道的水流流场、墩前阻水范围,桥墩下游的尾流区长度、宽度以及河床附近的涡量、切应力等的分布规律,并给出了墩前阻水长度,尾流区长度和宽度以及河床表面最大切应力与墩前断面弗劳德数的关系及经验公式.结果表明,异形孔桥墩对桥址附近的水流流动影响显著,墩前阻水长度与墩前断面弗劳德数呈正相关关系,而尾流区长度和宽度以及河床表面最大切应力与墩前断面弗劳德数呈线性关系.

关键词:异形孔桥墩 流动特性 尾流

中图分类号:U442.5 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2011)04-0402-05

桥梁是跨越江河、湖海以及高速公路的交通工程建筑物.据不完全统计,我国现有主跨跨径 200 m 以上的桥梁近 110 座,就跨径而言,已建成桥梁有 16 座跻身于世界桥梁排行前 10 名.随着社会生产力的发展,科学技术的进步,桥梁建筑技术不断更新进步,桥梁类型多样,外观更是千姿百态,桥梁设计施工中不仅考虑到桥梁的结构稳定和安全运行,还考虑到桥梁在城市景观中的作用,采用各种不同外形的桥墩^[1].因此,开展对新型桥墩水流流动特性的研究,对于桥梁设计以及河道通航安全等是非常必要的.

异形孔桥墩是为了兼顾城市景观而设计的一种新型桥墩,该型桥梁桥墩迎水面墩头不是流线型或者半圆头状,而是垂直水流方向的直立面,类似于垂直水流放置的平板,通常在河道中心布置 1 个主桥墩.该型桥墩尽管为了兼顾景观并减小桥墩的阻水作用、改善桥墩下游的水流条件,在桥墩上设置了椭圆形的异形孔(图 1),异形孔顶部高程高于河道最高水位,但是桥墩附近的水流条件仍非常复杂.

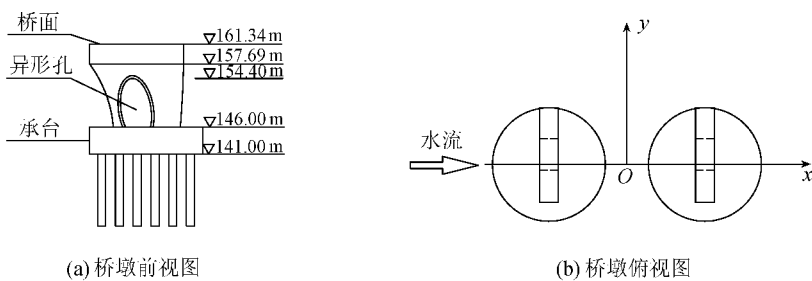


图 1 异形孔桥墩结构

Fig. 1 Structure layout of bridge pier with special orifice

目前,关于传统圆柱形桥墩附近河道的流动特性及桥址冲刷方面的研究已很多,流动特性研究主要针对建桥后绕流流场的变化^[2-5]、桥墩壅水高度^[6-7]以及尾流区的几何特性^[8-9],桥址冲刷研究大多基于局部冲刷公式以及数值模拟方法进行计算分析^[10-13],而关于特殊外形桥墩的流动特性的研究还不多见^[14].本文采用三维水力数学模型对异形孔桥墩附近河道的水流流场、墩前阻水范围、尾流区长度和宽度、近河床表面涡量场、河床切应力等流动特性进行了计算与分析.

1 数学模型及求解方法

1.1 基本控制方程及求解方法

水流控制方程采用带自由表面的不可压缩连续性方程和雷诺方程^[15].计算中对三维水流运动控制方程进行了时间域和空间域的离散化处理.其中,空间域离散化处理采用一阶迎风格式,时间域离散化处理采用

全隐式方法.

气液两相流模型采用精度较高的几何重构 VOF 方法跟踪自由表面,紊流模型选择标准 $k-\epsilon$ 模型,近壁区处理采用壁面函数法,压力与速度的耦合关系处理采用 PISO 算法.

1.2 计算域及网格剖分

本文计算模型根据实际桥梁工程概化得到,长度为 300 m(上游长度为 100 m,下游长度为 200 m),高度为 13 m.模型沿河道横断面方向将已知断面概化为复式断面,水面宽由低水位到高水位为 150 ~ 220 m.基于建桥后桥墩结构和河道边界的复杂性,计算过程中采用非结构网格(图 2).

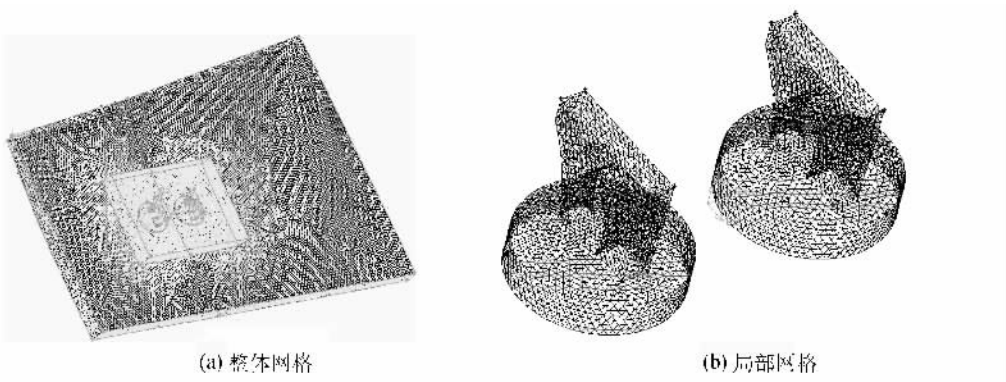


图 2 计算网格
Fig. 2 Plan of computational mesh

1.3 定解条件

水流入口边界采用速度进口条件,给定速度大小,建立模型时设定水流入口水位;入口断面水面以上部分、计算域顶部以及出口断面水面以上部分设为气体压力进口条件;下游出口按明渠出流控制水位.起始计算时将进口断面估算的一个流速作为全计算域的初始流速.进、出口紊动能 k 和紊动耗散率 ϵ 由式(1)计算得到.

$$k = 1.5(0.16uRe^{-1/8})^2 \quad \epsilon = 0.09^{3/4} \frac{k^{1.5}}{l}$$

(1)

式中: u ——入口流速; Re ——入口雷诺数; l ——特征长度.

2 桥址附近河道水流流动特性分析

2.1 桥墩附近水流流速分布

桥址附近河道建桥前后流速分布如图 3 所示.从图 3 可以看出 建桥后异形孔桥墩对其附近的河道水流流速分布影响显著,相比原河道流速分布,建桥后虽然为了减轻桥墩的阻水作用,在桥墩上设置了异形孔,但是桥墩前仍存在一定范围的减速区,而桥墩两侧河道水流则受桥墩的挤压,流速有较明显的增加.桥墩下游的水流受桥墩遮流影响,存在一明显的尾流低流速区.

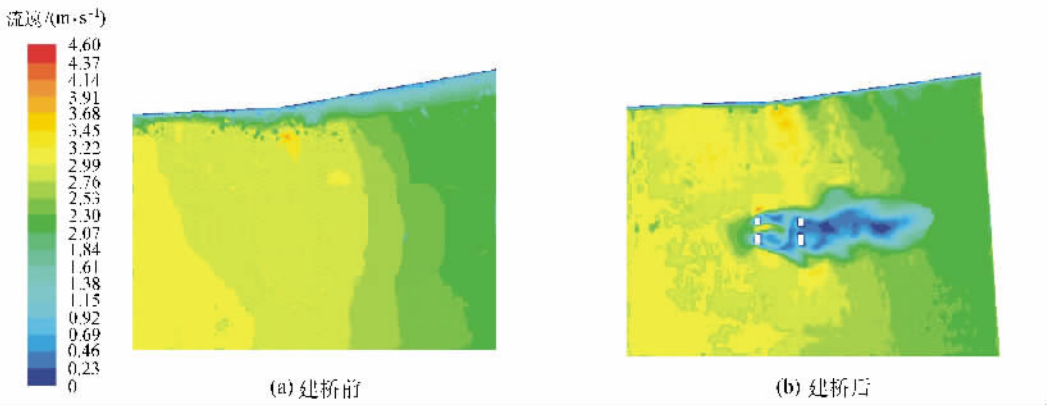


图 3 异形孔桥墩附近河道流速分布
Fig. 3 Velocity distribution near bridge pier with special orifice

2.2 桥墩墩前阻水范围

桥墩墩前阻水影响范围以墩前河道断面流速分布及河道水位基本不受桥墩影响为界. 计算结果表明, 墩前阻水长度与来流流速、水深以及桥墩尺度有关. 图 4 给出了墩前阻水相对长度 L_1/b (L_1 为墩前阻水长度, b 为水面以下桥墩迎水面平均宽度) 与墩前断面弗劳德数 Fr 的关系. 从图 4 可以看出, 总体上 L_1 随着 Fr 的增大而增加, 而且 Fr 较小时 L_1 增速较快, 而后变化较缓. 通过最小二乘法拟合可得

$$\frac{L_1}{b} = 2.842 - 0.841e^{\frac{0.25 - Fr}{0.01}} \tag{2}$$

2.3 尾流区几何特性

尾流区的几何特性用尾流区的长度和宽度来描述, 尾流区的长度和宽度通常与桥墩的形状和来流条件有关, 为了得到通用的计算公式, 将尾流区的长度与宽度以相对长度、相对宽度形式 (将实际尾流长度 L_2 、宽度 E 除以水面以下桥墩迎水面平均宽度 b) 给出. 计算结果表明, 尾流区相对长度 L_2/b 与最大相对宽度 E/b 均与 Fr 呈线性关系 (图 5), 回归后可得

$$\frac{L_2}{b} = 82.67 Fr - 14.64 \tag{3}$$

$$\frac{E}{b} = 8.6 Fr - 0.08 \tag{4}$$

回归相关系数分别为 0.97 和 0.99, 说明 L_2/b 和 E/b 均与 Fr 关系密切.

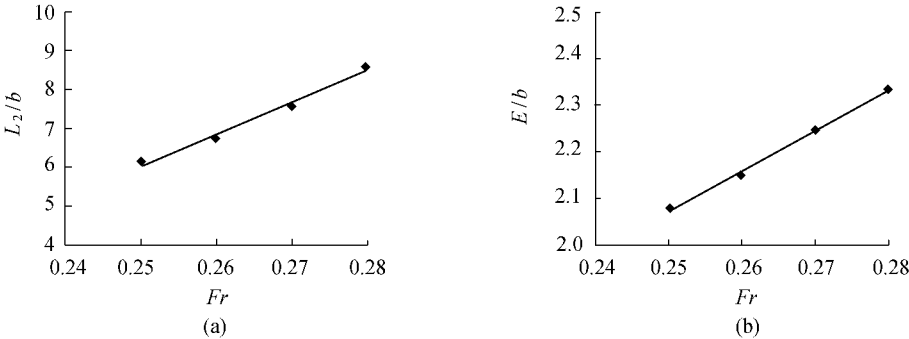


图 5 尾流区相对长度 (L_2/b) 和相对宽度 (E/b) 与墩前断面弗劳德数 (Fr) 的关系

Fig. 5 Relation of relative length and width of wake region (L_2/b) with Froude number upstream of bridge pier (Fr)

2.4 桥墩附近河床表面的涡量场特性

绕过桥墩的水流将会在桥墩下游附近产生一系列漩涡, 漩涡强度通常用涡量来衡量. 桥墩附近河床表面 z 方向 (垂向) 的涡量分布如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 在对应桥墩下游尾流区及其附近存在明显的漩涡区, 涡量也比较大, 而在尾流区之外区域, 涡量很小且比较均匀.

2.5 桥墩附近河床表面切应力特性

桥墩附近河床表面切应力反映的是水流对河床的作用, 切应力的大小直接关系到水流对床面的冲刷程度. 桥墩附近河床表面切应力分布如图 7 所示. 图 7 表明, 在尾流区与外流区交界面附近切应力较大, 外流区切应力很小, 只有最大切应力 τ_{max} 的 20% 左右. 计算中还发现, 随着 Fr 的增大, τ_{max} 也逐渐增大. τ_{max} 与 Fr 的关系如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 桥墩附近床面的

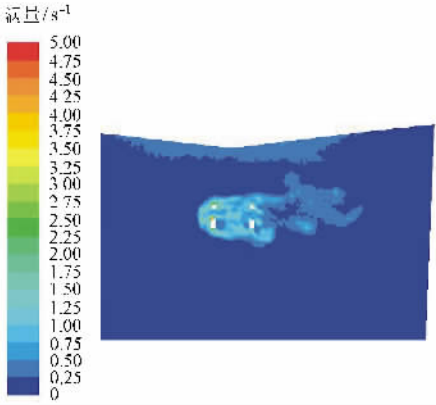


图 6 桥墩附近河床涡量分布

Fig. 6 Vorticity distribution of river bed near bridge pier

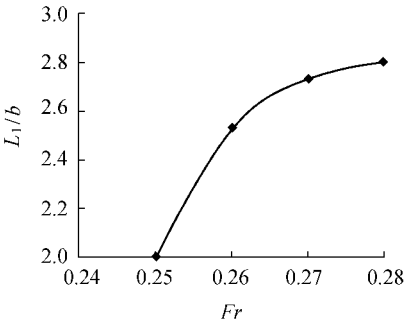


图 4 墩前阻水相对长度 (L_1/b) 与墩前断面弗劳德数 (Fr) 的关系

Fig. 4 Relation of hindrance relative length for flow approaching bridge pier (L_1/b) with Froude number upstream of bridge pier (Fr)

$\tau_{\max}$ 与 Fr 基本上也呈线性关系,拟合后可得

$$\tau_{\max} = 295 Fr - 48.3 \tag{5}$$

拟合的相关系数为 0.9847,说明 $\tau_{\max}$ 与 Fr 关系密切.

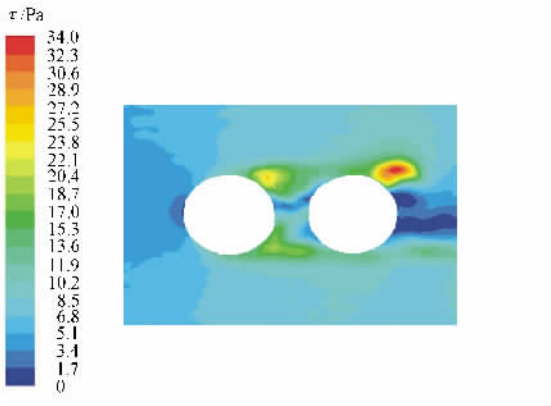


图 7 桥墩附近河床表面切应力分布
Fig. 7 Bed shear stress distribution
near bridge pier

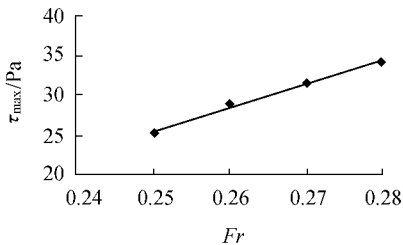


图 8 桥墩附近河床表面最大切应力($\tau_{\max}$)与
墩前断面弗劳德数(Fr)的关系
Fig. 8 Relation of maximum bed shear stress near
bridge pier ($\tau_{\max}$) with Froude number (Fr)

3 结 论

- a. 异形孔桥墩对桥址附近的水流流动影响明显,墩前存在一定范围的减速区,桥墩两侧河道水流流速有较明显的增加,桥墩下游存在明显的尾流区.
- b. 墩前阻水长度随着墩前断面弗劳德数的增大而增加,而且当墩前断面弗劳德数比较小时,增加较快,而后变化较缓.
- c. 尾流区相对长度与最大相对宽度均与墩前断面弗劳德数呈线性关系.
- d. 桥墩下游尾流区及其附近存在明显的漩涡区,涡量也比较大,而在尾流区之外区域,涡量较小,且比较均匀.
- e. 河道床面尾流区与外流区交界面附近切应力比较大,外流区的切应力只有最大切应力的 20% 左右,最大切应力随着墩前断面弗劳德数的增大而逐渐增大,桥墩附近床面的最大切应力与墩前断面弗劳德数基本上也呈线性关系.

参考文献：

[1] 齐梅兰,王国华. 新型桥墩局部冲刷研究[J]. 中国铁道科学,2002(3) 99-103. (QI Mei-lan,WANG Guo-hua. Study on local scour of new type of bridge pier[J]. China Railway Science,2002(3) 99-103. (in Chinese))

[2] 孙东坡,杨慧丽,张晓松,等. 桥墩冲刷坑的三维流场测量与数值模拟[J]. 水科学进展,2007(5) 711-716. (SUN Dong-po,YANG Hui-li,ZHANG Xiao-song,et al. Measurement and simulation of 3-D flow field in the pier scouring pool[J]. Advances in Water Science,2007(5) 711-716. (in Chinese))

[3] 田伟平,沈波. 圆柱桥墩绕流特性理论研究[J]. 长安大学学报:自然科学版,2003(1) 54-57. (TIAN Wei-ping,SHEN Bo. Circul ing flow characteristics around cylinder pier[J]. Journal of Chang 'an University :Natural Science Edition,2003(1) 54-57. (in Chinese))

[4] 邹冰,李东风,张红武. 建桥对河流水力影响的数值计算分析研究[J]. 杭州电子科技大学学报,2007(3) 33-36. (ZOU Bing,LI Dong-feng,ZHANG Hong-wu. Effect analysis of building bridges on river hydraulic dynamics circumstances by 2D numerical method[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University,2007(3) 33-36. (in Chinese))

[5] 王庆珍,李田生,官盛飞. 圆柱形桥墩附近三维流场分析研究[J]. 公路交通技术,2008(2) 47-50. (WANG Qing-zhen,LI Tian-sheng,GUAN Sheng-fei. Analysis of three dimensional stream fields around columnar piers[J]. Technology of Highway and Transport, 2008(2) 47-50. (in Chinese))

[6] 张细斌,余新民,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(4) 23-24. (ZHANG Xi-bin,YU Xin-min,JIN Kun. 2D numerical simulation of flow field inupstream back water area of bridge and aqueduct[J]. Yangtze River,2003(4) 23-

24. (in Chinese))

- [7] 张念. 桥墩壅水的数值模拟[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [8] 胡旭跃, 沈小雄, 程永舟, 等. 墩柱周围水流表层涡旋区宽度的试验研究[J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2004(1): 39-42. (HU Xu-yue, SHEN Xiao-xiong, CHENG Yong-zhou, et al. Experimental investigation on width of superficial eddy area around cylindrical pier[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2004(1): 39-42. (in Chinese))
- [9] 庄元, 刘祖源. 桥墩紊流宽度的试验研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2007(5): 846-849. (ZHUANG Yuan, LIU Zu-yuan. Experimental investigation on width of turbulence area around bridge pier[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2007(5): 846-849. (in Chinese))
- [10] 凌建明, 林小平, 赵鸿铎. 圆柱形桥墩附近三维流场及河床局部冲刷分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007(5): 582-586. (LING Jian-ming, LIN Xiao-ping, ZHAO Hong-duo. Analysis of three-dimensional flow field and local scour of riverbed around cylindrical pier[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007(5): 582-586. (in Chinese))
- [11] 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(2): 196-200. (PENG Kai, ZHANG Xu-jin, ZHAO Shi-qiang. A numerical model of scouring and silting around bridge location[J]. Advances in Water Science, 2001(2): 196-200. (in Chinese))
- [12] 李奇, 王义刚, 谢锐才. 桥墩局部冲刷公式研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(2): 85-88. (LI Qi, WANG Yi-gang, XIE Rui-cai. The research development of the formulae of local scour around bridge piers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(2): 85-88. (in Chinese))
- [13] 方神光, 黄胜伟. 纯隐格式的混合有限分析法在广雅桥水流数值模拟中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(6): 53-57. (FANG Shen-guang, HUANG Sheng-wei. Application of implicit scheme hybrid finite analytic method in numerical simulation of flow effect by Guangya Bridge[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(6): 53-57. (in Chinese))
- [14] 刘保军, 陈明栋, 杨忠超, 等. 异形桥墩冲刷试验研究[J]. 重庆交通学院学报, 2006(6): 31-34. (LIU Bao-jun, CHEN Min-dong, YANG Zhong-chao, et al. Experiment study on local score around a new special bridge pier[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2006(6): 31-34. (in Chinese))
- [15] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics[M]. London: Pearson Education Limited, 1995.

Flow characteristics around bridge pier with special orifice

FU Zong-fu¹, ZHAO Chun-chao², AN Jian-feng¹

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Huai'an Investigation and Design Institute of Water Conservancy, Huai'an 223005, China)

Abstract: The flow characteristics around the bridge pier with a special orifice were simulated and analyzed using the 3-D hydrodynamic mathematical model. The velocity fields near the bridge site were compared before and after the bridge construction. The velocity field around the bridge pier with a special orifice, the hindrance length for flow approaching bridge pier, the length and width of the wake region downstream of the bridge pier, the vorticity and shear stress distribution near river bed were obtained. The relationships of the hindrance length for flow approaching bridge pier, the length and width of the wake region downstream of the bridge pier, and the maximum bed shear stress with the Froude number upstream of the bridge pier were provided, and their experiential formulae were also obtained. The results show that the bridge pier with a special orifice has a remarkable influence on water flow near the bridge pier, the hindrance length for flow approaching bridge pier has a positive correlation with the Froude number upstream of the bridge pier, and the length and width of the wake region and the maximum bed shear stress vary approximately linearly with the Froude number upstream of the bridge pier.

Key words: bridge pier with special orifice; flow characteristics; wake flow