

文章编号:1001-5485(2009)09-0029-03

U 形弯道水流试验及其数值模拟

李爱香¹, 孙 一¹, 赵小娥¹, 刘同宦², 王协康¹

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065;

2. 长江科学院 河流研究所, 武汉 430010)

摘要:弯道水流运动是河流动力学研究的基本问题之一, 长期以来, 其复杂的三维水流结构一直是研究者关注的重点。弯道水流在重力及离心力的共同作用下, 形成弯道螺旋流, 与顺直河道相比, 具有特有的运动特性, 主要表现在产生水面横比降、横向环流、流速重分布等方面。用声速多普勒流速仪(ADV), 对室内 U 形弯道水流结构进行了详细的测量, 分析表明弯道环流出现了较为明显的双涡二次流变化过程。此外, 试验验证结果表明雷诺应力模型(RSM)能较好地模拟弯道环流双涡二次变化过程, 为深入分析弯道水流特性及其对泥沙运动、河床演变等影响问题提供了科学方法。

关 键 词:弯道水流; 试验分析; 数值模拟; 主流平均速度; 环流

中图分类号:TV143.2 **文献标识码:**A

1 概 述

弯道水流不同于顺直水流, 具有典型的螺旋流特征。由于水流经过弯道作曲线运动时, 离心力的存在使原有水流结构的平衡状态遭到破坏, 从而使水面产生横比降、造成了横断面上的环流; 自由水面的变形和横向水流运动反过来又引起纵向流速特征的重新调整。弯曲河道特有的水流特性, 决定着泥沙运动特性及其河床调整。长期以来, 国内外学者从理论、试验及原型观测等方面着手, 对不同弯曲程度的河道水沙运动特性进行了研究^[1-7]。如 Sudo 等通过室内试验, 分析了 90°弯道水流紊动特性^[8]。Ahmed 通过试验分析了 30°弯道的平均流速变化^[9]。刘月琴等对 90°和 60°组成的多弯道水流紊动强度进行了试验研究^[10]。许光祥等对单一 90°弯道水流紊动特性进行了较好的总结与归纳^[11]。刘健等通过水槽试验, 研究了中心角为 60°的弯道水流特性^[12]。由于弯道中的螺旋流是一种复杂的三维紊流, 众多研究者常用借助假设条件, 对弯道的二维水流数值模拟进行了较多的研究^[13-16], 如董耀华基于实际应用的考虑, 建立了一套模拟弯道水流运动的极坐标下水深平均二维数学模型, 并得到了试验及野外资料的验证^[17]。刘玉玲等通过对二维浅

水方程的修正, 使得平面二维模型考虑了二次流对流线弯曲的影响^[18]。当前, 大型流场分析软件 Fluent 应用实践表明其对于复杂三维水流结构具有较好的模拟能力, 如林小平等以 Fluent 软件对 90°弯道水流三维流场进行了模拟, 以此分析了弯道路基冲刷机理^[19]。

本文主要基于室内试验, 用声速多普勒流速仪 ADV 测试 U 形弯道水流结构的三维特性, 通过对 U 形弯道实验水流及 Fluent 模型的数值模拟比较分析, 进一步揭示 U 形弯道环流变化过程, 提出适宜的数值模拟方法, 为弯道水流特性及其河床演变的深入研究提供科学依据。

2 试验概况及数值模拟方法

U 形平底弯道水槽由有机玻璃制作, 宽 0.30 m, 深 0.50 m, 试验段由 2 个 1.50 m 的顺直段和 1 个内径为 0.50 m、外径为 0.80 m 的半圆组成, 总共布置试验测试断面 14 个, 每个断面按等宽布置 5 条测速垂线, 间距为 5 cm, 沿水深方向每隔 1 cm 测试一点, 供水系统为自循环系统, 具体见图 1 所示。试验进口流量控制为 26.5 L/s, 为满足 ADV 测试对水深的要求, 出口高于底板 3 cm。试验采用美国 SonTec 公司生产的 16 M 声学多普勒流速仪 ADV 测量相应

收稿日期:2008-11-24; 修回日期:2009-03-03

基金项目:水利部江湖治理与防洪重点实验室开放基金项目(R2007-03); 国家自然科学基金项目(40771022)

作者简介:李爱香(1983-), 女, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事河流泥沙运动及河床演变等方面的研究, (电话)028-85406400(电子邮箱)343205547@qq.com。

位置的瞬时流速,分别用下视及上视探头测水深下部及上部流速。

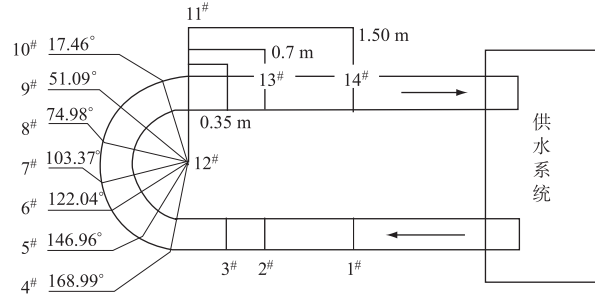


图1 U形弯道平底水槽示意图

Fig.1 The scheme of a U-shape bend flume

数值模拟以应用软件Fluent 6.3为基础,采用雷诺应力(RSM)模型模拟流场,通过VOF方法模拟水流自由面对U形(180°)弯道水流特性进行了分析。计算网络见图2所示。边界条件包括入口边界、出口边界、固壁边界、计算域上表面边界。入口边界分为水入口和空气入口,水相出口定义为充分发展紊流边界,空气出口定义为压力出口边界,空气上表面按对称面处理,固壁边界粗糙高度为1 mm。

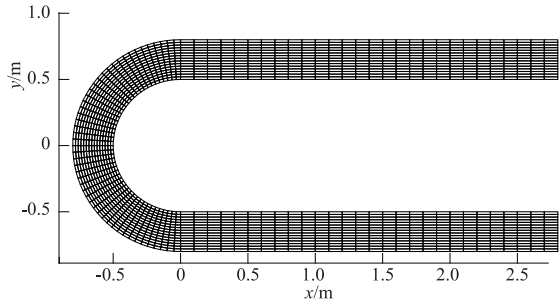


图2 U形弯道计算网络俯视图

Fig.2 Down-looking view of an U-shape bend calculation grid

3 试验测试与数值模拟结果及分析

3.1 水面横比降分析

图3为固壁边界处弯道各断面水深的计算值与实测值的比较,可以看出弯道中部(90°附近)水深计算值与实测值吻合较好,而在弯道进口处(180°附近)和弯道出口处(0°附近)差异稍大,但误差均在

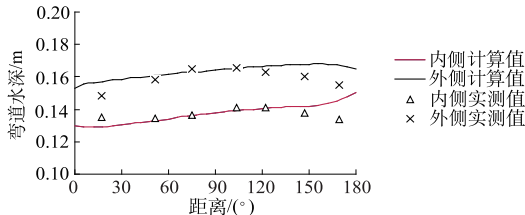


图3 固壁边界处水深计算与实测值对比
Fig.3 Depth comparison between observation and simulation at wall boundary posity

1cm 以内。这说明采用VOF模型可以较好地模拟弯道水流的自由面。

图4为弯道水位(计算值)的等值线图,可以看出水流进入弯道后,即发生较强的水位横比降,且比降不断增加,在60°附近达到最大值,随后又不断减小。

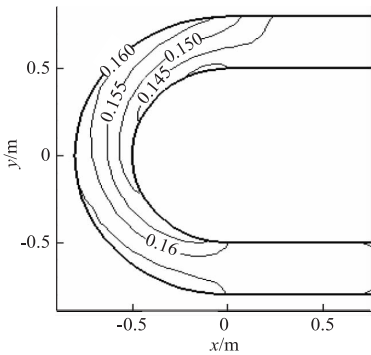


图4 弯道水位(计算值)
Fig.4 Simulated values of water level in bend flow

3.2 U-V 矢量沿水深变化

图5为距床面不同距离处弯道水水平向U-V矢量场,可以看出,在距离床面较近的水平面(h=0.005 m),水流在流经弯道时主流向偏向凸岸;在距离床面一定距离后(h=0.075 m)主流向则近似与边界平行;在近水面的平面内,主流向偏向凹岸,这样在弯道区域内,水流运动为螺旋流运动。

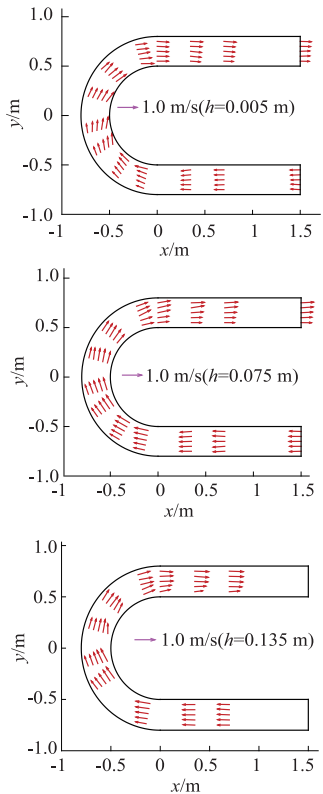


图5 U-V 矢量场(实测值)
Fig.5 Experimental vectors of U-direction and V-direction

3.3 横向环流沿程变化

图6为弯道二次流沿程的变化图,其中左图为计算值,

右图为实测值。由试验可知:弯道环流在典型断面6#,8#及10#均出现了双涡二次流,小尺度涡和大尺度涡方向相反,其中靠凹岸表面小尺度二次流沿程呈增大趋势,表面流速沿程增加;而靠凸岸底部大尺度的二次流沿程呈减少趋势,近底流速沿程减小。因此,弯道二次流并非仅有单一的大涡螺旋流,在弯道的不同断面处,会存在2个尺度不同的涡,且涡的尺度沿程发生变化。图6中左图为采用Fluent雷诺应力模型(RSM)对试验工况二次流演化的模拟,对

照右图可知,RSM模型能较好地模拟弯道二次流双涡的存在和沿程变化。

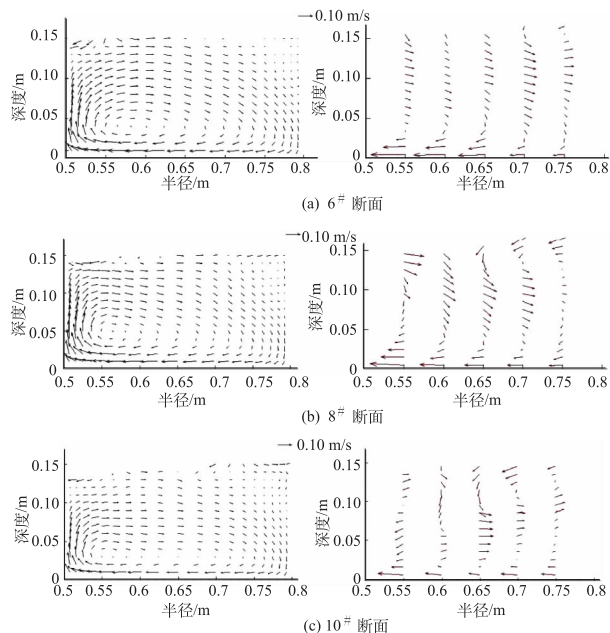


图6 横向环流变化

Fig.6 Variations of circulation flow in bend flow

4 结 论

弯道水流具有极为复杂的三维水流特征,本研究采用声速多普勒流速仪(ADV)对室内U形弯道水流特性进行了详细测量,通过试验验证,对适宜的弯道三维水流数值模型进行了讨论,得到以下初步成果:

(1) 结合使用声速多普勒流速仪(ADV)上视及下视探头,能较完整地测量弯道三维水流的变化过程。

(2) 弯道水流常出现较为明显的横向比降,采用VOF模型可以较好地模拟弯道水流的自由面变化。

(3) 试验结果表明,U形弯道环流出现了较为明显的双涡二次流变化过程。试验验证结果表明Fluent的雷诺应力模型(RSM)能较好地模拟弯道环流双涡二次变化过程,为深入分析弯道水流特性及其对泥沙运动、河床演变等影响的问题提供了科学方法。

参考文献:

- [1] 罗索夫斯基. 弯道水流的研究[J]. 尹学良,译. 泥沙研究,1958,3(1):83-95.
- [2] 张红武,吕 昕. 弯道水力学[M]. 北京:水利电力出版社,1993.

出版社,1993.

- [3] 钱 宁,张 仁,周志德. 河床演变学[M]. 北京:科学出版社,1987.
- [4] 王平义. 弯曲河道水力学[M]. 成都:成都科技大学出版社,1995.
- [5] 曾庆华. 中国利用弯道环流取水防沙的若干经验[J]. 泥沙研究,1997(2):1-9.
- [6] KASSEM A, CHAUDHRY M H. Effect of Bed Armoring on Bed Topography of Channel Bends[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(2):1136-1140.
- [7] KHOSRONEJAD A, RENNIE C D, SALEHI NEYSHA-BOURI S A A, *et al.* 3D Numerical Modeling of Flow and Sediment Transport in Laboratory Channel Bends[J]. 2007,133(10):1123-1134.
- [8] SUDO K, SUMIDA M, HIBARA H. Experimental Investigation on Turbulent Flow in a Circular-sectioned90-degree Bend [J]. Experiments in Fluids 1998,(25):42-49.
- [9] AHMRF F. Three-Dimensional Mean Velocity Analysis of a 30 Degree Bend Flow[J]. Journal of Engineering Mechanics,2000,126(12):1262-1272.
- [10] 刘月琴,万艳春. 弯道水流紊动强度[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2003,31(12):89-92.
- [11] 许光祥,史 凯. 弯道水流的紊动特性[J]. 山西建筑,2007,33(12):354-355.
- [12] 刘 健,郭维东. 弯道河段水流流态试验研究[J]. 人民长江,2008,39(16):81-84.
- [13] 董耀华. 弯道水流的三维数值模拟[D]. 武汉:武汉水利电力大学,1990.
- [14] 彭 凯. 矩形连续弯道流场简化计算数学模型[J]. 重庆建筑大学学报,2003,25(1):29-32.
- [15] 刘 哲. 复杂边界二维水流数值模拟研究与应用[D]. 西安:西安理工大学,2005.
- [16] Lien H C, Hsieh T Y, Yang J C, *et al.* Bend Flow Simulation Using 2D Depth Averaged Model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125(10):1097-1108.
- [17] 董耀华. 弯道水流的基本特性及数值模拟[J]. 长江科学院院报,1996,13(1):25-29.
- [18] 刘玉玲,刘 哲. 弯道水流数值模拟研究[J]. 应用力学学报,2007,24(2):310-312.
- [19] 林小平,凌建明,苏华才,等. 弯道水流的数值模拟及沿河路基冲刷机理分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007,35(11):1492-1495.

(编辑:曾小汉)

(下转第34页)