

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.05.001

顺直微弯型分汊河道水流的紊动特性试验研究

顾莉^{1,2}, 华祖林^{1,2}, 褚克坚^{1,2}, 刘晓东^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要:对顺直微弯型分汊河道的水流紊动特性进行了试验研究, 构建了分汊河道的物理模型试验系统, 探究了在不同汊道宽度比和上游来流量条件下, 水流在分汊河道沿程不同断面的紊动能分布特征. 试验结果表明: 在平面上, 水流紊动最为剧烈的区域发生在支汊进口段凹岸的回流区与凸岸的高流速区之间的过渡地带. 表、中、底 3 层的高紊动区的强度和范围以中层为最大, 表层次之, 底层层最小. 在横断面上, 紊动强度在分汊前、中、后各有不同, 支汊进口段断面的凹岸侧紊动强度最大, 其高紊动区等值线由底至表呈现由凹岸倾向凸岸的规律. 交汇断面对应岛屿尾尖的区域紊动也较为剧烈. 上游来流增大明显增强断面紊动强度, 但对紊动能等值线分布特征影响较小. 不同支汊宽度比引起交汇断面高紊动能位置的变化, 以及支汊进口断面紊动能的量值与位置也有所差异.

关键词:分汊河道; 紊动能; 支汊宽度; 上游流量

中图分类号: TV131.2+1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2011)05-0475-07

分汊型河道是天然河道中经常遇到的河道形态, 如长江中下游、珠江广东段、赣江、湘江、松花江、黑龙江、美国密西西比河、非洲 Niger 河和 Benue 河等都经常遇到. 一般分汊河道由顺直段、分汊段和再汇合段 3 部分组成. 分汊河道中往往存在平面回流、断面环流、螺旋流、曲线剪切层和高紊动强度等许多复杂的水力现象, 水流具有强烈的三维紊流特性, 其水流流态的复杂多变, 对河道泥沙运动、污染物质运移、河道整治、水工建筑物设计及排污口设计均会产生较大的影响. 因此, 对分汊河道水流紊动规律进行深入研究十分必要. 前人对水流紊动特性的研究多集中在一般顺直或弯曲河道中, 以及丁坝、引水口和射流等区域^[1-7]. 针对分汊河道水流紊动特性的深入研究尚不多见. 目前有关分汊河道的研究多为其河床演变规律、分流比计算方法、水沙运动特征等方面^[9-10], 并且针对分汊河道中的分汊口或交汇口的水动力特性研究也相对较多^[11-13]. 本文针对典型的顺直微弯分汊河道, 通过物理模型试验探究了在不同汊道宽度比和上游来流量条件下, 分汊河道中沿程不同横断面的紊动强度变化过程, 对表、中、底 3 层垂向不同深度的平面紊动强度分布进行比较分析, 解析并探讨上游流量和汊道宽度比对汊道水流紊动的影响机制, 可为掌握分汊流的紊动特征与机制提供基础性的积累.

1 试验系统与模型装置

试验安排在一个特制的水槽中进行, 水槽全长 25 m, 可进行 $\pm 1^\circ$ 的变坡, 水槽中间段特别做成放宽的矩形(4 m × 2.2 m × 0.6 m), 以便安装分汊河道模型, 其余部分保持为宽 0.5 m、高 0.6 m 的直槽. 图 1 为试验模型及设备的平面布置示意图. 试验测量段由主河道、支汊 1 和支汊 2 三部分组成, 各个汊道的横断面均为矩形, 主支汊的纵坡均为 0.2%.

试验中, 水槽流量由进口阀门、电磁流量计以及量水堰共同控制, 平水头水箱处于一定高度以保证水头恒定. 主河道宽度 $B_0 = 0.5$ m, 支汊 1 与支汊 2 的宽度分别为 B_1 和 B_2 , 两汊总宽 $B_1 + B_2 = 0.7$ m, 展宽率等于 1.40, 接近理论展宽率 1.42^[14]. 中心岛位置可以移动以改变支汊宽度比, 定义支汊 1 宽度比 $B^* = B_1 / (B_1 + B_2)$, 本文选取 3 个不同 B^* , 分别为 0.33、0.41、0.50. 下游主河道水深 H 固定为 14.9 cm, 并选取 2 种不同的

收稿日期: 2010-11-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2008CB418202); 国家自然科学基金(51009048, 50979026); 中央高校基本科研业务费专项(2009B16714, 2009B17814); 河海大学自然科学基金(2009422611); 江苏省六大人才高峰计划(08-C); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07103-006)

作者简介: 顾莉(1981—), 女, 江苏盱眙人, 讲师, 博士, 主要从事环境水力学研究. E-mail: guliqe@hhu.edu.cn

岸相应形成高流速区 ,回流区与高流速区之间的过渡地带流速梯度大 ,剪切作用显著 ,水流紊动也最为剧烈。随着水流下移 ,回流区消失 ,原有过渡地带的流速梯度沿程逐渐减小 ,紊动能也相应降低。水流经过支汊弯道顶点断面后 ,紊动能差异明显减小。水流运动到交汇断面 ,两股水流在岛屿尾尖后方区域挤压掺混 ,该区域脉动动能大于两侧岸边区域。分汊河道紊动能的平面分布在垂向存在差异 ,尤其在支汊前半段 ,高紊动区的强度与范围明显不同。由图 3 (b) 和 (c) 可知 ,表层和底层的高紊动区的量值均小于中层 ,且中层与底层量值相差较大 ,垂向 3 层的高紊动区出现的位置由表层至底层呈现由断面中心逐渐偏向凹岸的趋势 ,底层的高紊动区基本贴着凹岸分布 ,垂向 3 层的高紊动区范围也有所变化 ,底层高紊动区范围最小 ,仅在两个支汊进口段存在 ,中层高紊动区范围最大 ,由进口段一直延续到支汊弯道顶点 ,表层高紊动区范围略小于中层。

图 4 为工况 2 和工况 3 的中层平面紊动能分布图。比较图 3 和图 4 可知 ,工况 1 的两支汊关于中心岛对称分布 ,两支汊的宽度相等 ($B^* = 0.50$) ,支汊中的紊动能也基本呈对称分布。当 B^* 从 0.50 减小到 0.41 时 (工况 2) 左右支汊宽度不等 ,支汊 2 变为主汊 ,支汊 1 中高紊动区相比于支汊 2 其量值与范围均有所下降 (图 4 (a))。当 B^* 减小到 0.33 时 (工况 3) ,两支汊宽度的差距进一步加大 ,支汊 2 的宽度约为支汊 1 的 2 倍 ,支汊 2 的回流区尺寸与凸岸侧流速值进一步增加 ,引起高紊动区的范围扩大 ,向支汊出口段延伸 ,相反 ,支汊 1 中流速减缓 ,回流区尺寸缩小 ,高紊动区的量值与范围与支汊 2 相比都显著减小 (图 4 (b))。可见 ,不同支汊宽度比对平面紊动能分布的影响主要体现在两支汊中的高紊动区的范围与量值随 B^* 减小而差异增大。3 个工况的平面紊动能分布在垂向的变化规律是相似的 ,高紊动区的强度和范围均以中层为最大 ,表层次之 ,底层最小。

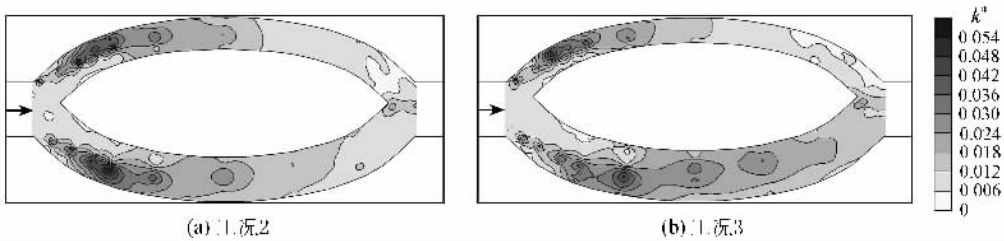


图 4 工况 2 和工况 3 的中层平面紊动能分布

Fig. 4 Turbulent kinetic energy in middle plane for conditions 2 and 3

2.2 水流紊动能断面分布特征

选择工况 2 讨论分汊河道的断面紊动能分布特征 ,图 5 为工况 2 的断面紊动能等值线图。进入分汊前的

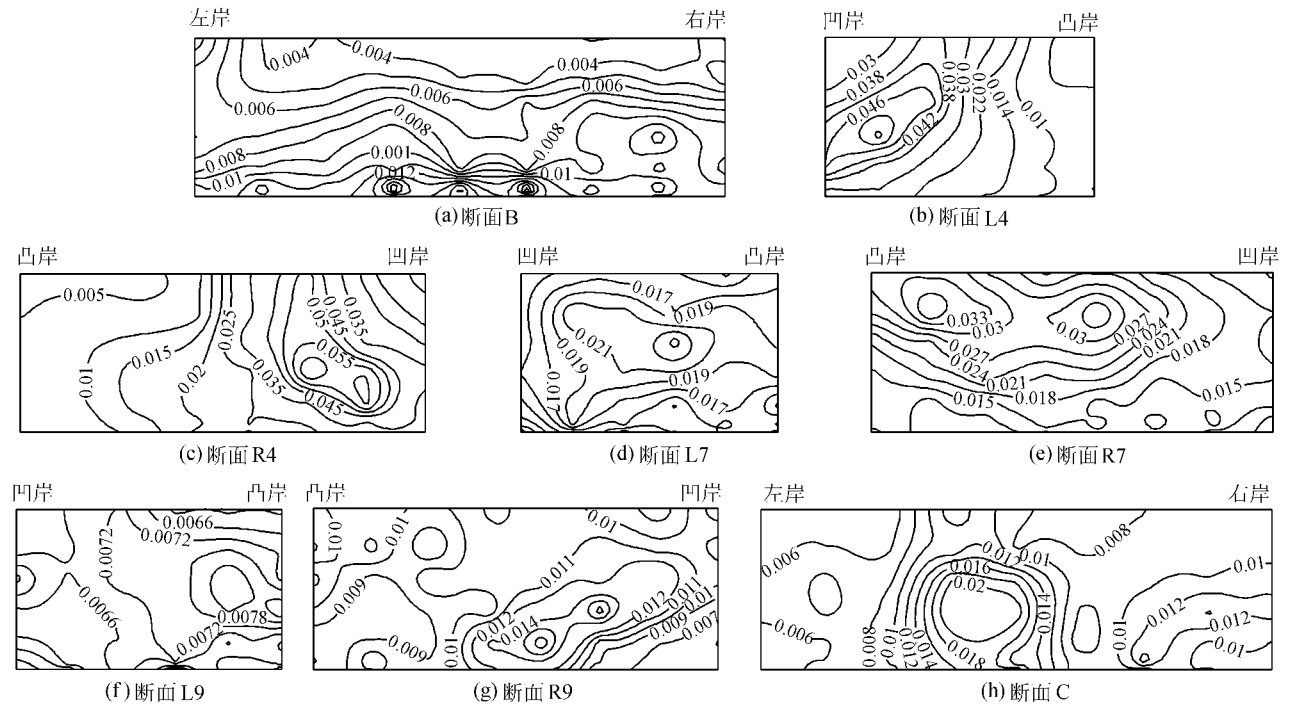


图 5 工况 2 断面紊动能分布

Fig. 5 Turbulent kinetic energy at cross-sections for condition 2

断面 B 自水面向下紊动强度沿垂线逐步增加,在近壁处达到最大值,然后再逐渐减小,此分布特征与一般单一顺直河道断面相似^[16]。水流分流进入支汉后,流线弯曲,平面回流以及断面环流充分发展,沿程各个断面紊动强度分布特征将有所变化,呈现不同的分布规律:支汉 1 中,在断面 L4 中心线偏凹岸侧出现高紊动区,这是由于支汉凹岸的回流区与凸岸的高流速区之间巨大的流速梯度所致,与图 4(a)平面高紊动区出现位置一致。支汉 2 中断面 R4 紊动强度分布规律与断面 L4 相似,也在凹岸侧形成一个紊动强度核心区,由于支汉 2 宽度大于支汉 1,为主汉河道,其高流速区量值与回流区尺寸均大于支汉 1,因而断面 R4 最大紊动强度大于断面 L4。断面 L4 与 R4 高紊动区均为倾斜的长条椭圆形状,由表至底沿深度方向呈现出由凸岸倾向凹岸分布的规律,这是由于支汉进口段回流区尺寸由表至底沿深度方向逐渐减小,直至消失。

水流在支汉中流过进口段进入弯道顶部区域后,回流区消失,原有过渡地带流速坦化,梯度差异降低,并有向凸岸输移趋势,此时弯道顶点断面 L7 与 R7 的高紊动区范围变大,量值减小,与断面 L4 与 R4 相比降幅达 50% 左右,并向凸岸偏移(图 5)。随着水流继续前行,在支汉后半段断面流速趋向均匀,流速梯度减小,断面 L9 与 R9 的紊动强度分布已较为均匀,虽也有断面高紊动区,但是其量值与周边相差不大。与断面 L7 与 R7 相比,高紊动区量值下降略超 50%。在交汇口附近两股水流相遇,水流前锋相互挤压摩擦,岛屿尾尖后方区域紊动剧烈,形成一个高紊动区,该区域宽度约为 15 cm,由区域中心向两侧紊动能等值线量值迅速下降,降幅达到 50%,该范围以外紊动能分布较为均匀。

2.3 流量对紊动特性的影响

当上游来流量增大时,紊动能的断面分布特征基本相似,但是量值显著提高。图 6 为工况 2 与工况 5 的断面 L4、R4 和 C 的垂向平均紊动能分布图,由图 6 可知断面 L4 和 R4 的紊动能在横向的分布特征基本相似,大、小流量工况下在凸岸紊动能相差不大,随着向凹岸推移大流量工况紊动能增加显著,约为小流量工况下紊动能的 2~3 倍。在交汇断面 C 大流量工况下紊动能的横向分布特征与小流量基本一致,但量值约为小流量工况的 2 倍左右,紊动最为剧烈的点仍为岛屿尾尖后方点。

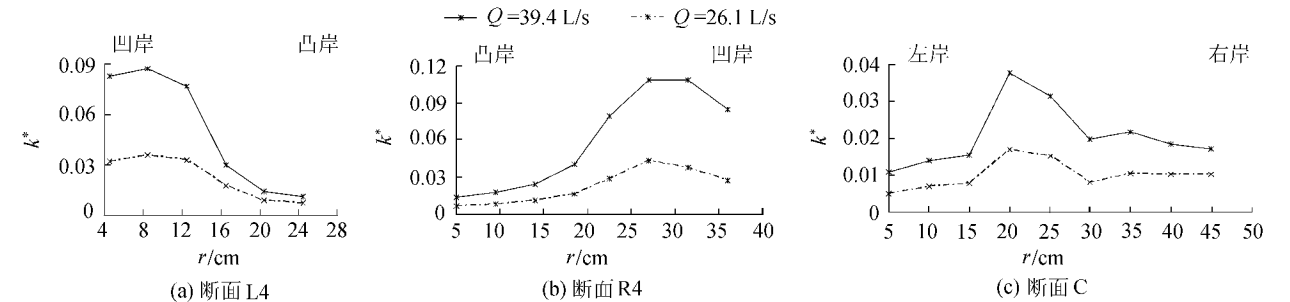


图 6 不同流量下垂向平均紊动能分布

Fig. 6 Depth-averaged turbulent kinetic energy under different upstream flow rates

2.4 支汉宽度比对紊动特性的影响

a. 在交汇口附近两汉水流相互冲击,紊动强烈,在交汇断面 C 会形成一个紊动强度较大的区域,该区域位置与汉道宽度密切相关,图 7 为不同支汉宽度比下交汇断面 C 的紊动能分布图及垂向平均分布图。由图 7 可知,工况 1~3 交汇断面的高紊动核心区基本位于各自中心岛的尾尖后方区域,由于工况 3 的左右两汉宽度相差较大,支汉 1 入汇角度较大,水流切入支汉 2 较深,所以工况 3 的高紊动区位置略微偏向支汉 2 一侧。此外,由于工况 1~3 的支汉 2 宽度不断增加,逐渐变为主汉,其断面流速也呈递增趋势,相反支汉 1 流速不断减小,因此断面 C 高核心区以外范围内的紊动能呈现以下规律:当支汉宽度比 B^* 由 0.50 变化到 0.33 时,断面 C 中左侧对应支汉 1 部分的紊动能随 B^* 减小而减小,而右侧对应支汉 2 部分紊动能随 B^* 减小而增大(图 7(d))。

b. 不同支汉宽度比对支汉进口段断面也有一定影响。图 8 为不同支汉宽度比下支汉 2 进口段断面 R4 的紊动能分布图及垂向平均分布图。由图 8 可知,不同支汉宽度比时,断面 R4 的紊动强度分布规律相似,均在凹岸侧存在紊动强度较大区域,但是由于支汉 2 宽度随 B^* 减小而增加,所以高紊动区离凸岸(中心岛一侧)的距离增大,且高紊动区范围也有所扩大。

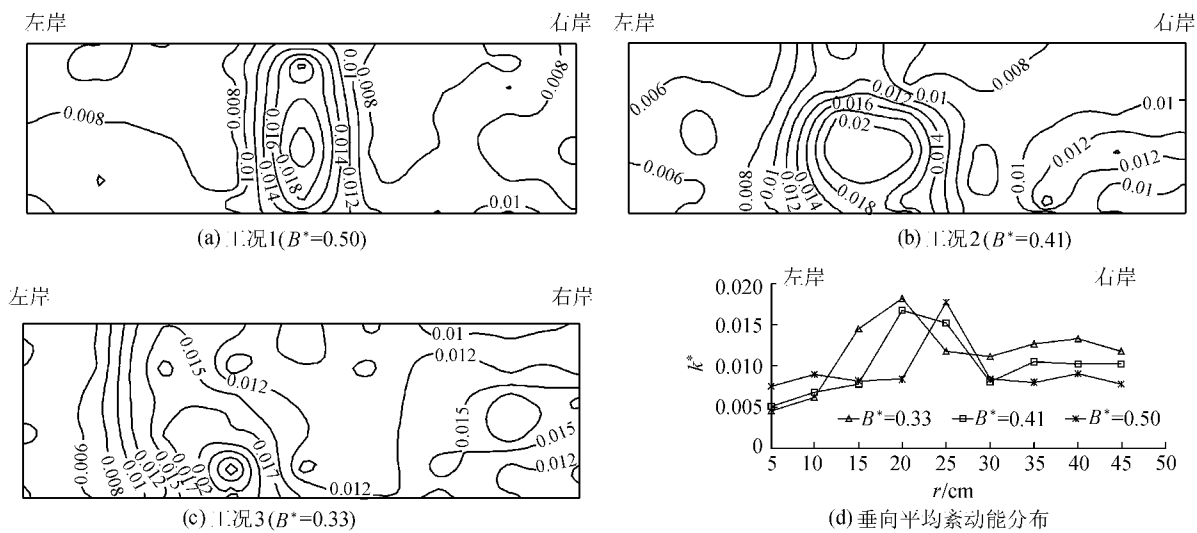


图 7 不同支汊宽度比下交汇断面 C 的紊动能分布及垂向平均分布

Fig. 7 Turbulent kinetic energy at section C under different width ratios of two anabranches

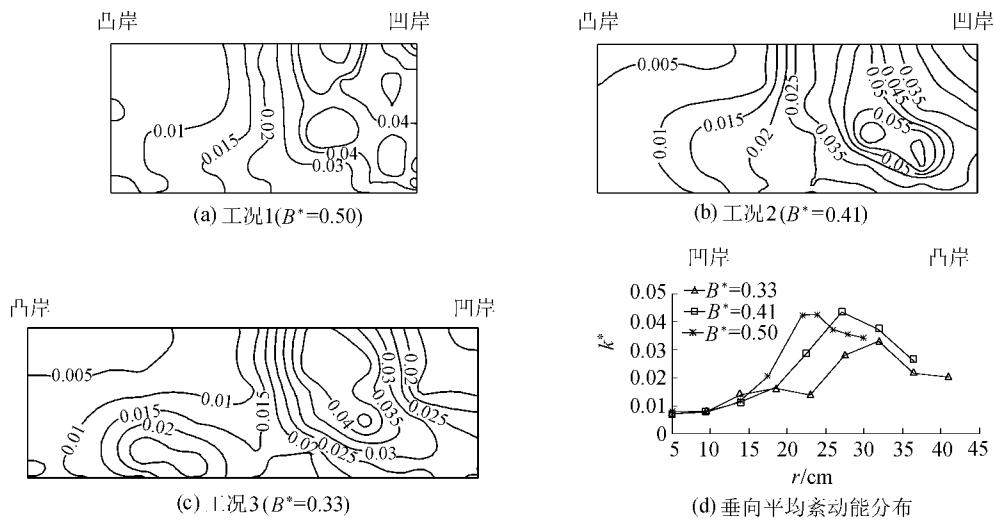


图 8 不同支汊宽度比下断面 R4 的紊动能分布及垂向平均分布

Fig. 8 Turbulent kinetic energy at section R4 under different width ratios of two anabranches

3 结 论

a. 对于分汊河道,高紊动区在平面上处于支汊进口段的回流区与高流速区之间的过渡地带.不同支汊宽度比工况下,平面紊动能分布在垂向的变化规律相似,高紊动区的范围与量值由表至底均呈现先增大后减小的规律,高紊动区位置沿垂向也均有向凹岸偏移的趋势,垂向 3 层之中,表层与中层的分布特征较为接近,底层的差异最大.随着支汊由对称变为不对称分布,支汊 2 宽度逐渐增大,其高紊动区的范围与量值也相应变大,相反,支汊 1 的高紊动区量值与范围则在逐步缩小,两支汊的差距进一步加大.

b. 横断面紊动强度在分汊前、中、后各有不同,进入分汊前的断面 B 紊动强度由表至底逐渐增大,在近底处达到最大,支汊进口段断面凹岸侧紊动强度大,并且由表至底呈现为由凸岸倾向凹岸,与回流区尺寸沿深减小的变化规律相符;由弯道顶部至出口段断面,紊动能分布逐渐趋向均匀;交汇断面 C 对应岛屿尾尖区域紊动剧烈,其余两侧区域紊动能相对比较均匀.

c. 上游来流量的增加对断面紊动能分布规律影响较小,紊动能等值线形状相似,只是断面紊动能值显著增加.

d. 汇合后断面高紊动区位置随支汊宽度比 B^* 减小而左移,其位置基本位于各个工况下岛屿尾尖后方

区域,在不同支汊宽度比下,支汊进口断面 R4 的紊动能分布规律基本相似,只是其高紊动区离凸岸距离随支汊宽度增加而增大。

参考文献:

- [1] BLANCKAERT K, VRIEND H J D. Turbulence structure in sharp open-channel bends[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 536: 27-48.
- [2] 郭维东, 魏爽, 孙红梅. 矩形明渠中矩形边墩周围紊动强度和雷诺应力分布特性试验[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(1): 14-18. (GUO Wei-dong, WEI Shuang, SUN Hong-mei. Experimental study on turbulence intensity and Reynolds stress around rectangular cross-section cylinders in rectangular open channel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(1): 14-18. (in Chinese))
- [3] 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): 89-93. (LIU Yue-qin, WAN Yan-chu. Turbulence intensity of bend flow[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2003, 31(12): 89-93. (in Chinese))
- [4] 杨帆, 陈惠泉, 郭军. 明渠岸边侧向 45°取水口的水力特性试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(4): 264-270. (YANG Fan, CHEN Hui-quan, GUO Ju. Experimental study on hydraulic characteristics of 45° lateral intake flow in open channel[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006, 4(4): 264-270. (in Chinese))
- [5] 曹艳敏, 张华庆, 蒋昌波, 等. 丁坝冲刷坑及下游回流区流场和紊动特性试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2008, 23(5): 560-569. (CAO Yan-min, ZHANG Hua-qing, JIANG Chang-bo, et al. The experimental research of the flow field and turbulence characteristics in the scour and backflow region around a groin[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(5): 560-569. (in Chinese))
- [6] 李志伟, 钱忠东, 槐文信. 径向射流紊动特性分析[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2009, 42(6): 691-694. (LI Zhi-wei, QIAN Zhong-dong, HUAI Wen-xi. Analysis of turbulent behavior of radial jet[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(6): 691-694. (in Chinese))
- [7] 吕升奇, 唐洪武, 闫静. 有无植物条件下明渠水流紊动特性对比[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(6): 64-68. (LU Sheng-qi, TANG Hong-wu, YAN Ji. Comparison of turbulence characteristics of water flow in open channels with and without vegetation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(6): 64-68. (in Chinese))
- [8] 张为, 李义天, 江凌. 三峡水库蓄水后长江中下游典型分汊浅滩河段演变趋势预测[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40(4): 17-24. (ZHANG Wei, LI Yi-tian, JIANG Ling. Fluvial process change of the typical multi-branched meandering reach in the mid-down Yangtze River after three gorges dam impoundment[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40(4): 17-24. (in Chinese))
- [9] 胡静, 陈沈良, 谷国传. 长江口水沙分流和输移的探讨[J]. 海洋工程, 2007, 26(2): 1-10. (HU Jing, CHEN Shen-liang, GU Guo-chuan. An approach to water and sediment diversion ratios and transports in the changjiang river estuary area[J]. Coastal Engineering, 2007, 26(2): 1-10. (in Chinese))
- [10] RICHARDSON W R, THORNE C R. Multiple thread flow and channel bifurcation in a braided river: Brahmaputra-Jamuna River, Bangladesh[J]. Geomorphology, 2001, 38: 185-196.
- [11] RAMAMURTHY A S, QU J Y, VO D. Numerical and experimental study of dividing open-channel flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2007, 133(10): 1135-1144.
- [12] 吴迪, 郭维东, 刘卓也. 复式断面河道“Y”型交汇口水流水力特性[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(3): 21-23. (WU Di, GUO Wei-dong, LIU Zhuo-ye. Hydraulic characteristics of water flow at “Y”-shaped junction of river channel with compound cross-section[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 27(3): 21-23. (in Chinese))
- [13] 刘同宦, 郭炜, 詹磊. 90°支流入汇区域时均流速分布特征试验研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(4): 487-489. (LIU Tong-huan, GUO Wei, ZHAN Lei. Experimental study of the velocity profile at 90° open channel confluence[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(4): 487-489. (in Chinese))
- [14] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [15] 张书农. 环境水力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1988: 4-5.
- [16] 邓安军, 陈立, 林鹏, 等. 紊动强度沿垂线分布规律的分析[J]. 泥沙研究, 2001(5): 33-36. (DENG An-jun, CHEN Li, LIN Peng, et al. Analyses on distribution rule of turbulence intensity along depth[J]. Journal of Sediment Research, 2001(5): 33-36. (in Chinese))

Experimental study on turbulence characteristics of flow in straight or slightly curved braided rivers

GU Li^{1 2} , HUA Zu-lin^{1 2} , CHU Ke-jian^{1 2} , LIU Xiao-dong^{1 2}

(1. *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes , Ministry of Education , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;*
2. *College of Environment , Hohai University , Nanjing 210098 , China*)

Abstract : The physical model experiment system was developed to study the turbulence characteristics of flow in the straight or slightly curved braided rivers. The turbulent kinetic energy distributions of different cross-sections of braided rivers were studied under different anabranch widths and upstream flow rates. The experimental results show that the turbulent intensity peaks in the planes occur at the transition zone between the recirculation zone near the concave bank and the high-velocity flow zone near the convex bank in the entrance region of each anabranch. The intensity and range values of the high turbulence zone are large at the middle layer , medium at the surface layer , and small at the bottom layer. The turbulent intensities at the cross sections of bifurcation , branch and confluence are different. The turbulent intensity peaks at the cross sections occur near the concave bank of the cross section in the entrance region of each anabranch , and the high turbulence zone inclines towards the convex bank from the concave bank from the bottom to the surface. In addition , the region behind the tail tip of the braid bar at the confluence cross section also has high turbulent kinetic energy. The upstream flow rate causes the turbulent intensity to increase , but has little influence on the turbulent kinetic energy. The location of the high turbulence zone in the confluence cross section and the magnitude and location of the high turbulence zone at the entrance sections in each anabranch vary with the width ratio of two anabranches.

Key words : braided rivers ; turbulent kinetic energy ; anabranch width ; upstream flow rate