



干支流汇合口水力特性的试验性研究

付中敏^{1,2}, 谷祖鹏², 郑惊涛², 雷国平²

(1.重庆交通大学, 重庆 400074; 2.长江航道规划设计研究院基础研究所, 湖北 武汉 430011)

摘要: 长江干线河道存在着大量的干支流交汇河段, 在此交汇河段, 水流运动及河床冲淤特性极其复杂, 碍航问题较为严重。利用ADV对弯曲干流型汇合口水流运动特性进行模型试验性研究。研究表明, 入汇角和汇流比是影响汇合口区域表面流速及水面比降的主要因素; 入汇角的大小是决定漩涡分离区范围的主要因素之一, 且随着汇流比和入汇角的增大, 漩涡分离区的范围逐渐增大。

关键词: 汇合口; 概化模型试验; 汇流比; 入汇角

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0046-06

Experimental research on hydraulic characteristics at confluence of mainstream and branch

FU Zhong-min^{1,2}, GU Zu-peng², ZHENG Jing-tao², LEI Guo-ping²

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

Abstract: There are a large number of confluences at the trunk line of the Yangtze River. In these confluences, flow movement and river bed scour and silting characteristics are extremely complex, and the navigation is more serious. Therefore, the ADV is used for bend type confluence to study characteristics of flow movement by model experimental research. Research results show that, the discharge ratio and the inflow angle that is between mainstream and branch are the main factors to effect characters of flow movement. The inflow angle is one of the main factors for determining the separation area of eddies, and the separation area of eddies increase gradually as the inflow angle and the discharge ratio increase.

Key words: confluence; generalized model test; discharge ratio; inflow angle

天然河道中存在着大量的河流交汇口。在大量的干支流汇合处, 由于干、支流两股水流相互顶托, 汇流区水流的紊动掺混作用强烈, 能量损失较大, 导致卵石和粗颗粒泥沙在汇口处大量淤积, 形成河口浅滩或江心洲, 滩险众多, 流态紊乱, 严重影响这些特殊河段的船舶航行和港区的正常作业。因此, 在国家实施西部大开发的今天, 干支流汇合口河段的学术研究受到了各界的高度重视。

对于天然河道中顺直型的干支流交汇口, 国内外的学者进行了大量的研究和论证^[1-5]。然而

对于大量存在的弯曲河段与顺直支流河段相交汇的汇流区水流特性研究, 目前除有少量的原型观测资料分析外, 少有系统的试验研究成果。本文通过概化模型试验, 初次尝试对弯曲型干流河段与顺直型支流河段汇合口(简称弯曲干流型汇合口)附近水流运动特性进行试验研究。

1 水槽概化模型试验

1.1 模型水槽

本模型试验系统是由水流循环系统、流量调

收稿日期: 2012-09-10

作者简介: 付中敏(1977—), 男, 高级工程师, 从事航道工程设计、规划与研究。

节系统、量测系统及辅助设备组成, 主槽的顺直段为混凝土结构, 弯道及支槽采用全有机玻璃制作(图1)。支流和干流入口分别设有稳流栅, 下游出口设尾门控制水位。模型的主槽宽为1 m, 支槽宽为0.3 m。主槽弯道中心线半径 $R=2$ m, 弯道转弯 180° , 设弯道入口断面为 0° 圆心角断面, 弯道出口断面为 180° 圆心角断面。弯道进出口水槽互为平行的矩形水槽, 并参照长江与沱江汇合口断面形态特点(支流入汇于弯曲干流河段, 且入汇口位于弯道干流的弧顶附近, 入汇角约为 50° , 凹岸为深槽, 凸岸为广阔的边滩), 将弯道段横断面概化为凹岸为深槽、凸岸为浅槽的偏V型结构, 同时, 支流在弯顶处与干流相交汇(90° 圆心角断面), 且支槽与主槽几何轴线的夹角分别取为 30° , 60° 和 90° 。支槽为平直矩形断面水槽, 其入口至交汇口距离约3.5 m, 弯道入口上游段和弯道出口下游段均为平底矩形直槽, 长约4 m。模型底坡设计为: 主槽进出口直槽坡度为 $1/2\ 000$, 弯道段平均坡度为 $1/1\ 250$, 支槽为 $1/1\ 000$ 。 90° 入汇角时模型系统平面布置如图1, 2所示。



图1 弯道汇合口模型(180°弯道前半段)

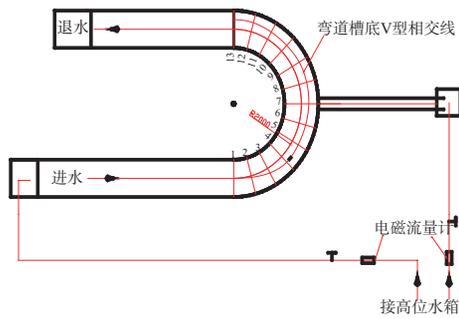


图2 弯道干流与支流汇合口模型系统平面图

1.2 主要测量仪器

试验的流速采用声学多普勒测速仪(ADV)进行流速测量(美国SONTEK公司生产)。本次试验

中, 采样频率为50 Hz, 采样个数为3 000。

主槽和支槽首部前的连接直管段分别布置2台电磁流量计, 用于控制主槽和支槽流量(图2)。流量计由中德合资上海光华爱而美特仪器有限公司生产, 型号为IFM4080K+F, 量程为 $0 \sim 50$ L/s, 测量精度为 $\pm 0.3\%$ 。

水面线测量系统由水位测针、量筒和测压管组成, 包括25支量筒, 50根测压管和2支水位测针, 其中水位测针安装在可移动的坐标架上。坐标架有效移动距离约1.2 m, 其滑动导轨水平度为 $1/10\ 000$ 。

1.3 模型试验内容

主槽通水后, 在保证主槽流量约为 $0.03\ \text{m}^3/\text{s}$ 的情况下, 调节尾水闸门, 将弯道入口上游未受支流入汇影响的主槽水深控制为 $0.12\ \text{m}$, 然后按汇流比施放支槽流量。

沱江年平均流量约为 $420\ \text{m}^3/\text{s}$, 本河段长江干流洪、中、枯水期平均流量约为 $17\ 540\ \text{m}^3/\text{s}$, $9\ 840\ \text{m}^3/\text{s}$, $3\ 310\ \text{m}^3/\text{s}$, 因此, 本试验的干支流的汇流比 $\lambda = Q_b/Q_m$ 取为 $0.03, 0.1, 0.3$ 和 0.6 ; 入汇角 α 取为 $30^\circ, 60^\circ$ 及 90° 。主槽内的最大弗汝德数 F_r 为 0.41 , 最大雷诺数 Re 为 5.0×10^4 。

在弯道段共设有13个测量断面, 每个断面均布5个测点测量水位, 见图3。垂线流速分布的测量点与水位测点选在相同断面上, 但在每一断面上沿径向的测量点数(垂线条数)加密为7个, 垂向的测点数为8个, 均为非均匀分布, 各点的径向位置坐标如表1所示。待流量稳定后, 在各测针筒中测出各个测压点的水位; 用ADV流速仪分别测出各个断面上各条垂线上不同水深点的三维瞬时流速。

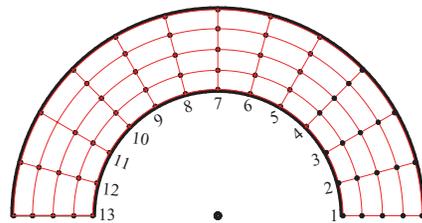


图3 弯道汇合口区域断面编号和测点布置

表1 速度测点径向位置坐标布置

编号	a	b	c	d	e	f	g
R/cm	155	171	188	205	222	234	245

2 试验结果分析

2.1 汇合口表面水流流速、流向特性

2.1.1 等汇流比下的入汇角的影响

图4~7分别为等汇流比 ($\lambda=0.03, \lambda=0.1, \lambda=0.3$ 和 $\lambda=0.6$) 下, 在不同入汇角 ($\alpha = 30^\circ, \alpha = 60^\circ, \alpha = 90^\circ$) 时的表面流速矢量图。

由图4~7可知, 在等汇流比的情况下, 随着

入汇角的增大, 支流对主流的影响也随之增强: 随着干支流入汇角的增大, 汇合口处合流后的水流流向与干流来流的夹角也随之增大, 弯顶端面下游的同一断面的最大流速逐渐增大, 并且最大流速位置由凹岸侧逐渐向凸岸侧偏移; 在汇合口断面下游附近出现明显的漩涡分离区, 其长度和宽度随着入汇角的增大而增加。

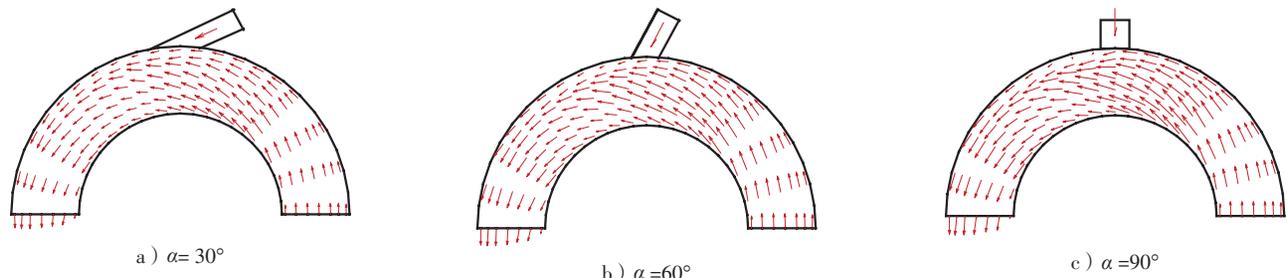


图4 汇流比 $\lambda=0.03$ 的汇合口表面流速矢量

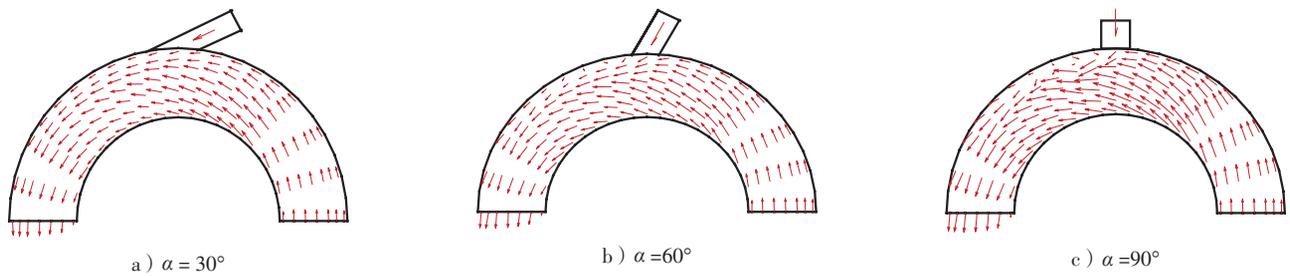


图5 汇流比 $\lambda=0.1$ 的汇合口表面流速矢量

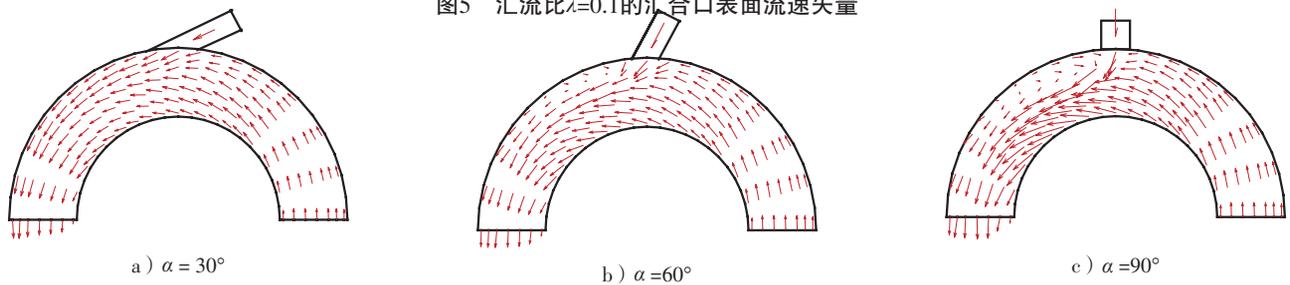


图6 汇流比 $\lambda=0.3$ 的汇合口表面流速矢量

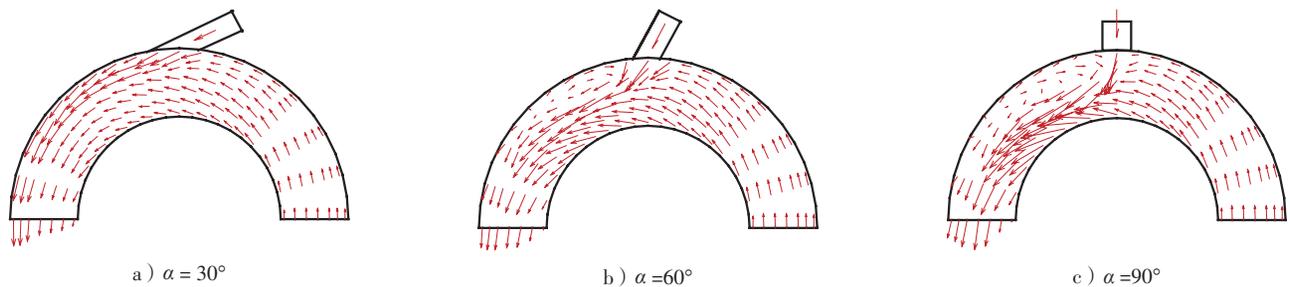


图7 汇流比 $\lambda=0.6$ 的汇合口表面流速矢量

2.1.2 等入汇角下的汇流比的影响

1) 入汇角 $\alpha = 30^\circ$ 时的特征。

由图4a), 5a), 6a)及图7a)可知, 干支流衔接

较为平顺, 表面流速矢量方向比较规则, 在汇合口下游基本不存在漩涡分离区。在弯道入口, 表面流速在靠近凸岸处有加速的趋势, 在凹岸附近

区域表面流速减小。在弯道前半段,随着汇流比 λ 的增加流速分布没有显著的变化。在弯道的后半段(即 90° 圆心角弯道断面交汇区下游),当汇流比 λ 较小时,凸岸附近水流表面速度减小幅度明显见图4a)和图5a);当汇流比 λ 较大时,在强大的支流的顶托作用下,凸岸表面流速减小幅度不明显见图6a)和图7a)。在弯道的后半段的凹岸一侧,表面流速随汇流比 λ 的增大而增大,且沿程增幅逐渐加大,增速过程一直进行到弯道出口。

2) 入汇角 $\alpha = 60^\circ$ 时的特征。

由图4b), 5b), 6b)及图7b)可知,当汇流比 λ 较小时,在汇合口附近的下游凹岸处,表面水流的分离现象不是很明显;当汇流比 λ 逐渐增大时,在汇流口附近下游出现明显的漩涡分离区,且分离区范围随汇流比 λ 的增大而增加。表面流速分布特点为,在弯道前半段,凸岸附近流速较大;在弯道后半段尤其靠近出口处,凹岸附近流速大;在支流汇入口(弯顶处)及附近区域,靠近弯道深泓处的表面流速较大,这与Best^[1]关于顺直型支流斜交于顺直型干流的汇合口时的研究成果相一致。

3) 入汇角 $\alpha = 90^\circ$ 时的特征。

由图4c), 5c), 6c)及图7c)可知,在弯道的入口段,靠近凸岸侧的表面流速大于凹岸侧的流速,在水流进入弯道后,至汇流区上游附近,凸岸侧表面流体开始不断加速,在靠近凹岸侧附近的表面流速在初始时逐渐增大,在接近汇流区时受支流顶托作用,流速又有所减小。当汇流比 λ 小时见图4c), 5c), 在弯顶断面附近凸岸处,表面流速迅速减弱,断面最大流速位置出现于凹岸侧略偏向河心处。当汇流比 λ 较大时见图6c)和图7c), 在汇合口的 90° 弯顶断面凹岸处,弯道干流的来流与支流交汇,表面流速矢量的大小和方向均急剧改变,凸岸附近表面流体不断加速,且加速过程一直发展到汇流区下游 150° 圆心角断面处。在汇流口下游凹岸侧出现明显的分离区,随着汇流比 λ 的逐渐增大,支流对干流的挤压作用(顶冲作用)增强,主流来水的有效过水断面面积减小,使得分离区的范围不断增大。在分离区下游一直到弯道出口断面,表面流速重新调整,逐渐形成主流向河心靠近的对称分布状态。

由2.1的分析可以看出,干支流汇合口处是否会产生水流分离现象和水流分离区范围的大小,与干支流汇流角度和汇流比的大小密切相关。当汇流角度较小时,支流与干流水流衔接较为平顺,在汇合口下游基本不产生水流分离现象,即使加大汇流比,除了使汇合口下游近岸侧流速增大外,也未出现明显的水流分离现象。但当汇流角度逐渐增大时,在干流中汇合口下游的近凹岸一侧逐渐会产生水流分离现象,且分离区和漩涡环流区的范围随着分流比和汇流角度的增大而加大。

2.2 汇合口区域的水面比降

在本文中,定义水面横向比降 J_r 和纵向比降 J_l 为以下公式:

$$J_r = \frac{dz}{dr} \quad (1)$$

$$J_l = -\frac{dz}{dl} \quad (2)$$

式中: dz 为沿半径(或流动)方向的水面高程增量; $dr(dl)$ 为半径(或流动)方向的变化量。

2.2.1 水面横比降的变化特点

1) 定入汇角下变化特点。

图8是 90° 入汇角下,弯顶断面的横比降的变化图。当汇流比较小($\lambda=0.03$)时,支流对主流的顶推作用较小,主流内的水面形态受弯道水流的影响较大,水面横比降沿半径方向及汇流比的增加而增加,最大值位于弯道右岸,约为 7‰ 。当汇流比较大($\lambda \geq 0.1$)时,支流对主流的顶推作用较大,使干流局部水面雍高,在断面上形成中间高两岸低的水面形态。因此,在凸岸至弯道中心线一侧,横比降随汇流比的增加而增加;在弯道中心线至凹岸一侧,横比降随汇流比的增加而减小。在弯道中心线附近,横比降达到正的最大值 10‰ 左右,在凹岸的汇合口处达到负的最大值 17‰ 左右,通航水流条件不好。

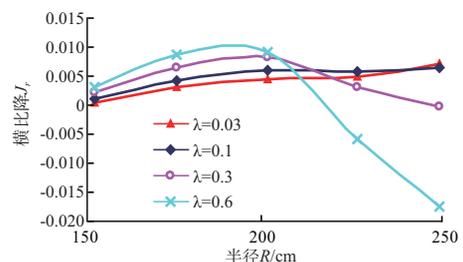


图8 90° 断面上不同汇流比的水面横比降($\alpha = 90^\circ$)

2) 定汇流比下变化特点。

图9是 $\lambda=0.1$ 时不同入汇角下的弯顶断面的横比降的变化。可以看出,在凸岸至干流中心线一侧,横比降随入汇角的增加而增加;在中心线至凹岸一侧,横比降先减小后增加。由于 α 为 30° 和 60° 时,支流对干流的顶推作用较小,横比降变化较小; α 为 90° 时,由于支流对干流的顶推作用较大,此时的横比降大于 α 为 30° 和 60° 的情况。

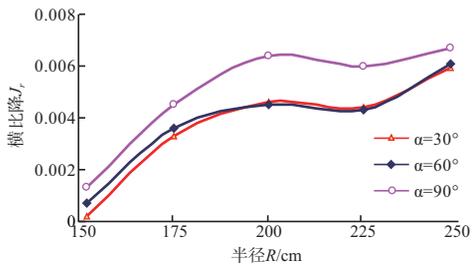


图9 90°断面上不同入汇角的水面横比降 ($\lambda=0.1$)

图10是 $\lambda=0.6$ 时,不同入汇角下的90°断面的横比降的变化图。由图可以看出,各入汇角下的横比降的变化趋势相同:凸岸至干流中心线一侧,横比降随半径的增加而增加;中心线至凹岸一侧,横比降随半径的增加而减小,且在凹岸附近横比降为负值。

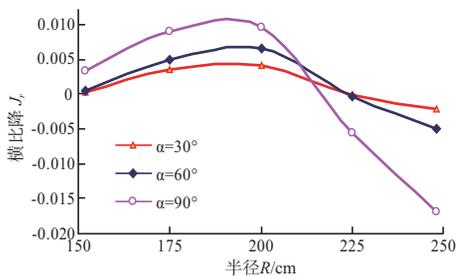


图10 90°断面上不同入汇角的水面横比降

横比降在凸岸至干流中心线一侧为正值,同时,同一弯道半径下的横比降随入汇角的增加而增加;横比降在凹岸侧附近为负值,且在同一弯道半径下随入汇角的增加而减小。

汇流比 λ 的变化对断面横比降的影响不仅表现为横比降大小的改变,同时也表现在横比降的变化趋势上。当汇流比较小时,横比降均为正值,且随汇流比的增加而增加,并在半径增大的方向上变化趋势是先增加后减小再增加;当汇流比较大时,横比降在凹岸侧随汇流比的增加出现

负值,且沿半径增大的方向上变化趋势是先增加后减小,同时,随汇流比增加,横比降绝对值也逐渐增大,在凸岸侧,横比降随汇流比 λ 增加而增大,在凹岸侧,横比降随汇流比 λ 增加而减小。

入汇角 α 的变化对断面横比降的影响主要表现为横比降大小的改变:随入汇角的增加,横比降绝对值也逐渐增大。

2.2.2 水面纵比降的变化特点

由于本文的研究对象是支流在弯道的凹岸侧入汇的情况,因此,本小节以凹岸为例对水面的纵比降进行分析。

1) 定入汇角下凹岸的变化特点。

图11是 90° 入汇角下的汇合口弯道凹岸的水面纵比降变化。由图可知,纵比降的沿程变化基本一致:弯道入口至 60° 断面附近,由于水位沿程变化受支流入汇的影响不明显,纵比降基本保持水平;在 90° 断面附近及下游漩涡分离区,由于干流受支流入汇的影响加大,水面局部变化显著,纵比降先陡增后骤减再逐渐增加;由于受支流入汇的影响不同,水面重新调整,在 150° 断面下游,纵比降没有明显的规律可循。随着汇流比的增加,约在 75° 断面至 150° 断面之间,纵比降的绝对值随汇流比的增加而增加,这说明汇流比的增加使得汇合口附近的水面降低程度加大,同时也使得汇合口下游的漩涡分离区的长度有所增加。

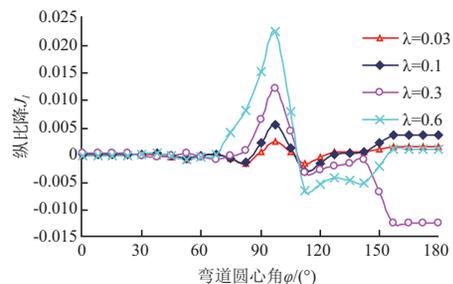


图11 汇合口弯道凹岸 $R=2.48$ m的水面纵比降变化

2) 定汇流比下凹岸的变化特点。

不同入汇角下,凹岸侧的水面纵比降沿程变化见图12。由图12a)可知,各入汇角下的纵比降的变化趋势基本相同,但纵比降的绝对值随入汇角的增大而增大。由于支流对干流的顶托作用,在 90° 断面上游的局部范围内水面升高,比降减小;在交汇区附近断面,水流发生分离现象,在

分离区内产生漩涡,水面骤降,随着漩涡对下游的影响逐渐减小水面上升,使得比降先升后降又一次上升。

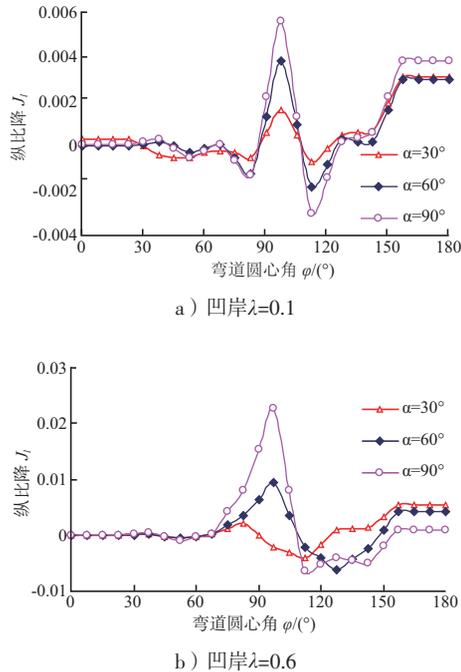


图12 不同入汇角的水面纵比降

由图12a)和12b)可知,随着入汇角的增加,纵比降的沿程变化趋势基本保持不变,但汇合口及漩涡分离区的纵比降的变化幅度明显加大。随着汇流比的增加,入汇角对漩涡分离区长度的影响也较为明显,且随着入汇角的增加而变长。

汇流比 λ 及入汇角 α 的变化对弯道前半段的纵比没有明显的影响,主要对汇合口附近及其下游的影响较大,且主要对凹岸纵比降大小变化产生影响,而对纵比降沿程总体变化趋势的影响不大。随着汇流比 λ 及入汇角 α 的增加,纵比降的绝对值相应增大,这说明汇流比及入汇角的增加使得汇合口附近的水面降低程度加大。

3 结论

1) 干支流汇合口处是否会产生水流分离现象和水流分离区范围的大小,与干支流汇流角度和汇流比的大小密切相关。当汇流角度较小时,汇合口下游未出现明显的水流分离现象。当汇流角度逐渐增大时,汇合口下游凹岸侧产生水流分离现象,且分离区和漩涡环流区的范围随着分流比和汇流角度的增大而加大。

2) 汇流比 λ 的变化对断面横比降的影响不仅表现为横比降大小的改变,同时也表现在横比降的变化趋势上;入汇角 α 的变化对断面横比降的影响主要表现为横比降大小的改变:随入汇角的增加,横比降绝对值也逐渐增大。

3) 汇流比 λ 及入汇角 α 的变化对弯道前半段的纵比没有明显的影响,主要对汇合口附近及其下游的影响较大,且主要对凹岸纵比降大小变化产生影响,而对纵比降沿程总体变化趋势的影响不大。

参考文献:

- [1] Best J L, Reid L. Separation zone at open-channel junctions[J]. Journal of Hydraulic Engineering: ASCE, 1984,110 (11): 1 588-1 594.
- [2] Bradbook. Role of bed discordance at asymmetrical river confluence[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(8): 351-368.
- [3] 茅泽育, 赵升伟, 张磊, 等. 明渠交汇口二维水力特性试验研究[J]. 水利学报, 2004(2): 3-9.
- [4] 王晓刚, 郭维东, 严忠民, 等. 河床高差对“Y”型汇流口水流水力特性的影响[J]. 中国农村水利水电, 2005(12): 19-22.
- [5] 郭维东, 王晓刚, 曹继文, 等. “Y”型汇流口水流水力特性试验研究[J]. 水电能源科学, 2005(3): 62-65,7.

(本文编辑 武亚庆)