

Y 型明渠交汇水流分离区的数值分析

郭维东 梁岳 冯亚辉 胡志华

(沈阳农业大学水利学院 辽宁 沈阳 110161)

摘要 针对 Y 型明渠交汇口水流特性 ,应用三维各向异性的雷诺应力模型 ,采用交错网格上的有限体积法离散控制方程 ,用 SIMPLE 算法求解压力-速度场。数值计算结果与物理模型试验结果吻合较好 ,并据此重点探讨了不同交汇角条件下交汇口分离区尺寸的变化规律 ,提出 Y 型交汇水流分离区的定义和分离区尺寸与汇流比的函数关系。

关键词 交汇水流 ;水流分离区 ;分离区尺寸 ;汇流比 ;Y 型明渠

中图分类号 :TV133 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2007)06-0049-04

Numerical analysis of flow separation zone at junctions of Y-shaped open channels//GUO Wei-dong , LIANG Yue , FENG Ya-hui , HU Zhi-hua(College of Hydraulic Engineering , Shenyang Agricultural University , Shenyang 110161 , China)

Abstract : According to the flow characteristics at junctions of Y-shaped open channels , the 3D anisotropic Reynolds stress model was adopted in this study. The staggered grids-based finite volume method was used to discrete the control equation , and then the pressure-velocity field was solved with the SIMPLE algorithm. The model was verified with the relevant experimental data which were in conformity with the numerical result. After that , the variation law of the size of Y-shaped separation zones at junctions was discussed under different confluent angles , and the definition of Y-shaped separation zones as well as the relationship between the size of the separation zones and confluence ratio was put forward.

Key words : confluence flow ; flow separation zone ; size of separation zone ; confluence ratio ; Y-shaped open channel

明渠交汇河段在我国各大流域分布广泛 ,据资料统计^[1]Y 型交汇占有相当的比重。交汇口处常常存在污染物滞留、泥沙淤积等问题 ,一直以来都是水利、航运、防洪和环保等部门关注的重点。目前对于 Y 型明渠交汇的研究^[2-3]屈指可数。从研究深度来看 ,受试验条件和观测资料等的制约 ,研究成果局限于现象描述和定性分析。近年来 ,随着数值计算方法的日益成熟和计算机硬件技术的飞速发展 ,利用数值计算方法分析复杂流动问题成为可能。数值方法的实质是求解 N-S 方程(雷诺方程)时均化的 N-S 方程是不封闭的 ,需要引入合适的湍流模型以形成封闭的方程组。常用的湍流模型有涡黏模型(零方程、一方程、两方程模型)、雷诺应力模型、代数应力模型、大涡模拟及直接数值模拟方法。文献[4-9]采用涡黏模型对支流斜接干流型交汇口进行了数值模拟 ,基本上都是基于 Boussinesq 的各向同性假设 ,难以准确模拟剪切层中平均场流动方向的改变对湍流场的影响 ,而且在近壁面雷诺数较低 ,雷诺应力具有明显的各向异性 ,分子黏性对流动的影响相对增强。

现有研究成果已经证实 ,交汇口分离区有回流存在 ,雷诺应力模型适用于计算有逆向流速的复杂流动。所以 ,为了更准确地反映 Y 型明渠交汇口流场特性 ,本文采用各向异性的雷诺应力模型进行数值计算。

1 数学模型的建立

1.1 基本控制方程

目前工程中应用得较为普遍的方法是雷诺时均法。在流体不可压缩情况下雷诺方程的表达形式为

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j' u_i'} \right) \tag{2}$$

式中 : $i, j = 1, 2, 3$ 。

在雷诺方程的基础上补充的方程包括 :
雷诺应力输运方程

作者简介 :郭维东(1969—)男 ,辽宁北票人 ,教授 ,博士 ,从事水力学与河流动力学研究。E-mail :gwldy@126.com

$$\frac{d}{dt}(\overline{u_i' u_j'}) = \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\left(C_k \frac{k^2}{\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_l} \right] +$$

$$P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \epsilon - C_1 \frac{\epsilon}{k} \left(\overline{u_i' u_j'} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) -$$

$$C_2 \left(P_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} P_{ii} \right) \quad (3)$$

紊动能方程

$$\frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\left(C_k \frac{k^2}{\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_l} \right] + \frac{1}{2} P_{ii} - \epsilon \quad (4)$$

紊动能耗散率方程

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_l} \left[\left(C_\epsilon \frac{k^2}{\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_l} \right] - \frac{1}{2} C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} P_{ii} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中:下标 $i, j, l = 1, 2, 3$; k 为紊动能; ϵ 为紊动能耗散率; ν 为运动黏度; δ_{ij} 为系数, $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$; 雷诺应力产生项 $P_{ij} = - \left(\overline{u_i' u_l'} \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_l} + \overline{u_j' u_l'} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_l} \right)$, 当 $i = j$ 时 P_{ij} 即为 P_{ii} 。模型常数 $C_k = 0.09 \sim 0.11$, $C_1 = 1.5 \sim 2.2$, $C_2 = 0.4 \sim 0.5$, $C_\epsilon = 0.07 \sim 0.09$, $C_{1\epsilon} = 0.41 \sim 1.45$, $C_{2\epsilon} = 1.90 \sim 1.92$ 。

1.2 控制方程的离散和求解

本文建立了 5 种交汇角(几何轴线夹角)下的水槽模型,依据天然河流汇流比的变化范围选取汇流比。网格划分时,在近边壁区域布置了精密网格,以便准确反映分离区的流动特征。本文采用交错网格上的有限体积法离散控制方程,用 SIMPLE 算法求解压力-速度场。

1.2.1 三维建模

水槽的三维实体采用 AutoCAD 建模获得。为了便于验证,AutoCAD 建模的几何要素参照物理模型尺寸确定。为了深入研究交汇口的水力特性,除保留 90°交汇角的水槽模型外另增加 30°, 45°, 60°, 120° 这 4 种交汇角的水槽模型。与 5 种交汇角对应的 1~5 号水槽模型的几何要素如下:干槽、支槽、主槽的槽长分别为 2.4 m, 2.4 m 和 4.8 m,槽宽分别为 0.4 m, 0.3 m 和 0.45 m。考虑到气-液两相流计算要为气体入口留有一定空间,模型高度取 0.5 m。

1.2.2 网格布置

交汇口附近水力要素变化梯度较大,为了准确捕捉下游分离区的流动特性,在距离边壁 0.1 m 的区域内增大网格密度。网格加密方法为:自边壁起沿远离边壁方向依次以后一层网格步长是前一层网格步长的 1.2 倍来划分计算区域,即第 1 层网格距边壁 2 mm,第 2 层网格距第 1 层网格 2.4 mm,第 3 层网格距第 4 层网格 2.88 mm,依此类推。整个流场以六面体结构划分网格,交汇口计算区域的网格划分如图 1 所示。

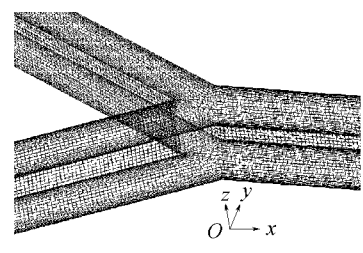


图 1 交汇口计算区域网格划分

1.2.3 初始条件和边界条件

本文采用 VOF 方法追踪自由水面,为气-液两相流计算。计算的边界条件包括速度进口(图 2 中 2、4)、压力入口(图 2 中 1、3、5)、压力出口(图 2 中 7)和壁面边界条件(图 2 中 6)。

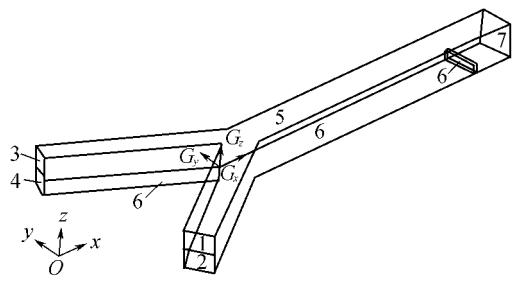


图 2 设定边界条件

由于天然河流中汇流比主要集中在 0.2~0.8 范围内,本文针对汇流比分别为 0.2, 0.3, 0.35, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 这 8 种工况进行计算。为了便于验证,计算时入口水深、流速边界条件取为与水槽模型试验条件相同。上游干、支槽的计算参数见表 1。雷诺数 Re 的数值范围主要集中在 10 000~30 000 之间,属于中高雷诺数紊流流动。干、支槽速度进口边界条件为均匀来流,水深条件均为 0.25 m,进口处紊动能 k 和紊动能耗散率 ϵ 按以下公式计算:

$$k = 1.5 (UI)^2 \quad (6)$$

$$\epsilon = 0.09^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (7)$$

其中

$$I = 0.16 Re_D$$

$$Re_D = \frac{UD}{\nu} \quad D = \frac{2hB}{h+B}$$

式中: I 为紊流强度; Re_D 为由水力直径计算得到的雷诺数; U 为进口断面平均流速; ν 为运动黏度; D 为水力直径; h, B 分别为过水断面的水深和底宽; l 为特征长度, $l = 0.07 D$ 。

气体边界 1、3、5 定义为压力入口,相对压强为零;明渠主槽、上游干槽、上游支槽的底部和侧壁为壁面边界条件,采用无滑移固壁条件并由壁面函数方法确定。以干流入口速度、水深条件初始化流场。

2 计算结果的验证及分析

2.1 计算结果的验证

物理模型采用平底有机玻璃水槽制作,交汇角

表 1 计算参数

汇流比 R_Q	上游干槽				上游支槽			
	流量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Re	Fr	流量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Re	Fr
0.2	30	0.3	29 265.44	0.191 6	6	0.08	6 197.39	0.051 1
0.3	30	0.3	29 265.44	0.191 6	9	0.12	9 296.08	0.076 6
0.35	30	0.3	29 265.44	0.191 6	10.5	0.14	10 845.43	0.089 4
0.4	30	0.3	29 265.44	0.191 6	12	0.16	12 394.77	0.102 2
0.5	30	0.3	29 265.44	0.191 6	15	0.20	15 493.47	0.127 7
0.6	30	0.3	29 265.44	0.191 6	18	0.24	18 592.16	0.153 3
0.7	30	0.3	29 265.44	0.191 6	21	0.28	21 690.85	0.178 8
0.8	30	0.3	29 265.44	0.191 6	24	0.32	24 789.55	0.204 3

注 汇流比 R_Q 为支流流量与干流流量之比。

为 90°。干支流进口段各设 2 道稳流栅,以平稳汇流口上游来水,出口段设有尾门。坐标原点位置定在汇流口支流角点槽底。流速场采用 ADV 量测,在交汇段设 12 个测流断面,每个断面设 5 根测流垂线,每根垂线各设 5 个测点,整个汇流区流速测点共布设 325 个。

采用雷诺应力模型模拟 Y 型明渠交汇水流,与交汇角 90°、汇流比分别为 0.35 和 0.6 的模型试验结果进行对比分析。结果表明:汇流区计算得到的水面纵比降较试验结果略小,上下游水深比的最大相对误差为 2%,流速分布特征与试验结果吻合,上游角点存在流动滞留区,下游产生流动分离现象。计算流速的相对误差绝对值基本控制在 15% 以内。无论是水面形态还是流速分布都与试验结果较吻合,从整体上验证了计算模型和计算方法的合理性及可靠性,也增加了试验和计算中所发现现象的可信度。

2.2 Y 型交汇水流分离区的分析

Y 型交汇河段的分离区位于干流侧拐点下游,分离区是一个低压强、低流速的区域,常常会引起泥沙及污染物的沉积。分离区的存在束窄了河道的有效过水断面,严重降低了河道的过水能力。分析发现只有在 90°和 120°交汇角条件下才存在明显分离区,所以本文重点探讨 90°和 120°交汇角条件下干流侧分离区尺寸随汇流比的变化规律。

通过观察发现,拐点下游的低流速区和回流发生在小于核心流速区最大流速 10% 的范围内。将流速值除以交汇口下游出口断面平均流速,得到分离区无量纲流速分布如图 3 所示。由图 3 可知,核心流速区最大无量纲流速为 1.21,低流速区和回流基本都在小于 0.120 等值线范围内,故将核心流速区最大流速的 10% 定义为分离区与核心流速区的交界面,即分离区的边界。

分离区的几何特征包括分离区的最大长度 L 、最大宽度 b 和长宽比 L/b ,如图 4 所示。分析中将 L 和 b 无量纲化,得到最大无量纲长度 L/W 和最大无量纲宽度 b/W (W 为主槽宽度 0.45m),表 2 给

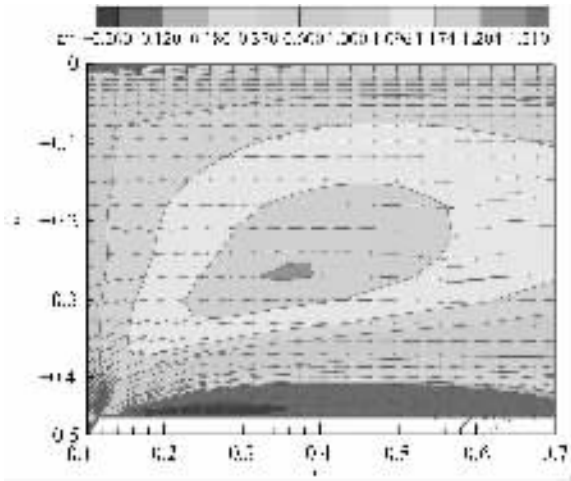


图 3 分离区与核心流速区

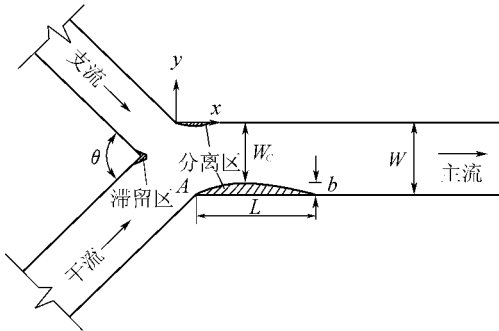


图 4 Y 型交汇河段流动特征示意图

表 2 $\theta = 90^\circ$ 和 $\theta = 120^\circ$ 条件下分离区特征值

R_Q	$\theta = 90^\circ$			R_Q	$\theta = 120^\circ$		
	L/W	b/W	L/b		L/W	b/W	L/b
0.2	1.200	0.067	18.000	0.2	1.844	0.160	11.528
0.3	0.911	0.064	14.138	0.3	1.644	0.138	11.935
0.35	0.889	0.064	13.793	0.35	1.644	0.129	12.759
0.4	0.844	0.060	14.074	0.4	1.533	0.122	12.545
0.5	0.778	0.051	15.217	0.5	1.467	0.118	12.453
0.6	0.756	0.044	17.000	0.6	1.311	0.096	13.721
0.7	0.622	0.036	17.500	0.7	1.311	0.093	14.048
0.8	0.356	0.018	20.000	0.8	1.178	0.071	16.563

出了 $z = 0.2\text{m}$ 水平剖面分离区的特征值 L/W 、 b/W 和 L/b 。 L/W 、 b/W 与汇流比 R_Q 的关系曲线如图 5 ~ 6 所示。从图中可以更清楚地看出, L/W 和 b/W 均随交汇角的增大而增大,随汇流比的增大而减小。

同一汇流比工况下, 120° 交汇角形成的分离区尺寸恒大于 90° 的。支流水流的惯性力方向总是向着干流侧分离区, 所以汇流比增大, 支流输入动量增加, 对干流惯性力的干扰作用加大, 分离区范围随之缩小。

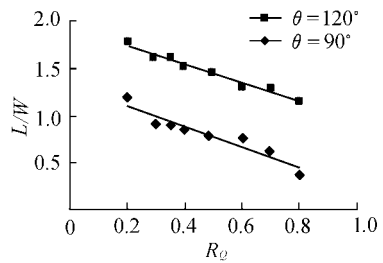


图 5 L/W 与 R_Q 的关系曲线

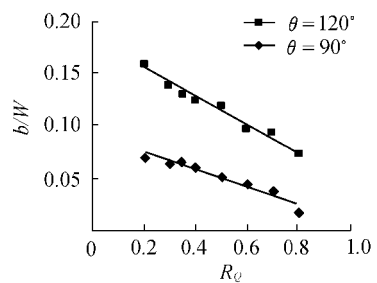


图 6 b/W 与 R_Q 的关系曲线

从图 5~6 可以看出, L/W 和 b/W 与汇流比 R_Q 近似呈线性关系, 将 $L/W \sim R_Q$ 与 $b/W \sim R_Q$ 进行线性拟合, 拟合公式如下:

交汇角 $\theta = 90^\circ$ 时

$$L/W = -1.1151R_Q + 1.3311$$

$$b/W = -0.0804R_Q + 0.0892$$

交汇角 $\theta = 120^\circ$ 时

$$L/W = -1.0404R_Q + 1.9924$$

$$b/W = -0.1341R_Q + 0.1804$$

茅泽育等^[5]针对支流斜接干流型交汇口分离区做了专门的研究, 得出分离区尺寸随交汇角和汇流比增大而增大的结论。Y 型交汇水流分离区尺寸随交汇角的变化规律与支流斜接干流型交汇的一致, 但分离区尺寸随汇流比的变化规律, 本文的研究结论为: 随着汇流比的增加, 分离区尺寸线性减小, 看上去似乎与茅泽育等人的研究结果相悖, 实质上反映的都是交汇水流共有的流动特性, 只是所定义的物理量含义不同。支流斜接干流型交汇水流分离区位于支流侧, 汇流比增大, 支流水流惯性增加, 分离区必然要增大; 对于 Y 型交汇水流, 分离区主要产生于干流侧, 当通过增加支流的流量使汇流比增大时, 水槽的特殊形式导致支流输入动量的增加对分离区起了阻碍作用, 使得分离区尺寸减小。汇流比增大时, 支流侧也可能出现分离区。设想当支流流量与干流流量相当, 甚至超过干流流量时, 原支流侧必然产生明显的分离区, 且

支流的流量越大, 这个分离区的尺寸也会越大, 这就与茅泽育等人的研究结论相似了。对于交汇水流来说, 分离区的形成机理是一致的, 其几何特征也具有一定的规律性。

分离区的存在束窄了河道的过水断面, 用 W_c 表示有效过水断面的宽度, $W_c = W - b$ 。定义收缩系数 $\mu = W_c/W$, 用来描述分离区的存在对过水面尺寸的影响。图 7 为收缩系数 μ 与汇流比 R_Q 的关系曲线。由图 7 可知, μ 随 R_Q 的增加而增大, 随 θ 的增大而减小, 这与分离区尺寸的变化规律一致。

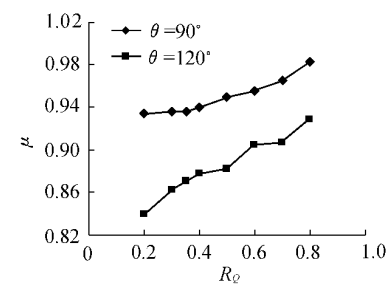


图 7 μ 与 R_Q 的关系曲线

3 结 语

a. 采用三维各向异性的雷诺应力模型对 Y 型明渠交汇水流进行了数值模拟, 其计算结果与物理模型试验结果较为吻合, 证明所采用的计算模型和计算方法合理可靠。

b. 应用数值计算结果对分离区尺寸进行专门研究, 提出 Y 型交汇水流分离区的定义和分离区尺寸与汇流比的函数关系。

参考文献:

- [1] 周华君. 长江嘉陵江交汇口水力特征研究[J]. 水运工程, 1994(12): 24-29.
- [2] 赵升伟, 茅泽育, 罗昇, 等. 等宽明渠交汇水流数值计算[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(5): 494-499.
- [3] 郭维东, 王晓刚. "Y"型汇流口水流水力特性试验研究[J]. 水电能源科学, 2005, 23(3): 53-56.
- [4] 茅泽育, 赵升伟, 张磊, 等. 明渠交汇口三维水力特性试验研究[J]. 水利学报, 2004(2): 1-7.
- [5] 茅泽育, 赵升伟, 罗昇, 等. 明渠交汇口水流分离区研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 7-12.
- [6] 茅泽育, 罗昇, 赵升伟, 等. 等宽明渠交汇 L1 一维数学模型[J]. 水利学报, 2004(8): 26-32.
- [7] WU Rong, MAO Ze-yu. Numerical simulation of open channel flow in 90° degree combining junction[J]. Tsinghua Science and Technology, 2003, 8(6): 713-718.
- [8] BRADBOOK K F, LANE S N. Role of bed discordance at asymmetrical river confluence[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(5): 351-368.
- [9] SAMPATH K G. Subcritical open-channel junction flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 11: 87-89.

(收稿日期: 2007-07-15 编辑: 骆超)