

等宽明渠交汇水流数值计算

赵升伟,茅泽育,罗 昇,武 蓉

(清华大学水利水电工程系,北京 100084)

摘要 针对明渠交汇口缓流流动特性,分别应用水深平均 $H-L$ 模型及 $k-\epsilon$ 模型建立了二维数值模型.水深方向采用静压假定,可模拟自由面和河床地形变化;应用交错网格上的有限体积法对方程组进行离散并采用水深-速度校正算法求解;每个代数方程求解采用 TDMA 逐行扫描法;针对交汇口几何特征,分区进行网格划分.应用实测资料对两种模型进行了验证比较,结果表明两种模型均可模拟明渠交汇口基本流动特性,但 $H-L$ 模型所得的分离区计算结果比 $k-\epsilon$ 模型更为准确.

关键词 明渠交汇口;分离区; $H-L$ 模型; $k-\epsilon$ 模型;数值模拟

中图分类号:TV133

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2005)05-0494-06

明渠水流交汇现象存在于水利、航运、防洪和环保等许多水力系统中,研究其水力特性具有重要的理论与实际意义^[1-4].干支流的相互掺混顶托导致交汇口附近流场、水深等水力因素变化,形成了许多独特的水力特性.一般来说,交汇河段沿主流方向可分为 3 个区,分别是分离区(回流区、涡漩区)、过渡区和远区(分离区和过渡区又合称为近区).如图 1 所示,图中 Q_u 、 Q_b 、 Q_d 分别为主流、支流及汇流流量.当支流进入主渠后,由于附壁效应及主流的挤压,支流向近岸弯曲,最后重新附着近岸,因而在汇流口侧下游附近形成分离区,而外部水流收缩,形成折向主槽外侧边壁收缩区.分离区的存在势必给环境及水利工程带来许多问题,如分离区内污染物滞流、交汇河段泥沙淤积、河床演变、水渠过流能力和局部能量损失等.此外,由于干支流相互混掺顶托,交汇口上游干支流水面局部隆起,形成壅水区域,流量与水位不再呈单一对应关系.试验及理论分析结果表明,给定交汇角及交汇河段尺寸时,流量比 $R_Q = Q_u/Q_d$ 对交汇口的水力特性具有显著的影响.

一些科研工作者曾对交汇河段水力特性进行了试验研究^[5],但是,由于交汇口附近河渠道局部形态(几何因素)和干支渠来流水力条件(水力因素)等众多影响因素使得其水力现象极为复杂,很难由试验或理论分析的方法得以完全解决.数值模拟方法方便灵活,可以通过改变参数对各影响因素间的相互关系及相对重要性进行系统的研究分析,因而成为有效的研究手段^[6].

近年来,随着数值计算方法的发展,以及对交汇口水流流动结构认识的加深,人们开始对交汇口采用数值模拟,但大多是针对主干渠宽度相差较大的侧向射流并采用自由面刚盖假定^[6,7].将支渠作为岸边排放口的处理,对于缓流交汇口流动(特别是宽度相近情形)显然是不合适的.一方面,由于干支流相互影响,支流进口断面不能按岸边排放处理,应当保证支流有一定的长度;另一方面,交汇口上游附近水面壅高,水面坡度较大,刚盖假定往往带来较大误差,需要去掉刚盖假定,以对自由面变化进行正确模拟.至今,国内外针对该类型交汇口水流流场特点进行的数值模拟研究还不是很多.

严格地说,明渠交汇口水流为三维流动,但在某些条件下其三维流动特征并不显著,特别是对于宽浅式河道,同时河床底部较为粗糙时,剧烈的垂向混掺使得流动要素沿垂向分布接近均匀,因此,对流动进行二维描述是足够的.本文针对明渠交汇口存在回流区流动特征,分别采用水深平均的 $H-L$ ^[8] 及 $k-\epsilon$ 紊流模型,对

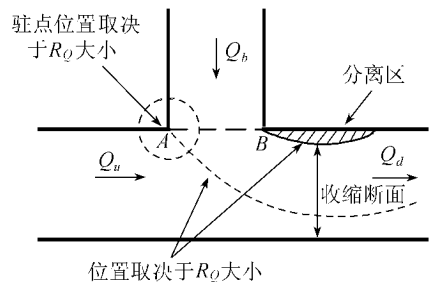


图 1 交汇口流动示意图

Fig.1 Flow characteristics at open-channel junction

直角平底交汇口水流进行了数值模拟,并与试验资料进行了比较分析,对不同流量比 R_Q 的水流条件进行了数值实验,并分析了其对交汇口水流特性的影响。

1 数值模型

如图 2 所示,假定沿水深方向为静压分布,忽略风成应力和科氏力作用,同时假设与水深 h 相比,平面尺寸很大,水深变化量相对较小,即 $(\partial h/\partial x)/h \approx 0$, $(\partial h/\partial y)/h \approx 0$,则水深平均的连续方程、动量方程、 $k-\epsilon$ 及 $H-L$ 模型的控制方程可写成

$$\frac{\partial}{\partial x}(\bar{U}\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\bar{V}\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y}\right) + S_\Phi \tag{1}$$

方程中 Φ , Γ_Φ 和 S_Φ 的表达式见表 1。为了区别起见,上标“—”为沿水深方向积分后水深平均值,上标“~”为与水深平均的紊流模型相应的水深平均值。

表 1 水深平均二维方程组参数

Table 1 Parameters for 2-D depth-averaged equations			
方程	Φ	Γ_Φ	S_Φ
连续方程	1	0	0
x 方向动量方程	$\bar{U}$	$\bar{\nu}_t$	$-g \frac{\partial z_B + h}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\bar{\nu}_t \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} - \frac{2}{3} \bar{k}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\bar{\nu}_t \frac{\partial \bar{V}}{\partial x}\right) - \frac{\tau_{xb}}{h}$
y 方向动量方程	$\bar{V}$	$\bar{\nu}_t$	$-g \frac{\partial z_B + h}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\bar{\nu}_t \frac{\partial \bar{U}}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\bar{\nu}_t \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} - \frac{2}{3} \bar{k}\right) - \frac{\tau_{yb}}{h}$
k 方程	$\bar{k}$	$\frac{\bar{\nu}_t}{\sigma_k}$	$P_k + P_{kv} - \bar{\epsilon}$
标准 $k-\epsilon$ 模型 ϵ	$\bar{\epsilon}$	$\frac{\bar{\nu}_t}{\sigma_\epsilon}$	$c_{1\epsilon} \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{k}} P_k - c_{2\epsilon} \frac{\bar{\epsilon}^2}{\bar{k}} + P_{\epsilon v}$
$H-L$ 模型 ϵ 方程	$\bar{\epsilon}$	$\frac{\bar{\nu}_t}{\sigma_\epsilon}$	$c_{1\epsilon} \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{k}} \bar{\nu}_t \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial x}\right) \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + 2c_{3\epsilon} \frac{\bar{\epsilon}}{\bar{k}} \bar{\nu}_t \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial x} - \frac{\partial \bar{V}}{\partial y}\right) \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} - c_{2\epsilon} \frac{\bar{\epsilon}^2}{\bar{k}} + P_{\epsilon v}$

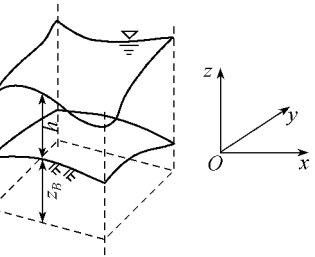


图 2 水深方向坐标示意图
Fig.2 Coordinate system in water depth direction

渠底切应力

$$\tau_{xb} = c_f \bar{U}(\bar{U}^2 + \bar{V}^2)^{1/2} / \rho \qquad \tau_{yb} = c_f \bar{V}(\bar{U}^2 + \bar{V}^2)^{1/2} / \rho$$

生成项

$$P_h = \bar{\nu} \left[\alpha \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} \right]^2 + \alpha \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} \right]^2 + \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} \right)^2 \right]$$

源项

$$P_{kv} = c_k U_*^3 / h \qquad P_{\epsilon v} = c_\epsilon U_*^4 / h^2$$

阻力流速

$$U_* = [c_f(\bar{U}^2 + \bar{V}^2)]^{1/2} \qquad c_k = 1/\sqrt{c_f} \qquad c_\epsilon = 3.6 c_{2\epsilon} \sqrt{c_\mu}/c_f^{3/4}$$

式中: $\bar{U}, \bar{V}$ ——沿 x, y 方向的水深平均流速; z_B ——底部高程; ρ ——流体密度; g ——重力加速度; c_f ——摩擦系数,对于水力光滑的河道,取 $0.003^{[7]}$; $c_\mu, c_{1\epsilon}, c_{2\epsilon}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ ——标准 $k-\epsilon$ 模型中的常数,分别取值为 $0.09, 1.44, 1.92, 1.00, 1.30$; $c_{3\epsilon}$ ——经验常数,取值为 $4.44^{[8]}$ 。

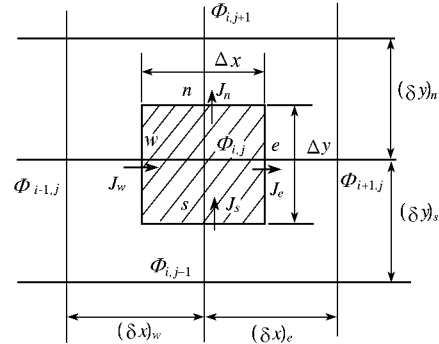


图 3 通用方程离散示意图
Fig.3 Discretization scheme for conventional equations

采用如图 3 所示交错网格上的有限体积法对上述方程组进行离散,并采用幂函格式计算离散系数^[9]。利用水深-速度校正的 SIMPLE 算法求解离散方程,如图 4 所示。采用 TDMA 法(三角对角矩阵算法)求解代数方

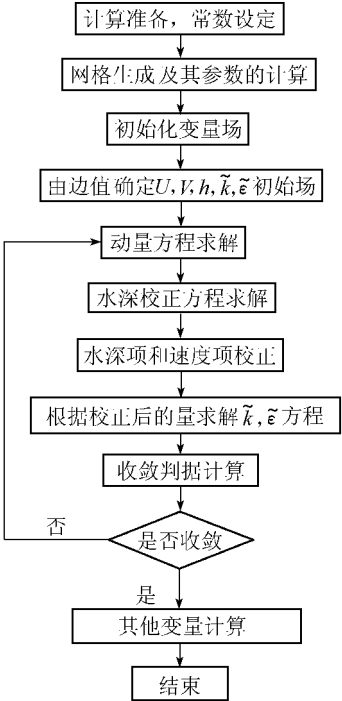


图 4 SIMPLE 算法流程
Fig.4 Flow chart of SIMPLE algorithm

程组.当迭代结果满足以下条件时,认为迭代收敛.

$$RES_m < EPS \tag{2}$$

$$RES_m = \max\left(\frac{RES_U}{RE_U}, \frac{RES_V}{RE_V}, \frac{RES_P}{RE_P}\right)$$

式中:EPS——给定常数,本文取 10^{-6} ; $RES_U, RES_V, RES_P, RE_U, RE_V, RE_P$ —— x 方向和 y 方向动量方程以及水深修正方程的累积残余源项和残余源项参考值.

计算边界条件包括进口、出流和固壁.主支槽进口断面上的流速、紊动能和紊动耗散率分别为

主槽
$$\bar{U}_{in} = \bar{U}_{主进} \quad \bar{V}_{in} = 0 \quad \tilde{k}_{in} = 0.277c_f^{3/4} \bar{U}_{in}^2/c_\mu^{1/2} \quad \tilde{\epsilon}_{in} = c_f \bar{U}_{in}^3/h$$

支槽
$$\bar{U}_{in} = 0 \quad \bar{V}_{in} = \bar{V}_{支进} \quad \tilde{k}_{in} = 0.277c_f^{3/4} \bar{V}_{in}^2/c_\mu^{1/2} \quad \tilde{\epsilon}_{in} = c_f \bar{V}_{in}^3/h$$

因试验结果表明^[1],该断面开始水流已恢复典型的明槽流动,无回流现象,故出口断面取在交汇口下游远处($5W$, W 为槽宽).流动方向坐标采用局部单向假定, $\bar{V} = 0, \rho \Phi / \partial x = 0$, 其中 Φ 分别代表变量 $\bar{U}, \tilde{k}, \tilde{\epsilon}$. 固壁边界采用壁函数近似^[5].

如前所述,交汇口附近水力要素变化梯度较大,尤其是下游附近分离区,因此计算网格布置较密,而上游进口及下游出口网格布置较疏.如图 5 所示,主槽上的网格布置以支槽入口为中心,沿 x 轴上下游等比例展开, y 方向由汇流口一侧向对壁等比例展开;支槽上游亦为等比例展开.交汇口上游主槽网格数共 24×18 ,支槽网格数为 17×18 ,交汇区域网格数为 17×18 ,下游网格数为 38×18 .

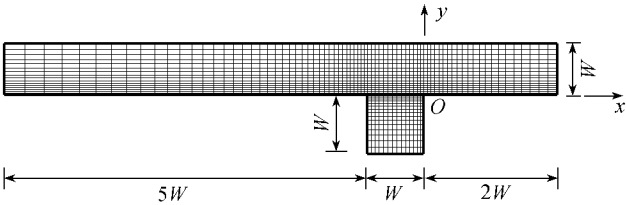


图 5 交汇口计算区域网格划分

Fig.5 Grid arrangements at open-channel junction

2 计算结果验证及分析

应用上述模型针对直角交汇水流进行数值计算并与量测资料进行比较.如图 6 所示,坐标原点取在交汇口上游支渠侧底部,其中 $x^* = x/W, y^* = y/W$. 下游流量 $Q_d = 0.1699 \text{ m}^3/\text{s}$, 水深 $H_d = 0.296 \text{ m}$, 平均流速 $U_d = 0.628 \text{ m/s}$, $Fr_d = 0.369, Re_d = 112\,702$. 改变干支渠上游流量得到不同流量比的工况.

因篇幅原因,本文仅给出流量比 $R_Q = 0.250$ 及 $R_Q = 0.750$ 两种工况下的流速矢量、流线、自由水面和水深沿程变化的试验结果及 $k-\epsilon$ 紊流模型和 $H-L$ 模型计算结果.如图 7~14 所示.

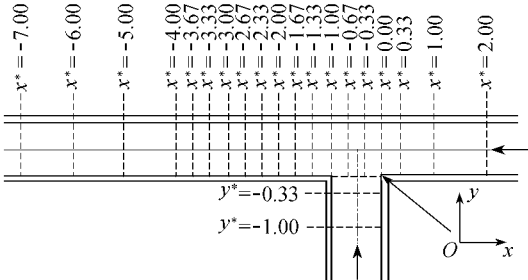
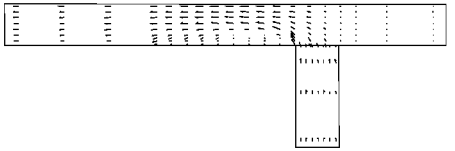
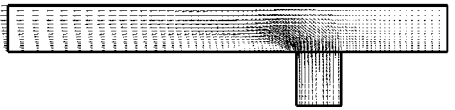


图 6 实验水槽及测点布置

Fig.6 Layout for flow velocity measurements



(a) 实验值



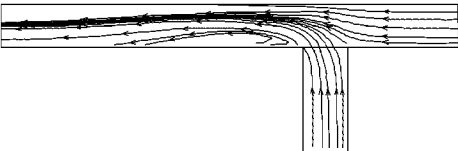
(b) $k-\epsilon$ 模型计算值



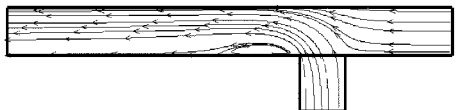
(c) $H-L$ 模型计算值

图 7 流速矢量(速度比尺_0.625 m/s, $R_Q = 0.250$)

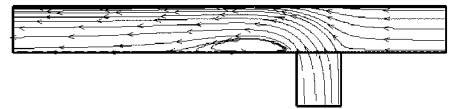
Fig.7 Velocity vector for $R_Q = 0.250$ (velocity scale_0.625 m/s)



(a) 实验值



(b) $k-\epsilon$ 模型计算值



(c) $H-L$ 模型计算值

图 8 流线 ($R_Q = 0.250$)

Fig.8 Streamlines for $R_Q = 0.250$

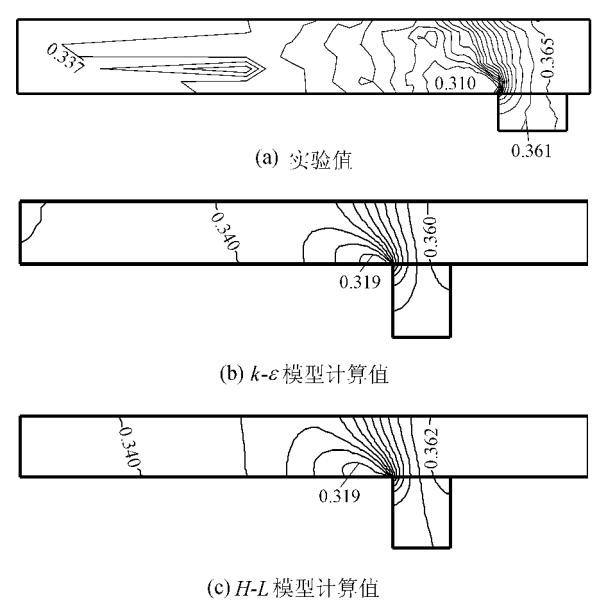


图 9 自由面等值线(单位 m , $R_Q = 0.250$)
Fig.9 Surface contour for $R_Q = 0.250$ (unit m)

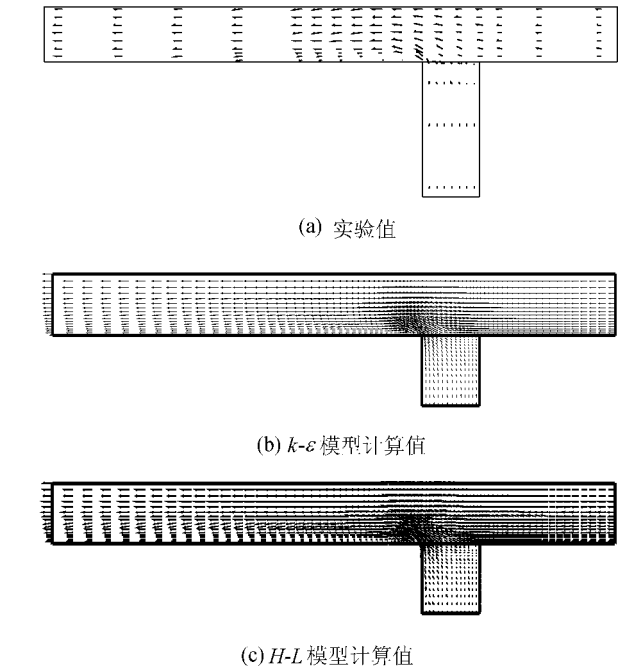


图 11 流速矢量(速度比尺_0.625 m/s , $R_Q = 0.750$)
Fig.11 Velocity vector for $R_Q = 0.750$ (velocity scale_0.625 m/s)

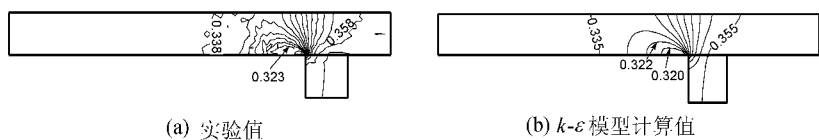


图 13 自由表面等值线(单位 m , $R_Q = 0.750$)
Fig.13 Surface contour for $R_Q = 0.750$ (unit m)

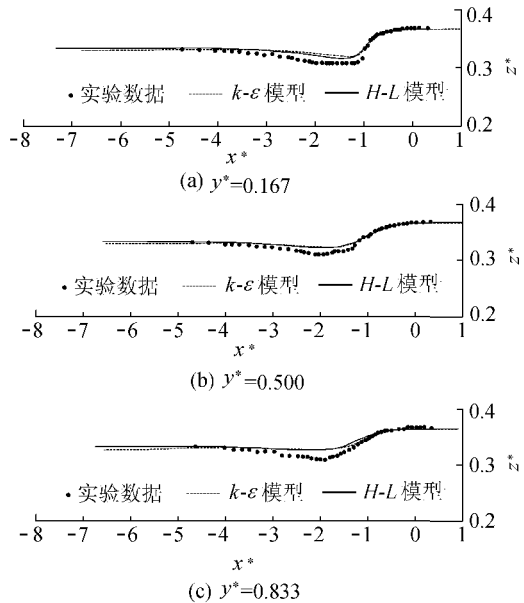


图 10 水面沿程变化(单位 m , $R_Q = 0.250$)
Fig.10 Surface-elevation variation for $R_Q = 0.250$ (unit m)

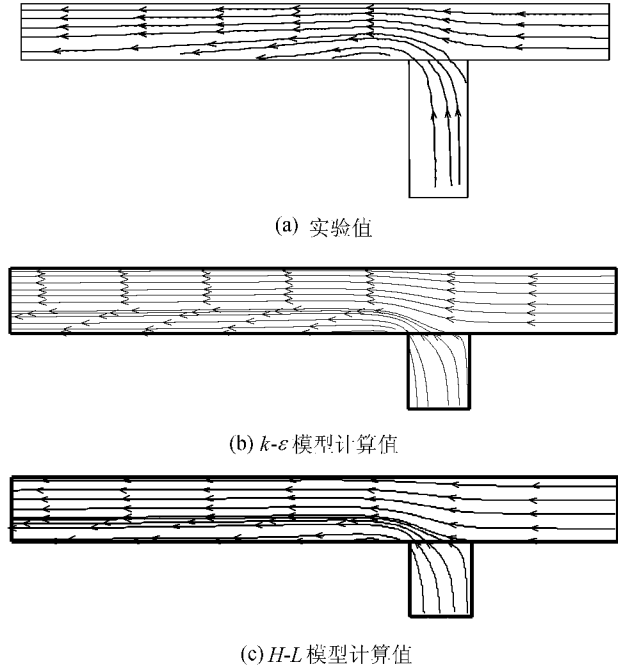
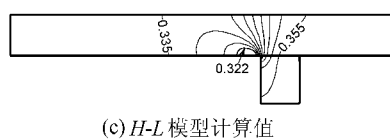


图 12 流线($R_Q = 0.750$)
Fig.12 Streamlines for $R_Q = 0.750$



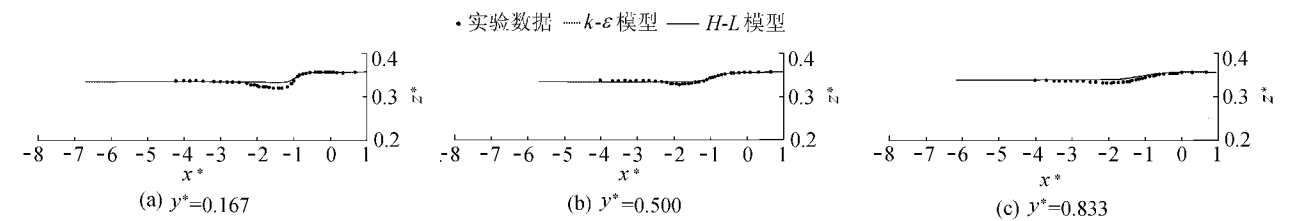


图 14 水面沿程变化(单位 m, $R_Q=0.750$)

Fig.14 Surface-elevation variation for $R_Q=0.750$ (unit m)

由图 7,8,11,12 可见, $k-\epsilon$ 模型、 $H-L$ 模型均模拟出分离区基本形状,并且由于水深平均概念的引入,自由表面的变化模拟得较为准确,但是, $H-L$ 模型明显优于 $k-\epsilon$ 模型. 定义分离区长度 L 为分离区最外部流线沿 x 向长度,宽度 B 为该流线沿 y 向的最大距离,计算结果如表 2 所示,表中相对误差值为(实验值-计算值)/实验值. 由表 2 可知,两种紊流模型的计算结果均小于实测值,这可能是由于采用壁函数所致. 由于 $H-L$ 模型考虑了逆压梯度边界层的影响,因此其分离区尺寸的计算结果与实验值更为接近. 例如,对于分离区长度 L 的预测, $k-\epsilon$ 模型的误差在 30% 左右,而 $H-L$ 模型的误差在 10% 左右. 随着流量比增大,两种模型预测的相对误差增大,这可能是因为两种模型都较适合于紊动较剧烈的水流条件. 此外,标准 $k-\epsilon$ 模型和 $H-L$ 模型的计算结果均表明,随着 R_Q 增大,分离区的尺寸减小. $R_Q=0.917$ 时分离区基本消失,仅在交汇口下游附近流线发生弯曲.

表 2 分离区尺寸的实验结果、标准 $k-\epsilon$ 模型和 $H-L$ 模型计算结果比较

Table 2 Comparison of separation-zone sizes between experimental data and simulated results of $k-\epsilon$ model and $H-L$ model

R_Q	实验值		$k-\epsilon$ 模型				$H-L$ 模型			
			L/W		B/W		L/W		B/W	
	L/W	B/W	计算值	相对误差/%	计算值	相对误差/%	计算值	相对误差/%	计算值	相对误差/%
0.083	2.50	0.50	1.90	24.00	0.38	24.00	2.30	8.00	0.43	14.00
0.250	2.40	0.40	1.80	25.00	0.30	25.00	2.20	8.33	0.34	15.00
0.417	2.20	0.30	1.50	31.82	0.20	33.33	2.00	9.10	0.25	16.67
0.583	2.10	0.25	1.40	33.33	0.15	40.00	1.90	9.52	0.20	20.00
0.750	1.50	0.20	1.00	33.33	0.10	50.00	1.30	13.34	0.15	25.00
0.917	0.00	0.00	0.00		0.00		0.00		0.00	

汇流口附近水面变化情况见图 9 和图 13. 由于两交汇水流相互顶托,上游发生壅水,水位-流量关系不再是单一关系,而与流量比、交汇角等因素有关. 两股水流的交界处形成水面脊线. 分离区外部,流线集中形成收缩断面;分离区内部,水面呈极不规则扭曲面,下陷形成涡旋. 图 10 和图 14 显示,两种模型对自由表面模拟的结果相近,可能是由于两种模型沿水深方向均采用静压假定.

数值模拟结果与实验数据存在一定误差,这也许是交汇口水流流动三维特征所致. 随着 y^* 增大,水面变化趋于平缓. 对于相同的 y^* 值,随着流量比增大,支流对主流顶托减小,上游壅水程度减小. 例如上游 $x^*=1.0$ 处, $R_Q=0.250$ 时, $z^*=0.368$; $R_Q=0.583$ 时, $z^*=0.362$; $R_Q=0.750$ 时, $z^*=0.358$. $R_Q=0.583$ 时无量纲化的紊动能分布情况见图 15,图中数值代表紊动能与下游出口流速平方之比. 显然,在分离区附近紊动能出现峰值. 两种紊流模型的计算结果与实验数据符合较好.

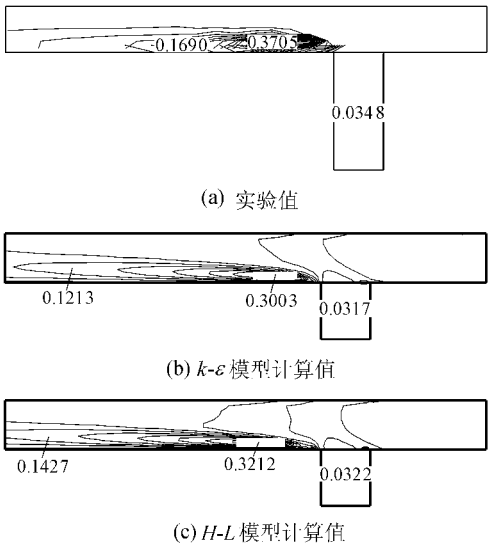


图 15 紊动能分布($R_Q=0.583$)

Fig.15 Turbulent kinetic energy for $R_Q=0.583$

3 结 论

本文针对等宽明渠缓流交汇口流动特点,分别应用水深平均 $k-\epsilon$ 模型和 $H-L$ 紊流模型建立水深平均二维数值模型,应用实测资料对这两种模型进行检验,结果表明,两种模型都能够模拟明渠交汇口的基本流动特性.但是,由于考虑了逆压梯度边界层,与实测资料相比较, $H-L$ 模型所得的分离区尺寸计算结果比标准 $k-\epsilon$ 紊流模型更为准确.

参考文献:

- [1] LARRY J W, ERIC D S, NICOLA M. Experiments on flow at a 90-degree open-channel junction[J]. Journal of Hydraulic Engineering , 2001 ,127(5) 340—350.
- [2] 茅泽育,张磊,陈嘉范,等. 数字粒子图像处理技术及其在明渠交汇口流速测量中的应用[J]. 水利学报, 2003 (6) 65—71.
- [3] 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.
- [4] 茅泽育,罗昇,赵升伟,等. 等宽明渠交汇口一维水流模型研究[J]. 水利学报, 2004 (8) 26—32.
- [5] 武蓉. 明渠交汇口水流流动特性的数值模拟研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [6] WU R, MAO Z Y. Numerical simulation of open-channel flow in 90-degree combining junction[J]. Tsinghua Science and Technology , 2003 8(6) :713—718.
- [7] MCGUIRK J J, RODI W. A depth-averaged mathematical model for the near field of side discharges into open-channel flow[J]. Fluid Mech ,1978 86 :761—781.
- [8] HANJALIC K, LAUNDER B E. Sensitizing the dissipation equation to irrotational strains[J]. Transactions of the ASME ,1980 3 :34—40.
- [9] 帕坦卡 S V. 传热和流体流动的数值方法[M]. 郭宽良译. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1980. 104—105.

Depth-averaged turbulence models for flow simulation at equal-width open-channel junction

ZHAO Sheng-wei , MAO Ze-yu , LUO Sheng , WU Rong

(Department of Hydraulic Engineering , Tsinghua University , Beijing 100084 , China)

Abstract :The depth-averaged numerical models using standard $k-\epsilon$ and $H-L$ turbulence models respectively for simulation of flow at the junction of equal-width open-channel were developed. The hydrostatic pressure assumption was made in vertical direction for simulation of variations of water surface and riverbed topography. The finite volume method on staggered grids was used to discretize the equations. The depth-velocity correction procedure and the SOR solver coupling with TDMA , which could accelerate the convergence of solutions were employed to solve the algebraic equations. Furthermore, the junction area was divided into blocks for grid arrangement to deal with the complex geometric characteristics of the junction. The comparison of the numerical results with measured data indicates that both of the two models are effective for simulation of flow characteristics at the junction. However , the $H-L$ model is much better in simulating the separation zone.

Key words :open-channel junction ; separation zone ; $H-L$ turbulence model ; $k-\epsilon$ turbulence model ; numerical simulation