

明渠弯道交汇口水动力特性数值模拟

曾 诚¹,尹雨然¹,陈 辰¹,周 婕²,邱 斐¹,白一墨¹,王玲玲¹

(1. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 2. 河海大学力学与材料学院,江苏 南京 211100)

摘要:为研究不同宽深比和径宽比对明渠弯道交汇口水动力特性的影响规律,利用体积函数法 (VOF) 追踪自由表面,采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型封闭控制方程,建立明渠弯道交汇水流三维数值模型对 3 种宽深比和 3 种径宽比的 5 种组合工况进行了模拟,分析了交汇口附近的水面形态、流速分布、断面环流和分离区形态等特征。结果表明:随着宽深比的增大或径宽比的减小,交汇口附近水面跌落程度减弱;与径宽比相比,宽深比对弯道交汇口以及下游区域内流速分布的不均匀性影响较大,宽深比增大,纵向流速变幅增大,流速分布更加不均匀,水流偏转效应增强;宽深比或径宽比减小导致弯道处环流强度增大;宽深比或径宽比增大,弯道处回流结构增强,分离区尺寸增大,水平方向上形态更加狭长。

关键词:明渠弯道水流;支流入汇;宽深比;径宽比;数值模拟

中图分类号:TV131.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2023)02-0009-07

Numerical simulation of hydrodynamics of open-channel confluences with bend flow//ZENG Cheng¹, YIN Yuran¹, CHEN Chen¹, ZHOU Jie², QIU Fei¹, BAI Yimo¹, WANG Lingling¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to study the impacts of different width-depth ratios and radius-width ratios on the hydrodynamic characteristics at open-channel confluences with bend flow, a three-dimensional numerical model was established by using the volume of fluid (VOF) method for the free surface capture and adopting the RNG $k-\varepsilon$ model for the governing equations closure. The water surface pattern, velocity distribution, secondary flow and shape of separation zone were analyzed after the simulations of five combined cases with three width-depth ratios and three radius-width ratios. The results indicate that the degree of water level drop near the intersection decreases with the increase of the width-depth ratio or the decrease of the radius-width ratio. Compared to the radius-width ratio, the width-depth ratio has a stronger impact on the non-uniformity of velocity distribution at the confluence and the downstream area. When the width-depth ratio increases, the longitudinal flow rate increases and the non-uniformity of velocity distribution increases with enhanced flow deflection effect. When the width-depth ratio or radius-width ratio increases, the reflux structure at the bend is enhanced, the size of the separation zone increases with narrower and longer horizontal form.

Key words: open-channel bend flow; tributary flow; width-depth ratio; radius-width ratio; numerical simulation

天然弯曲河道存在大量交汇口,交汇口附近水流运动特性发生改变,呈现特有的水力特性。对于顺直明渠交汇水流的已有研究表明,明渠交汇口处水流结构复杂。水面形态方面,Taylor^[1]选用矩形断面、平底支槽非对称入汇主槽的方式,保持水流为缓流,采用 45°和 135°交汇角,研究水面形态的变化;兰波等^[2]对 30°、60°和 90°的 3 种交汇角和 15 种流量比的交汇水流进行水槽试验分析,得到了水面形

态与交汇角、流量比的定性关系,结果表明:随着交汇角增大,水流紊动增强;刘盛赞等^[3]建立了适用于水流交汇区的数值模型,指出交汇角、流量比和动量比越小,交汇口上游水位壅高及分离区内水位的下降程度越不明显;周舟等^[4]建立了明渠交直流数值模型,指出同一流量比工况下,交汇角增大,交汇口附近水面变幅增大,同一角度工况下,流量比增大,交汇口附近水面变幅减小。速度分布方面,

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3202605);中央高校基本科研业务费专项(B200202116,B200204044)

作者简介:曾诚(1981—),男,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:czeng@hhu.edu.cn

通信作者:周婕(1981—),女,讲师,博士,主要从事流体力学研究。E-mail:zhoujie@hhu.edu.cn

Biron 等^[5]指出干支流床面高程差是改变交汇口水流结构的重要因素;王协康等^[6]通过水槽试验研究了交汇角为 30° 的顺直明渠交汇水流三维结构,结果表明交汇口上游受支流顶托影响产生壅水并且出现低流速区,在交汇口对岸产生高流速区,水流高速带分布于交汇口附近并形成断面环流;魏文礼等^[7]选取 30°、45°、60° 和 90° 交汇角,对顺直交汇流交汇区下游各断面的流速不均匀系数分布进行定量分析,发现随着交汇角增大,流速分布越不均匀。断面环流方面,Weber 等^[8]通过物理试验研究发现环流强度沿顺水流方向逐渐衰减;Luo 等^[9]发现明渠弯道不同位置处断面环流结构不同,在某些断面上环流的数量与方向发生变化;Yuan 等^[10]通过试验研究发现交汇口附近的断面环流会对床面造成剪切而形成冲刷坑;Yuan 等^[11]研究发现河流平面形状和流量比影响断面环流,而断面环流反过来又影响沉积物的输运以及当地河床的形态;曾诚等^[12]建立了等宽顺直明渠交汇水流三维数值模型,模拟结果表明,收缩区水流横断面可以观察到明显的环流结构,水流恢复区断面出现不同的环流结构,交汇口下游断面环流强度沿顺水流方向逐渐减弱。

前人针对顺直明渠交汇水流的研究较为充分,但对于弯道交汇水流的研究相对较少。张强等^[13]对长江沿线的观测结果表明,支流入汇段大部分属于顺直河道,而干流在交汇段呈现出弯曲特性,因此对于交汇弯道的研究具有重要意义。Roberts^[14]对天然交汇弯道进行观测后发现,支流倾向于在弯道最大曲率点弯顶附近凹岸处入汇,并进一步分析了流量比对明渠弯道回流区的影响。张为等^[15]针对微弯交汇水流运动特性,建立了曲线坐标下的二维水沙模型,并将该模型计算结果与长江上游涪陵河段实测数据进行对比,认为该模型能够反映微弯交汇水流的运动规律。付中敏等^[16-18]基于中心角 180°、径宽比 2 的交汇弯道进行了水槽试验和数值模拟研究,分析了交汇角和流量比对交汇弯道水流的影响。目前针对弯道交汇的研究限制于特定弯道,集中讨论交汇角、流量比等不同入汇条件对交汇水流的影响,而对不同弯道几何形态下交汇流的讨论较少。本文对不同弯道几何形态的明渠弯道交汇流工况进行数值模拟计算,分析支流入汇条件下宽深比和径宽比对水动力特性的影响。

1 数值模型

1.1 控制方程

明渠弯道交汇水流的模拟应满足的质量守恒及动量守恒方程分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j}\right) \quad (2)$$

式中: x_i, x_j 为 x, y, z 轴坐标 ($i, j = 1, 2, 3$); u_i, u_j 分别为 i, j 方向的时均流速; t 为时间; ρ 为流体密度; g 为重力加速度; p 为压强; μ 为动力黏性系数; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力。

采用体积函数 (volume of fluid, VOF) 法捕捉自由液面。网格单元的体积为 V_c , 水的体积为 V_w , 则水的体积分数 a_w 为

$$a_w = \frac{V_w}{V_c} \quad (3)$$

$a_w = 1$ 表示网格单元内全部为水, $a_w = 0$ 表示网格单元内全部为空气, $0 < a_w < 1$ 表示该网格单元存在自由水面。 a_w 满足输运方程:

$$\frac{\partial a_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(a_w u_i) = 0 \quad (4)$$

通过迭代求解, 可根据下式确定网格单元内其他特性参数 ψ , 如密度、黏性系数等:

$$\psi = a_w \psi_w + (1 - a_w) \psi_A \quad (5)$$

式中: 下标 W 表示水; A 表示空气。

本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型封闭控制方程模拟水流, k 方程和 ε 方程分别为

$$u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon \sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \varepsilon \quad (6)$$

$$u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon \sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

其中

$$P_k = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

$$C_{1\varepsilon} = 1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}$$

$$C_{2\varepsilon} = 1.68 \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

式中: k 为紊动能; ε 为紊流耗散率; P_k 为紊动能生成项; 参数 $\eta_0, \beta, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 的取值分别为 4.377、0.012、0.085、0.7179 和 0.7179。RNG $k-\varepsilon$ 模型考虑了非平衡应变率影响的附加耗散生成项, 反映在 ε 方程中 $C_{1\varepsilon}$ 不是常数, 而其他常数值均由理论计算所得, 并非经验常数。

速度与压力解耦采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure linked equations) 算法, 其他项离

散采用 QUICK (quadratic upstream interpolation for convective kinematics) 格式。入口边界分为水相和气相,水相为速度进口,气相为压力进口;出口边界为压力出口,满足静压假定,出口水位与水槽试验值一致,出口压力满足静水压强分布;进出口的紊动能与耗散率边界值均按照经验公式的计算结果初始化;壁面为固壁边界。

1.2 网格划分及模型验证

本文选取 Sui 等^[17]的明渠弯道交汇水流试验为基础开展数值模拟研究。试验三维模型如图 1(a)所示,模型高度为 0.45 m,坐标原点位于弯道底面圆心处。模型具体尺寸如图 1(b)所示,中心角 φ 为 180°的弯道主槽和顺直支槽水流交汇,弯道

上下游直段长均为 4 m,弯道内径为 1.5 m,中心线半径 $R_c=2$ m,外径为 2.5 m,主槽弯道宽 1 m。顺直支槽长 3.5 m,宽 0.3 m。支槽与弯道在凹岸弯顶 $\varphi=90^\circ$ 处相交。试验中弯段和主槽由有机玻璃组成。数值模拟参数依据物理模型试验,弯道进口流量为 $0.03\text{ m}^3/\text{s}$,支槽进口流量为 $0.018\text{ m}^3/\text{s}$,弯道出口水深为 0.18 m。

如图 2 所示,采用六面体结构化网格对计算区域进行剖分,在壁面附近和交汇口附近进行网格加密,网格数为 $360\times 68\times 24$ 。

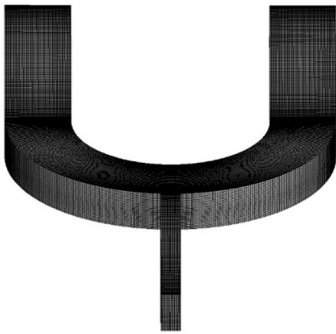


图 2 三维网格示意图

图 3 为 $\varphi=60^\circ$ 和 $\varphi=120^\circ$ 时断面纵向流速验证结果,其中, H 为水深, B^* 为无量纲径向距离, $B^*=0$ 表示凹岸边壁, $B^*=1$ 表示凸岸边壁。由图 3 可以看出断面速度分布计算结果与试验值吻合较好。在 $\varphi=60^\circ$ 断面,纵向流速在同一垂线位置分布较为均匀;在 $\varphi=120^\circ$ 断面,随着垂线位置靠近凹岸,纵向流速逐渐减小,甚至在凹岸边壁附近出现负值。凹岸侧, $\varphi=60^\circ$ 断面纵向流速略大于 $\varphi=120^\circ$ 断面,凸岸侧情况则相反。

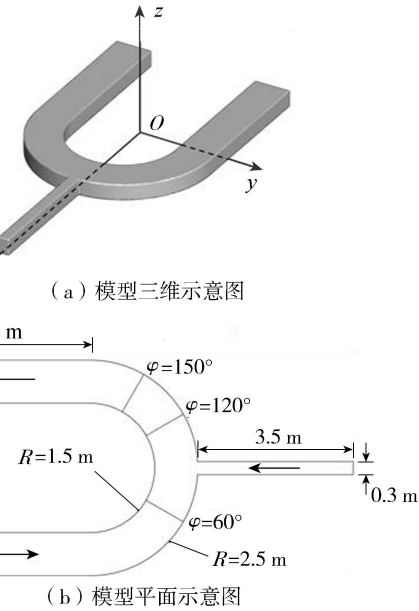


图 1 交汇弯道模型示意图

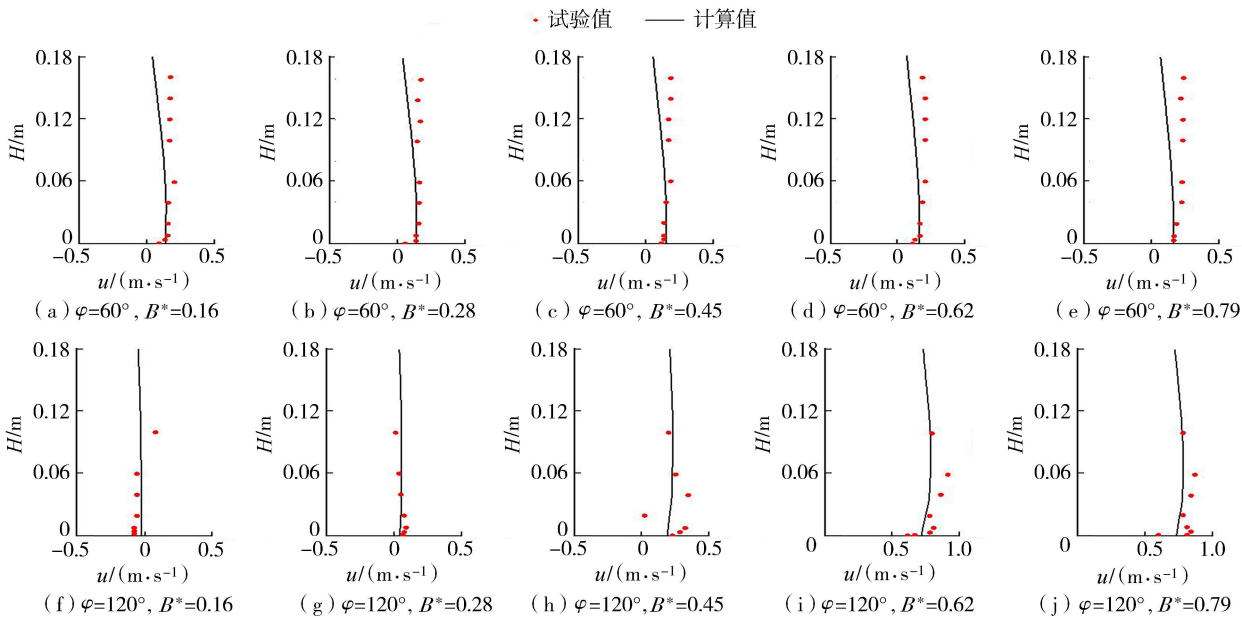


图 3 交汇区测点流速剖面对比

2 模拟结果分析

2.1 数值模拟工况

在交汇弯道水流模型验证基础上,针对3组宽深比($H_r = 1.5、3.0、5.0$)和3组径宽比($R_r = 1.0、1.5、2.0$)工况进行三维数值模拟研究,不同宽深比和径宽比的计算工况参数如表1所示。不同宽深比工况中,仅调整进口水深 H_0 和出口水深 H_1 ;不同径宽比工况中,仅调整弯道曲率半径 R_c 。计算工况网格均采用六面体结构化网格,不同工况网格数量在54万~65万之间。不同工况的入汇位置均在弯顶凹岸侧,交汇角均为 90° ,干支流流量比均为0.6,仅讨论宽深比和径宽比对交汇弯道水流的影响。

表1 交汇弯道计算工况参数

工况	H_r	R_r	H_0/m	H_1/m	R_c/m	Re	Fr
1	1.5	2.0	0.67	0.603	2.0	12 693	0.017
2	3.0	2.0	0.33	0.297	2.0	17 893	0.051
3	5.0	2.0	0.20	0.180	2.0	21 216	0.107
4	5.0	1.5	0.20	0.180	1.5	21 216	0.107
5	5.0	1.0	0.20	0.180	1.0	21 216	0.107

2.2 水面形态

交汇对弯道自由水面形态分布产生影响,宽深比为5、径宽比为2条件下的交汇弯道水流沿程水位分布情况如图4所示(纵坐标 $Z^* = H/H_0$)。

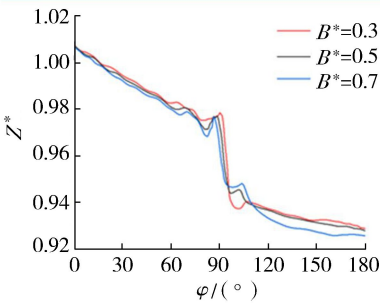


图4 交汇对弯道自由水面的影响

由图4可以看出,受支流入汇顶托作用影响,交汇口($\varphi = 90^\circ$)处水面发生跌落。跌落开始前短距离内沿程水位存在一先下降后上升的过程,且越靠近凸岸,这一过程越明显;水面上升到峰值后在汇流区急剧跌落,越靠近凹岸,跌落幅度越大;水面跌落到谷值后出现微小抬升;之后水位回落,越靠近凸

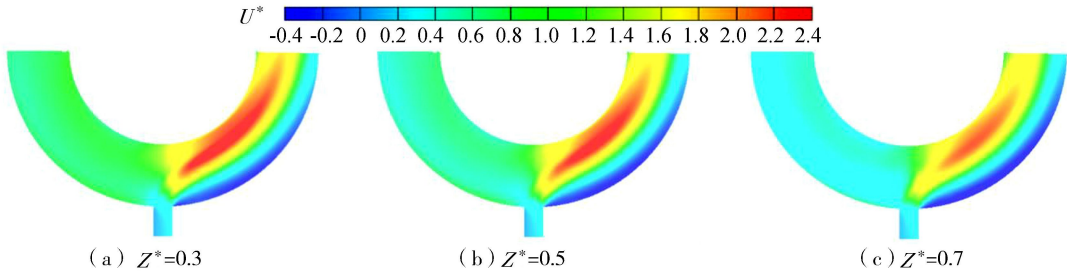


图5 下层、中层和上层纵向流速分布

岸,回落速度越快。为进一步分析宽深比和径宽比对交汇弯道交汇口附近水面形态的影响,对于不同条件下水深比 h' 进行计算, h' 定义如下:

$$h' = \frac{h_{\max}}{h_{\min}} \tag{8}$$

式中 $h_{\max}$ 、 $h_{\min}$ 分别为 $B^* = 0.3$ 处沿程水面线跌落开始和结束位置水位。 h' 反映了宽深比和径宽比对弯道交汇口区域水位变幅的影响。

表2为不同宽深比和径宽比条件下水深比 h' 计算结果,可以看出,径宽比一定时, h' 随着宽深比减小而逐渐增大;宽深比保持不变时, h' 随着径宽比减小而减小。这意味着,随着宽深比减小或径宽比增大,支流入汇对交汇口上游弯道水流挤压作用加强,上游水位壅高,水位跌落的落差增大,交汇口附近水面线变动明显,水体与弯道边壁的能量交换表现得更为剧烈。

表2 水深比计算结果

H_r	R_r	h'	H_r	R_r	h'
1.5	2.0	1.0822	5.0	1.5	1.0437
3.0	2.0	1.0520	5.0	1.0	1.0371
5.0	2.0	1.0444			

2.3 流速分布

为方便不同计算工况结果对比,以进口流速 u_0 对纵向流速 u 、横向流速 v 、垂向流速 w 进行无量纲化, $U^* = u/u_0$, $V^* = v/u_0$, $W^* = w/u_0$ 。图5给出了宽深比为5、径宽比为2时 $Z^* = 0.3$ (下层)、 $Z^* = 0.5$ (中层)和 $Z^* = 0.7$ (上层)的纵向流速 U^* 分布情况。图中可以看到,在垂向上,水流纵向流速分布规律较为一致。交汇口下游弯道纵向流速分布相较于交汇口上游发生了明显变化,交汇口处水流发生偏转。交汇口下游出现明显的水流分区现象,交汇口下游凹岸边壁附近水体回流,弯道过水断面被束窄,随水流继续行进,弯道纵向流速逐渐减小。

为进一步分析宽深比和径宽比对交汇弯道流速分布的影响,选取3组工况 $Z^* = 0.5$ 处纵向流速计算结果进行对比,如图6所示,不同宽深比和径宽比下流速分布规律较为一致。相较于径宽比,宽深比对流速分布的影响更为明显,具体表现为:不同宽深

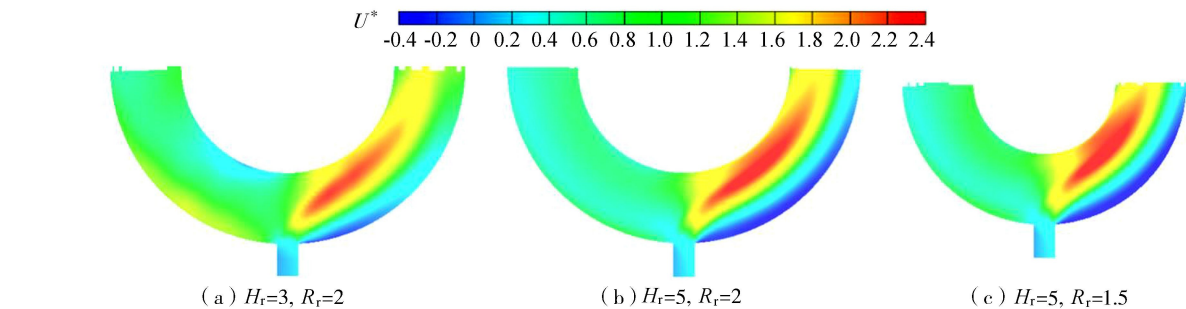


图6 不同工况下纵向流速分布

比工况的交汇口下游不同分区范围大小变化明显；随着宽深比减小，弯道水流偏转效应减弱，流速在横向上变化梯度减小。交汇口下游回流减弱，分离区范围减小，分离区和收缩区长度变短。

图7 是不同条件下交汇口下游 $\varphi = 120^\circ$ 断面流速分布，可以看出，宽深比对交汇弯道分离区尺寸影响明显，宽深比减小时，断面左侧凹岸处回流区减小，收缩面积随之增大。相比于宽深比，径宽比的改变对流速分布影响较为微弱。

综上所述，宽深比和径宽比对于弯道交汇口附近以及下游水域流速分布存在影响，其中宽深比的影响较为明显。随着宽深比减小，纵向流速在纵向

和横向上变化梯度降低，纵向流速变幅减小，流速分布更加均匀，水流偏转效应减弱。当宽深比减小，弯道回流结构减弱，交汇口下游分离区范围减小，收缩断面增大。分离区水平尺寸减小且沿水深方向变化梯度略有增大。

2.4 断面环流

图8 是不同工况下交汇口上游 $\varphi = 60^\circ$ 断面、交汇口下游 $\varphi = 120^\circ$ 断面和 $\varphi = 150^\circ$ 断面 $V^* - W^*$ 的速度矢量图。

受汇流影响，交汇口下游断面环流结构较上游断面发生显著变化：断面凸岸收缩区域内可以观察到环流现象，凹岸分离区横向和垂向流速较小，在分

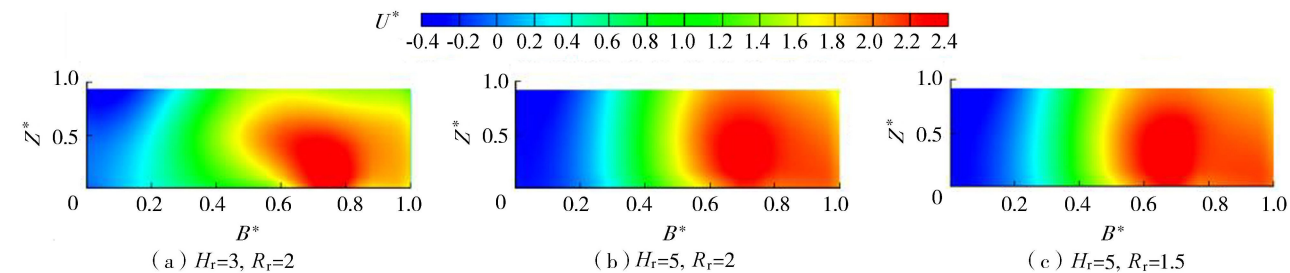


图7 不同工况下 $\varphi = 120^\circ$ 断面流速分布

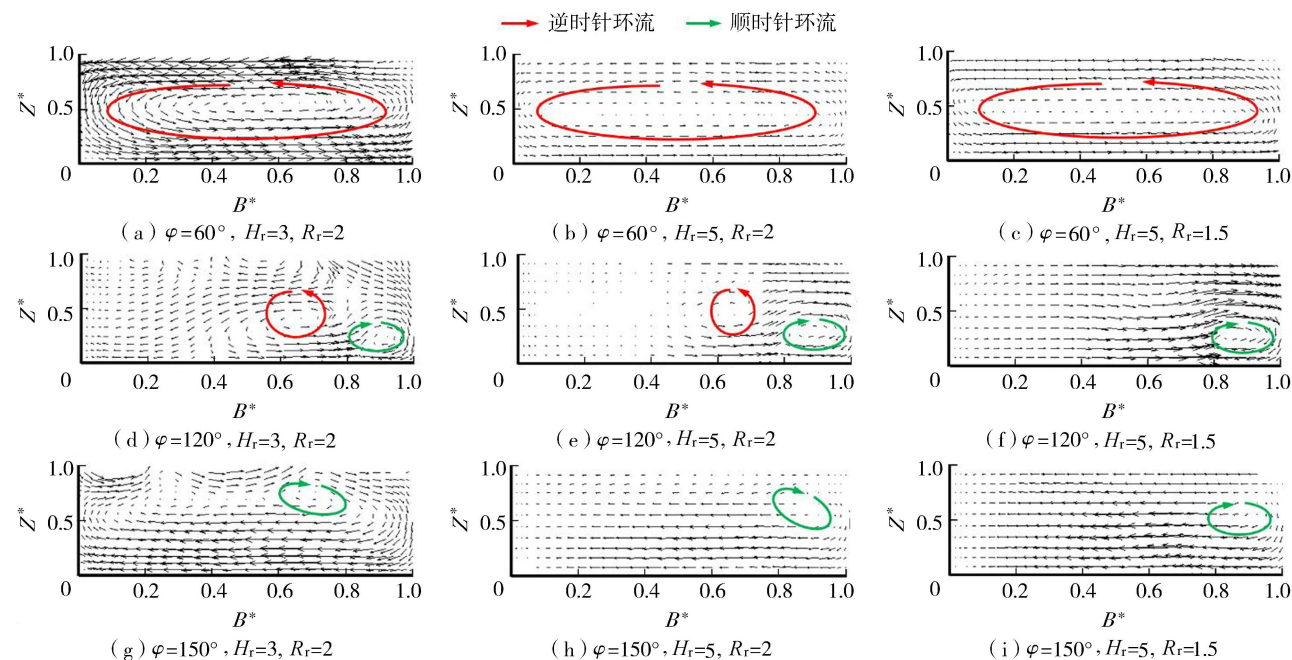


图8 不同工况下断面环流

离区几乎看不到横断面环流现象。由图 8(a) ~ (c) 可以看出, 交汇口上游断面存在明显的逆时针环流现象, 上层水体流向凹岸, 下层水体流向凸岸。当宽深比或径宽比减小, 交汇口上游断面环流结构显著加强。由图 8(d) ~ (f) 可以看出, 径宽比为 2 时, $\varphi = 120^\circ$ 断面凸岸收缩区可以观察到两个方向相反的环流, 径宽比为 1.5 时, 仅能看到凸岸侧上部一个顺时针环流。

为量化环流强度, 本文依据 Shukry^[19] 提出的环流强度计算公式来分析弯道环流强度变化规律:

$$S_{xy} = \frac{V_{xy}^2}{V^2} \tag{9}$$

其中 $V_{xy} = \sqrt{v^2 + w^2}$ $V = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$
式中 S_{xy} 为环流强度。

图 9 为断面平均环流强度 $\bar{S}_{xy}$ 沿程分布计算结果, 可以看出, 同一断面处断面环流强度随宽深比或径宽比减小而增大。交汇口上游, 环流强度逐渐增强; 交汇断面 ($\varphi = 90^\circ$) 由于支流入汇, 水流紊动特性加强, 断面环流强度达最大值, 与前人的观测结果一致^[20]。交汇口下游断面各工况环流强度差别较小。当 φ 由 90° 增大至 120° 时, 环流强度锐减, 随后环流强度略有回升, 当 φ 由 150° 增大至 180° 时, 环流强度减小。

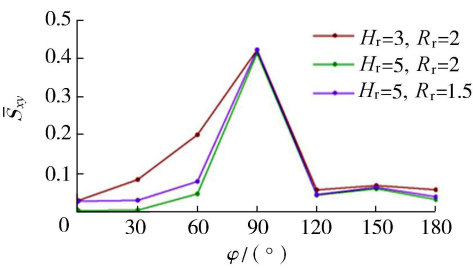


图 9 断面平均环流强度沿程分布

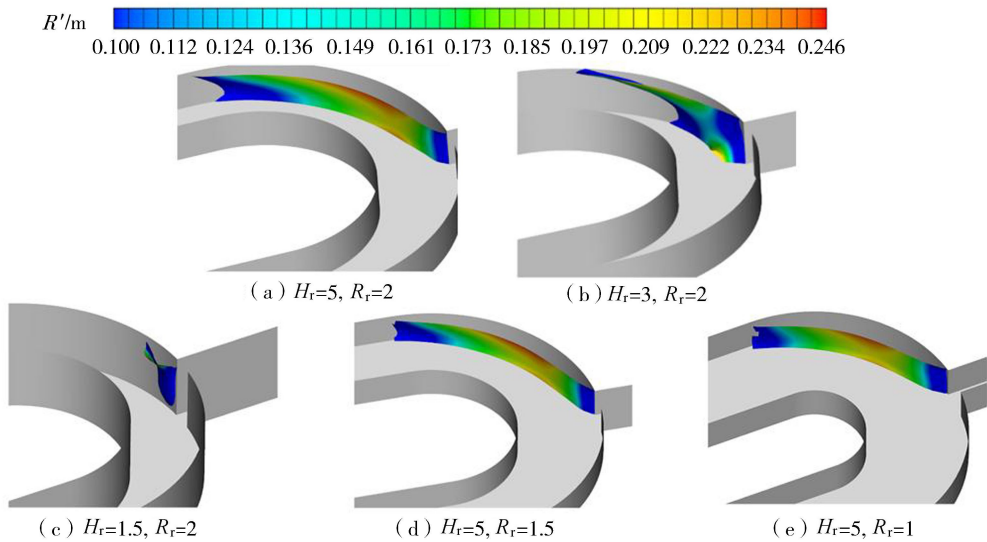


图 11 不同工况下分离区形态

2.5 分离区形态

分离区形态的界定方式通常有流线法和等值线法。流线法在定义分离区二维平面时较为适用, 而等值线法对于二维和三维分离区界定均能很好适用, 所以本文研究中采用等值线法定义分离区。

图 10 为 $H_r=5$ 、 $R_r=2$ 时分离区三维示意图。由图 10 可见, 弯道交汇分离区紧贴交汇口下游凹岸边壁, 呈现上大下小的形态, 垂向上平面形态相似, 与前人的观测结果一致^[20]。以弯道圆心为原点, 弯道直段河宽方向为 x 方向, 支渠顺水流方向为 y 方向, 水深方向为 z 方向建立坐标系。为便于对比分析, 以弯道凹岸半径 R 对 x 和 y 进行无量纲化, $X^* = x/R$, $Y^* = y/R$ 。定义 R' 为分离区与弯道凹岸边壁的距离。

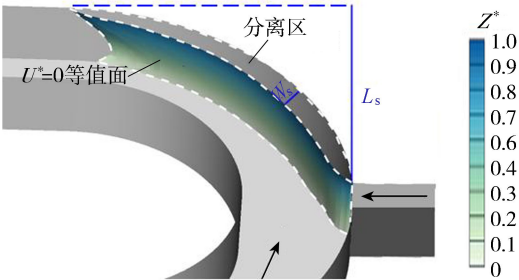


图 10 弯道交汇分离区三维示意图

图 11(a) 为 $H_r=5$ 、 $R_r=2$ 时分离区形态图, 可见分离区水平尺寸随着水深增大而呈减小趋势, 因此本文将分离区表层水平尺寸和垂向深度作为其几何特征参数。定义分离区长度 L_s 为表层在 X^* 轴的投影长度; 宽度 W_s 为表层与弯道凹岸边壁最大距离, 即分离区边界表层 R' 最大值; 高度 H_s 为分离区在 Z^* 轴上投影高度。因此根据分离区计算结果, 当 $H_r=5$ 、 $R_r=2$ 时, 分离区的长度 $L_s=0.94$, 宽度 $W_s=0.235$, 高度 $H_s=0.9$ 。

图 11(b) 和图 11(c) 分别为 $H_r=3$ 、 $R_r=2$ 和

$H_r=1.5$ 、 $R_r=2$ 时分离区形态图,可见当径宽比 R_r 一定时,随着宽深比减小,分离区长度 L_s 和高度 H_s 随之减小,特别是宽深比由 3 减小至 1.5 时分离区长度变化尤为明显,然而宽度 W_s 随着宽深比减小呈增大趋势。分离区竖直方向尺寸变化幅度增大,当宽深比减小为 1.5 时,近底面分离区消失。

图 11(d) 和图 11(e) 分别为 $H_r=5$ 、 $R_r=1.5$ 和 $H_r=5$ 、 $R_r=1$ 时分离区形态图,当宽深比 H_r 一定时,随着径宽比减小,分离区长度 L_s 、宽度 W_s 和高度 H_s 变化缓慢,呈现非常微弱的减小趋势。

表 3 为不同工况下分离区 L_s 、 W_s 和 H_s 的计算结果。由表 3 可见,分离区长度 L_s 受宽深比和径宽比的影响较大,尤其是宽深比;分离区宽度随宽深比的变化趋势与分离区长度相反;不同工况分离区高度 H_s 几乎没有差别,除了宽深比为 1.5 时,近底面分离区消失,分离区高度相应减小。

表 3 不同工况下 L_s 、 W_s 和 H_s 的计算结果

H_r	R_r	L_s	W_s	H_s
1.5	2.0	0.252	0.245 8	0.85
3.0	2.0	0.845	0.238 3	0.90
5.0	2.0	0.940	0.235 0	0.90
5.0	1.5	0.925	0.235 3	0.90
5.0	1.0	0.883	0.232 8	0.90

在本文模拟的工况中,宽深比对于分离区的影响明显强于径宽比,当宽深比或径宽比较小时,分离区尺寸随宽深比或径宽比变化幅度增大。当宽深比或径宽比增大,分离区尺寸增大,水平尺寸更加狭长,高度也随之增加。即交汇弯道在较大的宽深比和径宽比中出现更强的回流结构,能够在宽深比或径宽比变动较小时,保证水平方向环流结构形态,而随着宽深比和径宽比的变小,尤其是宽深比,回流结构减弱,分离区受宽深比和径宽比的影响增强。

3 结 论

- a. 弯道交汇口附近水面发生跌落,越靠近凹岸交汇口,跌落现象越明显。随着宽深比的增大或者径宽比的减小,交汇口附近水面跌落程度减弱。
- b. 交汇口水流发生偏转,交汇口附近水体回流,过水断面被束窄,流速增大,随水流继续行进,弯道流速逐渐减小。相较于径宽比,宽深比对流速分布的不均匀性影响较大。当宽深比增大,纵向流速变幅增大,流速分布更加不均匀,水流偏转效应增强。
- c. 环流主要分布在水流收缩区,随着水流不断发展,交汇口下游断面环流强度逐渐减弱。宽深比或径宽比减小均导致弯道处环流强度增大。
- d. 弯道交汇分离区水平尺寸呈现上大下小的变化趋势。宽深比和径宽比对交汇弯道分离区有一

定影响作用,随着宽深比或径宽比减小,这种影响作用加强。当宽深比或径宽比增大,回流结构加强,分离区尺寸增大,水平形态更加狭长。

参考文献:

[1] TAYLOR E H. Flow characteristics at rectangular open-channel junctions [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1944, 109 (1) : 893-902.

[2] 兰波,汪勇. 干支流交汇水面形态特征分析 [J]. 重庆交通大学学报, 1997, 16 (4) : 109-114. (LAN Bo, WANG Yong. Experimental study on water surface characteristics at the junction [J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 1997, 16 (4) : 109-114. (in Chinese))

[3] 刘盛赟,康鹏,李然,等. 水流交汇区的水动力学特性数值模拟 [J]. 水利水电科技进展, 2012, 32 (4) : 14-18. (LIU Shengyun, KANG Peng, LI Ran, et al. A numerical study on hydrodynamic characteristics of confluence flow [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32 (4) : 14-18. (in Chinese))

[4] 周舟,曾诚,周婕,等. 等宽明渠交汇口壅水特性数值模拟 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (4) : 347-353. (ZHOU Zhou, ZENG Cheng, ZHOU Jie, et al. Numerical simulation of backwater characteristics at equal-width open-channel confluences [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (4) : 347-353. (in Chinese))

[5] BIRON P, BEST J L, ROY A G. Effects of bed discordance on flow dynamics at open channel confluences [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122 (12) : 676-682.

[6] 王协康,王宪业,卢伟真,等. 明渠水流交汇区流动特征试验研究 [J]. 四川大学学报 (工程科学版), 2006, 38 (2) : 1-5. (WANG Xiekang, WANG Xianye, LU Weizhen, et al. Experimental study on flow structure at open channel confluences [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2006, 38 (2) : 1-5. (in Chinese))

[7] 魏文礼,邵世鹏,刘玉玲. 不同交汇角度明渠交汇口三维水力特性的大涡模拟研究 [J]. 应用力学学报, 2015, 32 (1) : 57-63. (WEI Wenli, SHAO Shipeng, LIU Yuling. Three-dimensional numerical study of hydraulic characteristics at open-channel junctions with different intersection angles by Large Eddy Simulation [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2015, 32 (1) : 57-63. (in Chinese))

[8] WEBER L J, SCHUMATE E D, MAWER N. Experiments on flow at a 90° open-channel junction [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127 (5) : 340-350.

[9] LUO Hao, FYTANIDIS D K, SCHMIDT A R, et al. Comparative 1D and 3D numerical investigation of open-channel junction flows and energy losses [J]. Advances in Water Resources, 2018, 117 : 120-139.

(下转第 38 页)

- 和土条形基础极限承载力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28 (增刊 1): 3021-3028. (ZHAO Lianheng, LI Liang, YANG Feng, et al. Ultimate bearing capacity calculation of strip foundation on unsaturated soil with upper bound theorem and SQP method. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Sup1): 3021-3028. (in Chinese))
- [6] VAHEDIFARD F, ROBINSON J D. Unified method for estimating the ultimate bearing capacity of shallow foundations in variably saturated soils under steady flow [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(4): 04015095.
- [7] 陈茜, 程大伟. 稳态流下非饱和土地基承载力模型[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(6): 9-14. (CHEN Xi, CHENG Dawei. Bearing capacity model for foundations of unsaturated soil under steady flow condition [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(6): 9-14. (in Chinese))
- [8] SRIVASTAVA R, YEH T C J. Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration towards the water table in homogeneous and layered soils [J]. Water Resources Research, 1991, 27(5): 753-762.
- [9] ZHAN T L, JIA G W, CHEN Y M, et al. An analytical solution for rainfall infiltration into an unsaturated infinite slope and its application to slope stability analysis [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(12): 1737-1760.
- [10] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table [J]. Soil Science, 1958, 85(4): 228-232.
- [11] VESIC A B. Analysis of ultimate loads of shallow foundations [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(1): 45-73.
- [12] 张秀勇, 王海龙, 李杰. 碎石桩复合地基在大丽高速公路软土地基处理中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 455-459. (ZHANG Xiuyong, WANG Hailong, LI Jie. Application of gravel pile composite foundation in improving soft subgrade of Da-Li Highway [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 455-459. (in Chinese))

(收稿日期: 2022-05-24 编辑: 刘晓艳)

(上接第 15 页)

- [10] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, LI Kun, et al. Hydrodynamics, sediment transport and morphological features at the confluence between the Yangtze River and the Poyang Lake [J]. Water Resources Research, 2021, 57(3): e2020WR028284.
- [11] YUAN Saiyu, TANG Hongwu, XIAO Yang, et al. Water flow and sediment transport at open-channel confluences: an experimental study [J]. Journal of Hydraulic Research, 2018, 56(3): 333-350.
- [12] 曾诚, 陈辰, 周舟, 等. 明渠交汇流分离区形态及二次流强度分析 [J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(2): 50-55. (ZENG Cheng, CHEN Chen, ZHOU Zhou, et al. Analysis on separation zone shape and secondary current intensity in open-channel combining flows [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2): 50-55. (in Chinese))
- [13] 张强, 王平义, 刘倩颖. 山区河流干支流交汇形式的重新划分 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 458-460. (ZHANG Qiang, WANG Pingyi, LIU Qianying. Re-division of confluence patterns of main stream and tributaries of rivers at mountainous area [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2010, 29(3): 458-460. (in Chinese))
- [14] ROBERTS M V T. Flow dynamics at open channel confluent-meander bends [D]. Leeds: University of Leeds, 2004.
- [15] 张为, 刘林, 袁晶. 长江上游干支流交汇河段水流数学模型研究及应用 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10(34): 8466-8470. (ZHANG Wei, LIU Lin, YUAN Jing. 2-D flow mathematical model and its application for the typical reach at the confluence of main stream and tributary in upstream Yangtze River [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(34): 8466-8470. (in Chinese))
- [16] 付中敏. 山区河流弯曲干流型汇合口水沙运动试验及数值模拟研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [17] SUI Bin, HUANG Shehua. Numerical analysis of flow separation zone in a confluent meander bend channel [J]. Journal of Hydrodynamics, 2017, 29(4): 716-723.
- [18] 高艳, 黄社华, 李琼. 弯道干流与支流交汇口垂线流速分布的试验研究 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 90-93. (GAO Yan, HUANG Shehua, LI Qiong. Experimental research on velocity distribution along depth at junction of bend stream with branch afflux [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 90-93. (in Chinese))
- [19] SHUKRY A. Flow around bends in an open flume [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1950, 115(1): 751-778.
- [20] 隋斌. 明渠弯道交汇水流水力特性的大涡模拟与实验研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.

(收稿日期: 2022-05-31 编辑: 俞云利)