

明渠弯道几何形态对水动力特性的影响研究

李 凯¹, 曾 诚², 陈 辰², 王明辉¹, 胡羽蝶³, 周 婕⁴

(1. 宿迁市水务工程建设管理中心; 2. 河海大学水利水电学院; 3. 江苏省水文水资源勘测局无锡分局;
4. 河海大学力学与工程科学学院)

摘要:为探究宽深比和径宽比对明渠弯道水动力特性的影响规律,建立了基于 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型和体积函数自由表面追踪技术的三维数值模型。通过对 4 种宽深比和 4 种径宽比工况下的弯道水流进行数值模拟,重点分析了水面形态、流速分布、断面环流及弯道分离流等水动力特征。结果表明:水流紊动特性随宽深比或径宽比的减小而增强;当上述比值降低时,流速重分布特性愈发显著,环流强度增强,弯道分离流发生的概率增大;针对本文模拟的小宽深比和小径宽比 U 形弯道,分离流临界条件是宽深比为 1.5、径宽比为 1.0。
关键词:明渠弯道水流;宽深比;径宽比;数值模拟

Study on influence of geometric morphology of open-channel bends on hydrodynamic characteristics//Li Kai¹, Zeng Cheng², Chen Chen², Wang Minghui¹, Hu Yudie³, Zhou Jie⁴ (1. Suqian Water Engineering Construction and Management Center; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University; 3. Wuxi Branch, Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau; 4. College of Mechanics and Engineering Science, Hohai University)
Abstract: To investigate the influence laws of the width-to-depth ratio and the radius-to-width ratio on the hydrodynamic characteristics of open-channel bends, this study established a three-dimensional numerical model based on the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and the volume of fluid (VOF) free surface tracking method. Numerical simulations of bend flow under four width-to-depth ratios and four radius-to-width ratios were conducted, with a focus on analyzing hydrodynamic characteristics such as water surface profiles, velocity distribution, secondary flows, and bend separation flows. The results indicate that the flow turbulence characteristics intensify as the width-to-depth ratio or radius-to-width ratio decreases. With the reduction of these ratios, flow redistribution becomes increasingly significant, circulation strength strengthens, and the probability of flow separation in bends increases. For the U-shaped bends with small width-to-depth and radius-to-width ratios simulated in this study, the critical conditions for flow separation are identified as a width-to-depth ratio of 1.5 and a radius-to-width ratio of 1.0.
Key words: open-channel bend flow; width-depth ratio; radius-width ratio; numerical simulation

明渠水流进入弯道后,受弯道边壁约束及离心力作用,水流运动方向发生改变,导致水面形态和水流结构进行调整,形成了弯道水流特有的水动力特性。对明渠弯道水动力特性的研究,不仅有助于推动河道水动力学的发展,更能为河床演变研究和水利工程规划提供科学依据。前人对弯道水动力特性进行了大量研究^[1-2]。在水面形态方面,罗索福斯基等^[2]通过中心角为 180°的弯道水槽试验对自由水面形态进行了观测,并推导出了弯道横比降计算公式;卡拉乌舍夫^[3]和张红武等^[4]推导出了弯道沿程最大横比降公式;张红武等^[4]基于浑水动床试验结果进一步发现,含沙量对水面横比降存在影响,横比

降随含沙量的增加而增大,但当含沙量增大至一定数值后,其影响程度逐渐减弱。Bridge 等^[5]根据实际观测数据分析指出,水位升高或水流动量增大会导致横比降增大,且弯道处横比降呈现沿程变化的特征。在流速分布研究方面,张红武等^[4]基于水槽试验结果发现,弯顶处的纵向流速垂线分布与指数型流速分布公式吻合较好,该公式在光滑和粗糙壁面条件下均与实测资料相符,且不受卡门常数影响。De Vriend^[6]的研究表明,环流引起的横向动量变动会导致主流速分布变形,基于主流和次流相似性假定,其建立了概化弯道紊流数学模型,该模型对浅水和轻度弯曲河道的模拟效果较为理想。在断面环流

研究方面,波达波夫^[7]和卡拉乌舍夫^[3]分别依据纵向流速的抛物线型和椭圆型分布规律,推导出了不同的环流垂向分布公式;Kalkwijk 等^[8]在推导弯道环流流速分布公式时考虑了离心力的影响,并基于对数型纵向流速分布公式推导出了垂向流速分布;孙东坡^[9]采用指数型纵向流速分布,推导了环流流速分布公式;张耀先等^[10]利用指数型分布公式,对弯道水流的横向流动和泥沙输运特性进行了研究。在弯道分离流研究方面,罗索福斯基等^[2]认为径宽比为 1 时会出现分离流,但在水深较小和边壁变陡的情况下可能不出现分离流;Leeder 等^[11]通过对比试验发现,分离流的发生与水流强度密切相关。在理论研究方面,刘焕芳^[12]依据流速公式分析指出,径宽比越小,水流强度越大;河床糙率增加易导致水流发生分离;随着径宽比或宽深比的减小,水流出现分离的可能性增大。

国内外很多学者针对特定宽深比和径宽比条件下的弯道水流特性开展了大量研究。例如:Blanckaert^[13-14]在径宽比为 1.31 和 1.46 的 193°弯道上进行了试验研究,选取了 5 组大宽深比(12.1、9.2、8.2、7.2、6.1)工况,分析了凹、凸岸边界层水流分离对主流区的影响,研究结果表明,当弯道弯曲程度达到某一临界数值时,环流强度不再增加,据此提出了“二次流饱和”的概念;Van Balen 等^[15]对径宽比为 1.3,宽深比为 12、8.2 和 6.3 的弯道水流特性进行了分析,探讨了宽深比对弯道环流结构的影响;Wang 等^[16]针对径宽比为 2.2 的 180°弯道水槽,研究了 9 种小宽深比(1.4~2.6)条件下的水流特性,发现床面变形对自由水面和次生环流具有显著影响;Moncho-Esteve 等^[17]对宽深比在 8.5~17.0 之间的正弦派生连续弯道进行了数值模拟,分析了不同水力要素对天然连续弯道的影响;Yan 等^[18]通过水槽试验和数值模拟相结合的方法,对径宽比为 1.5 的 135°弯道进行了研究,通过对比 5 种不同紊流模型的计算结果,发现 RNG $k-\varepsilon$ 模型对弯道水流模拟效果较好,并进一步对比分析了不同宽深比和断面形状对水流特性的影响。

目前针对特定宽深比或径宽比条件下的弯道水流已有很多研究,但尚缺乏针对不同宽深比或径宽比条件下弯道水动力特性的系统研究。本文采用数值模拟研究方法,对 4 种宽深比(1.0、1.5、2.0、2.5)和 4 种径宽比(0.75、1.0、1.5、2.0)条件下的弯道水流进行模拟研究,分析了弯道几何形态与水流结构之间的相关性,总结了弯道几何形态对水动力特性的影响规律。

1 数值模型

1.1 控制方程与数值方法

明渠弯道水流的模拟应满足的质量守恒与动量守恒方程分别为:

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

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

式中: x_i 、 x_j 为笛卡尔坐标系坐标($i, j = 1, 2, 3$); 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; p 为压强; ν 为运动黏性系数; $\overline{u_i' u_j'}$ 为雷诺应力脉动项; g_i 为重力加速度在 x_i 方向的分量。

本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型封闭控制方程,并利用体积函数(VOF)法捕捉自由液面。RNG $k-\varepsilon$ 模型和 VOF 法的详细算法实现及理论基础可参考文献[19]。在数值求解过程中,采用 SIMPLE (semi-implicit method for pressure linked equations) 算法实现速度与压力的解耦,其他各项的离散选用 QUICK (quadratic upstream interpolation for convective kinematics) 格式。边界条件设置如下:入口边界分为水相和气相,其中水相设置为速度进口,气相设置为压力进口;出口边界采用压力出口条件,满足静压假定,出口水位与水槽试验实测值保持一致,且压力分布符合静水压强规律;进出口边界处的紊动能与耗散率均按照经验公式的计算结果初始化;壁面设定为固壁边界。

1.2 模型建立与验证

本文以 Shukry^[20]的矩形水槽弯道试验为基础,开展数值模拟研究。该物理模型为 U 形弯道,上下游直段长度均为 1.07 m,弯段内径为 0.15 m,外径为 0.45 m,水槽宽 $B = 0.3$ m,高为 0.5 m,底坡为平坡且高程为 0。为保证进口段水流充分发展,数值计算中将上游直段延长至水槽宽的 12 倍(3.6 m),计算模型高度为 0.45 m,其余参数设置与物理模型保持一致,计算模型平面示意图如图 1 所示。模型验证的工况设置参照水槽试验:进口流量为 $0.072 \text{ m}^3/\text{s}$,流速为 0.8 m/s ,进口水深 $H_0 = 0.3$ m,下游出口处水位 $H_1 = 0.28$ m。

采用六面体网格对计算区域进行剖分,并在近壁区域及自由水面附近进行了局部加密,计算网格如图 2 所示。基于网格无关性分析,最终确定的网格方案包含 296 348 个网格单元。

明渠弯道水流形态复杂,为确保数值模型能够

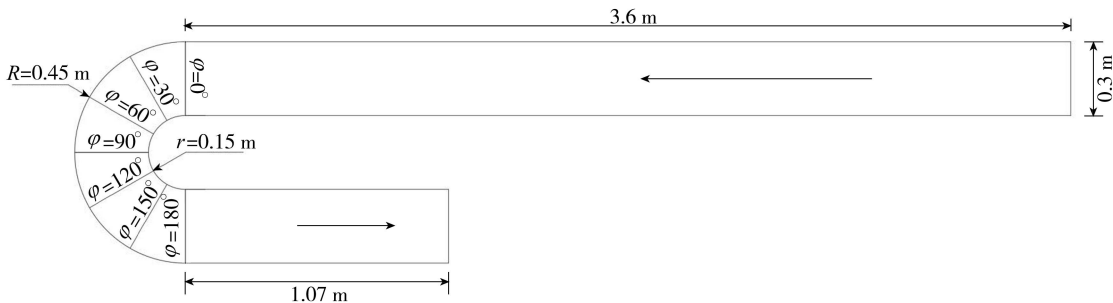


图1 计算模型平面示意图

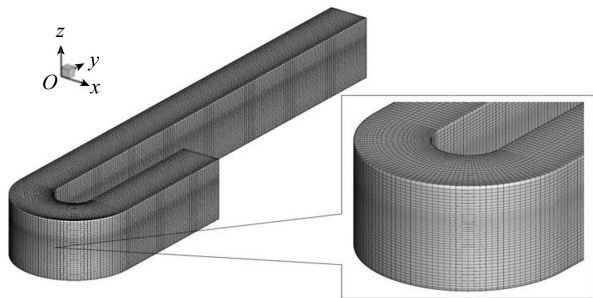


图2 三维网格示意图

准确模拟弯道水力特性,须对数学模型进行验证。本文将数值模拟计算结果与水槽试验实测数据^[20]进行对比,分别从典型断面水位分布、沿水深方向的纵向流速分布以及弯道沿程流速分布3个方面,验证了数值模拟结果的可靠性。图3为入弯断面(中心角 $\varphi=0^\circ$)、弯顶断面($\varphi=90^\circ$)和出弯断面($\varphi=180^\circ$)3个典型断面的水位 H 验证结果。图4为弯顶及出弯断面上纵向流速分布的验证结果,验证位置选取了距凹岸边壁 $0.25B$ 、 $0.50B$ 和 $0.75B$ 处的

3条垂线,其中图4(a)~(c)为弯顶断面,图4(d)~(f)为出弯断面。图5为弯道沿程垂向平均流速等值线。由图3~5可见,数值模拟计算结果与试验测量值吻合较好,准确反映了弯道水流的水动力特征。

2 模拟结果与分析

2.1 数值模拟工况

在明渠弯道水流数值模型验证的基础上,本文选取4组宽深比($H_r=B/H_0=1.0$ 、 1.5 、 2.0 、 2.5)和4组径宽比($R_r=R_c/B=0.75$ 、 1.0 、 1.5 、 2.0 , R_c 为弯道曲率半径)工况,开展了三维数值模拟研究,各工况的计算参数详见表1。计算区域设置与验证模型保持一致:弯道进口直段长 3.60 m,出口直段长 1.07 m,水槽宽 $B=0.3$ m,进口流速 $u_0=0.8$ m/s。在针对不同宽深比的工况中,仅调整进口水深 H_0 和出口水深 H_1 ;在针对不同径宽比的工况中,仅调整弯道曲率半径 R_c 。计算网格划分均采用六面体网

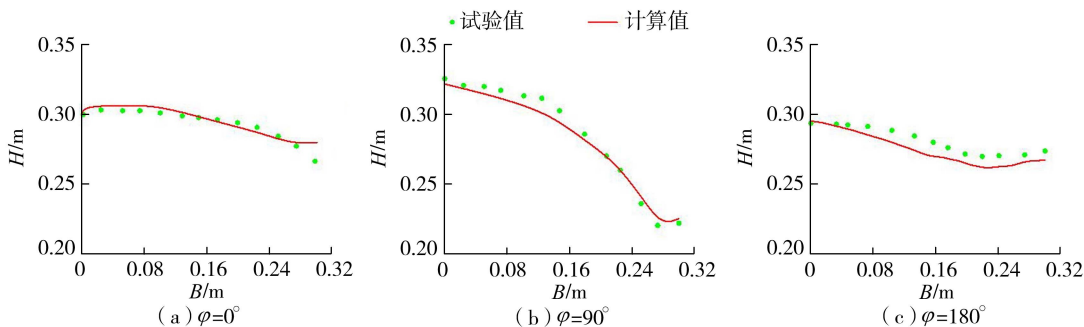


图3 典型断面水位分布

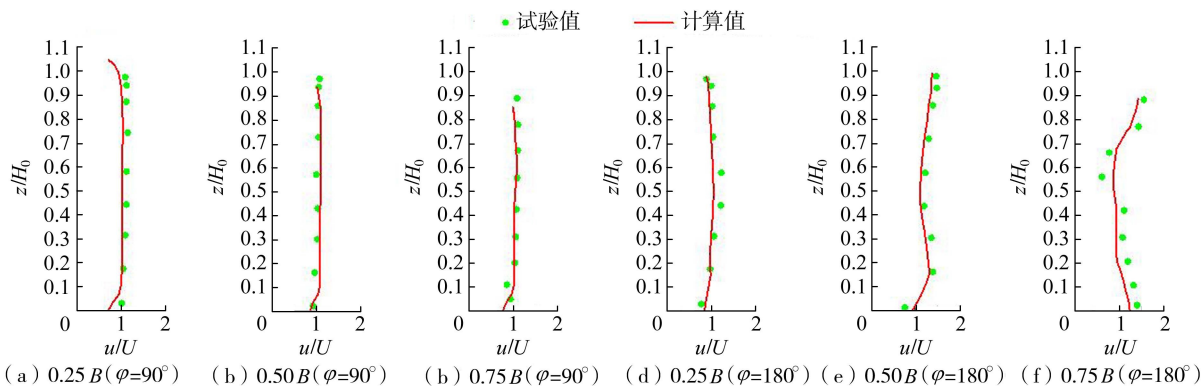


图4 断面纵向流速分布

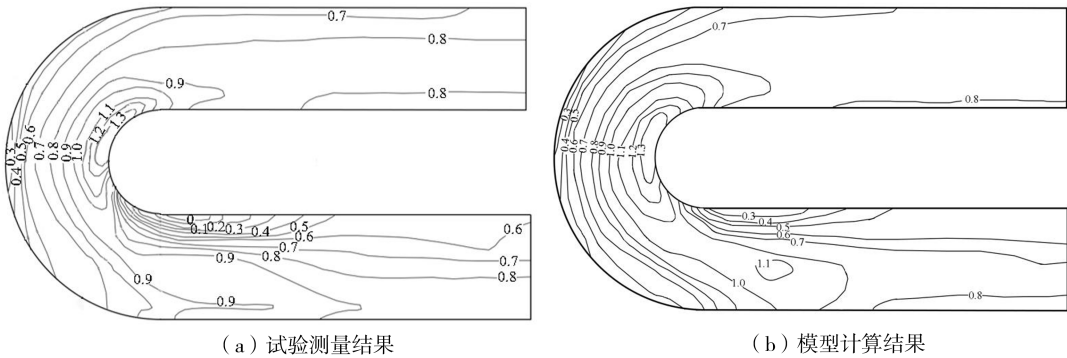


图 5 弯道沿程垂向平均流速分布(单位:m/s)

格,不同工况下的网格数量控制在 25 万~33 万之间。

表 1 不同宽深比和径宽比工况计算参数

工况	H_r	R_r	H_0/m	H_1/m	R_c/m
1	1.0	1.0	0.30	0.28	0.30
2	1.5	1.0	0.20	0.187	0.30
3	2.0	1.0	0.15	0.14	0.30
4	2.5	1.0	0.12	0.112	0.30
5	1.0	0.75	0.30	0.28	0.225
6	1.0	1.5	0.30	0.28	0.45
7	1.0	2.0	0.30	0.28	0.60

2.2 水面形态

水流流经弯道做曲线运动,导致水面形态发生相应改变。不同宽深比工况下弯道水位沿程分布情况如图 6 所示,其中 $Z^* = H/H_0$ 。由图 6 可知,宽深比对中心线和凸岸侧水位分布影响显著,尤以凸岸侧最为突出,而对凹岸侧水位分布的影响则相对有限。在 φ 由 0° 增至 150° 的范围内,随着宽深比的增大,水位下降程度加剧;而当 φ 由 150° 增至 180° 时,不同宽深比工况下的水位下降速率差异较小。当宽

深比由 1.0 增大至 2.5 时,弯道水位纵向下降率从 20% 上升至 40%,同时水面形态的变化也更为剧烈。

图 7 为不同径宽比工况下弯道水位的沿程分布情况。由图 7 可知,径宽比对凹岸侧和中心线水位分布的影响微弱,其主要影响集中在凸岸侧。在 $R_r = 1.5$ 和 $R_r = 2.0$ 工况下,水位沿程变化较小;然而当 R_r 减小至 0.75 时,凸岸侧水位下降率达到 30%。这表明,当 $R_r \geq 1.5$ 时,弯道水面纵比降较小,甚至可忽略不计;随着径宽比的不断减小,水面纵比降逐渐增大。

综合图 3、图 6 及图 7 可知,弯道横断面存在明显的沿凹岸向凸岸的水位下降现象。为深入分析横断面水位分布特征,选取 $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 共 7 个典型断面,结合水位的计算结果,探讨宽深比和径宽比对弯道横比降的影响。图 8 和图 9 分别展示了不同宽深比和径宽比工况下横断面水位分布计算结果。图中, B^* 为相对于弯道宽度 B 的无量纲径向距离, $B^* = 0$ 代表凹岸边壁, $B^* = 1$ 代表凸岸边壁。

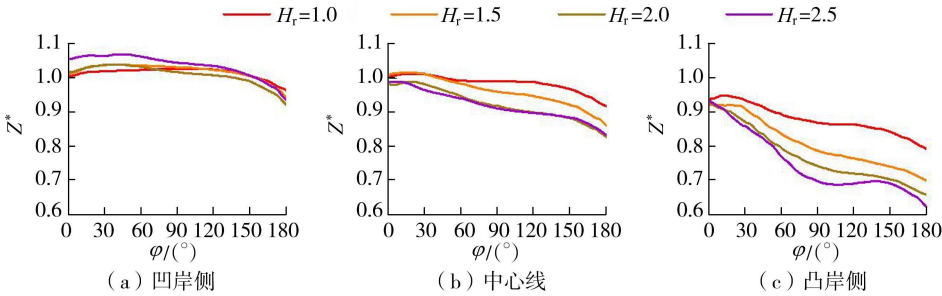


图 6 不同宽深比工况下水位沿程分布

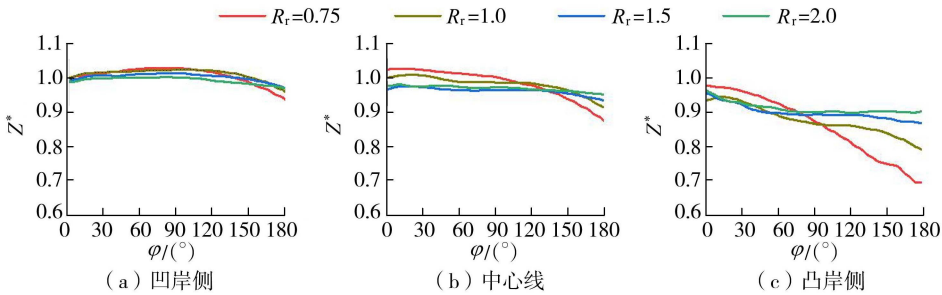


图 7 不同径宽比工况下水位沿程分布

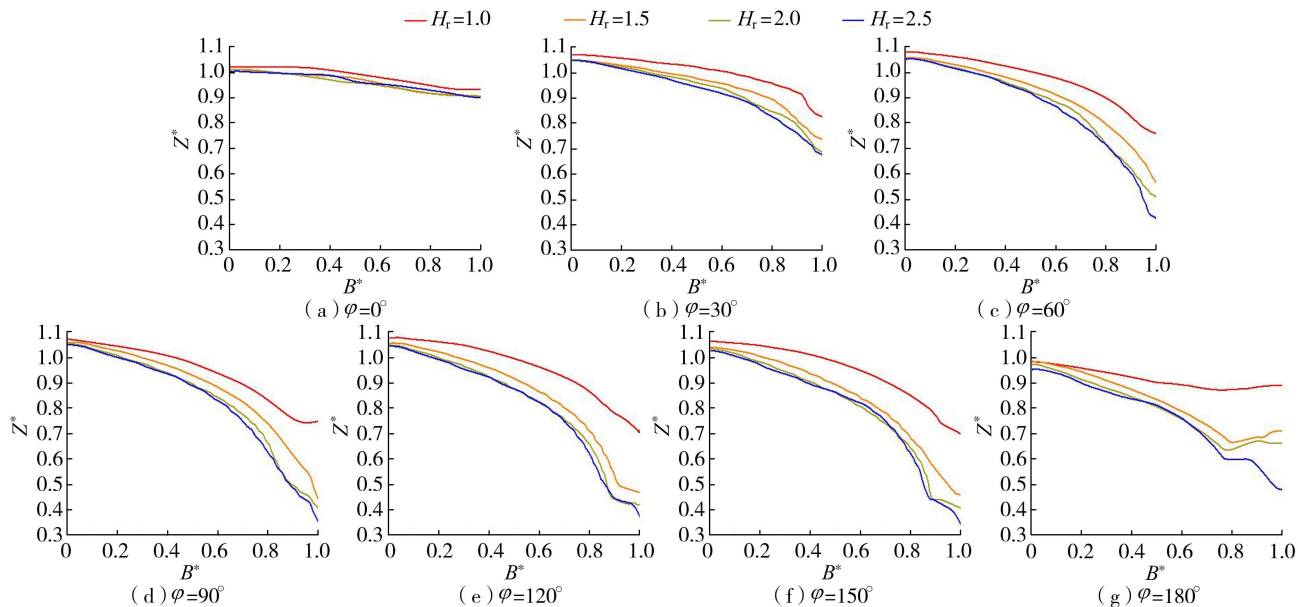


图 8 不同宽深比工况下典型断面水位分布

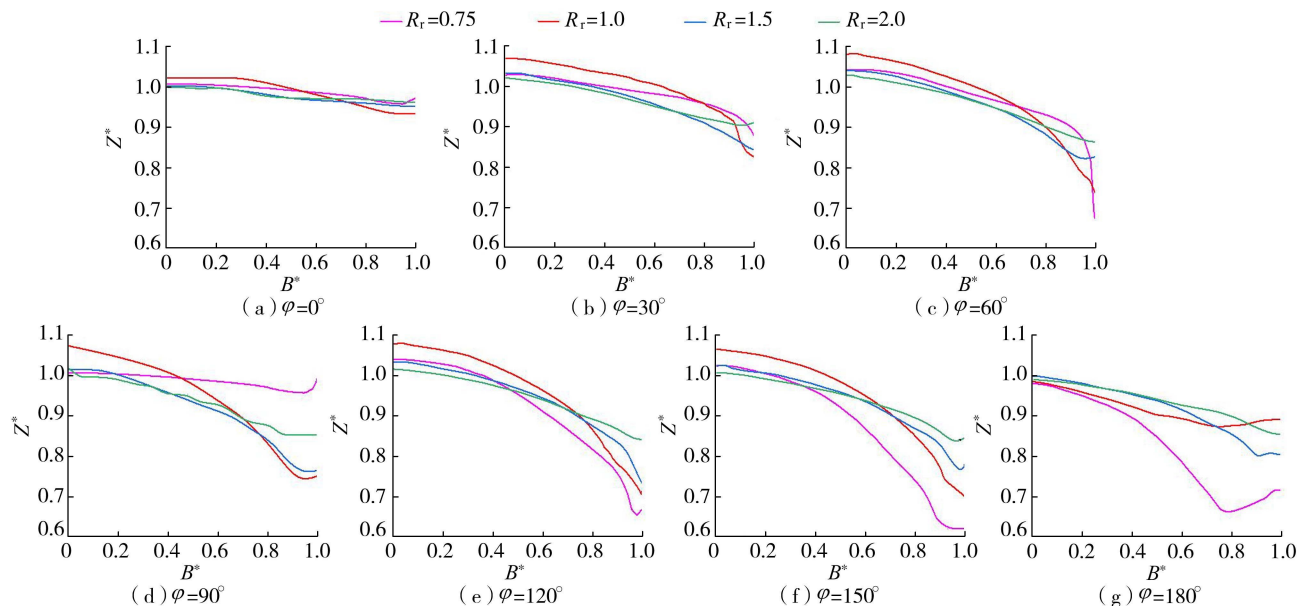


图 9 不同径宽比工况下典型断面水位分布

由图 8 可知,在不同宽深比工况下,弯道凹岸侧的水位差较小,且越靠近凸岸,水位差越大。保持宽深比不变,当 φ 从 0° 增至 90° 时,断面水位降幅增大;当 φ 由 90° 增至 150° 时,水位降幅变化趋缓;当 φ 由 150° 增至 180° 时,水位降幅有所减小。在同一横断面上,水位降幅随着宽深比的增大而增大。对比发现,宽深比由 1.0 增大至 1.5 对水位横向分布的影响,明显大于由 2.0 增大至 2.5 的影响。在 4 组宽深比工况中,断面横比降均在 $\varphi = 150^\circ$ 时达到峰值;当宽深比分别为 1.0 和 2.5 时,凸岸侧水位相较于凹岸侧分别降低了 38.10% 和 68.28%。同一断面上,横比降随宽深比的增大而增大,且不同宽深比工况下断面横比降的沿程变化幅度差异较小。

由图 9 可知,断面横比降随径宽比的减小而增

大。具体而言,当径宽比为 1.5 和 2.0 时,最大横比降出现在 $\varphi = 120^\circ$ 断面;当径宽比为 1.0 时,最大横比降出现在 $\varphi = 150^\circ$ 断面;而当径宽比为 0.75 时,最大横比降出现在 $\varphi = 180^\circ$ 断面。这表明,随着径宽比的减小,最大横比降的出现位置逐渐向弯道出口滞后。此外,随着径宽比的增大,断面横比降的沿程分布趋于更加均匀。

综合分析不同宽深比和径宽比条件下弯道水位的纵向和横向分布可知,宽深比和径宽比对水面形态的影响在凸岸附近最为显著,水面纵比降和横比降均随宽深比的增大或径宽比的减小而增大。水流进入弯段后,水面横比降持续增大,在达到峰值后逐渐减小。本研究模拟的 4 组宽深比工况中,最大横比降均出现在 $\varphi = 150^\circ$ 断面,相较于宽深比,径宽比

对断面横比降沿程变化幅度的影响更为显著,且最大横比降的出现位置随径宽比的减小而向下游后移。

2.3 流速分布

流速重分布现象是弯道水流区别于顺直河道流速分布的特征表现。为深入分析弯段水流沿程纵向流速的分布规律,选取了底层($Z^*=0.3$)、中间层($Z^*=0.5$)和上层($Z^*=0.7$)3个水平切面,对不同径宽比工况下的流速分布进行对比,各工况的纵向流速云图如图 10 所示。由图 10 可知,在 $Z^*=0.3$ 处,最大纵向流速位于弯段进口附近的凸岸侧,随着 Z^* 的增大,最大纵向流速的位置逐渐向凹岸侧及弯段出口方向偏移,且这种偏移现象随着径宽比的减小而愈发显著。当 Z^* 一定时,断面纵向流速最大值随径宽比的减小而增大,同时纵向流速在纵向和横向上的分布也变得愈发不均匀。特别地,当径宽比为 0.75 和 1.0 时,出弯断面凸岸侧出现了纵向流速负值。综上所述,纵向流速重分布表现为:水流入弯后,纵向流速最大值起始于凸岸侧,随即逐渐向凹岸侧转移;最大流速出现位置沿垂向上移趋势;径宽比越大,流速分布越均匀。

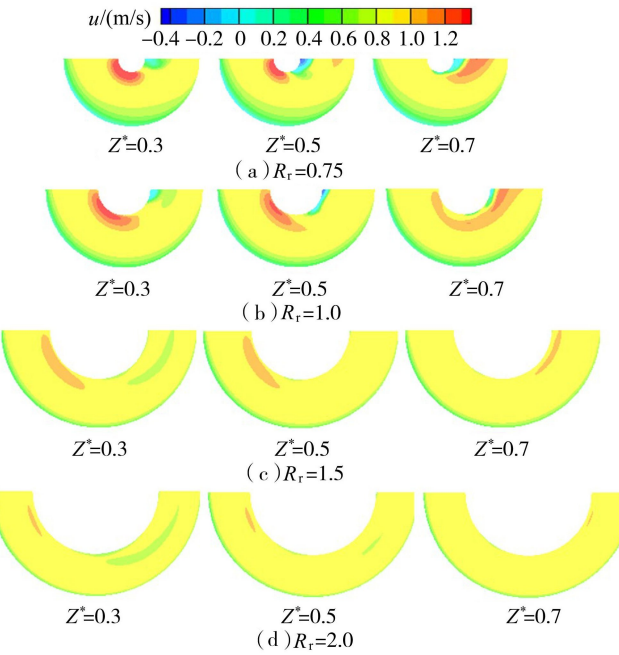


图 10 不同径宽比工况下纵向流速分布

不同径宽比工况下的横向流速分布如图 11 所示,以凹岸指向凸岸方向为正。由图 11 可知,同一工况各水平面横向流速分布存在显著差异,且该差异随径宽比的减小而增大。具体而言,随着 Z^* 增大,横向流速负值区逐渐由弯段下部的近凸岸侧向上游发展,其范围逐渐缩小,横向流速在纵向和横向上的分布趋于均匀。在同一水平面处,不同径宽比工况下的横向流速分布规律近似,但随着径宽比的

增大,流速分布逐渐均匀化,负值区范围减小。在横向上,弯道凹岸侧的横向流速沿程分布较为均匀,越靠近凸岸,横向流速分布的不均匀性越强。此外,随着 Z^* 增大,横向流速极大值点的位置由弯道进口的凸岸侧向弯顶附近的凸岸侧偏移。相较于正值区,各水平面的流速负值区较大,表明横向流速主要指向弯道凹岸,凹岸受冲刷作用显著。综上所述,横向流速的重分布表现为:随着 Z^* 增大,横向流速在纵向和横向上的分布更加均匀,负值区由弯段下部的近凸岸侧向上游迁移;随着径宽比减小,边壁对水流的作用增强,水流受挤压程度加剧,导致横向流速在纵向和横向上的分布差异增大,水流紊动特性增强。

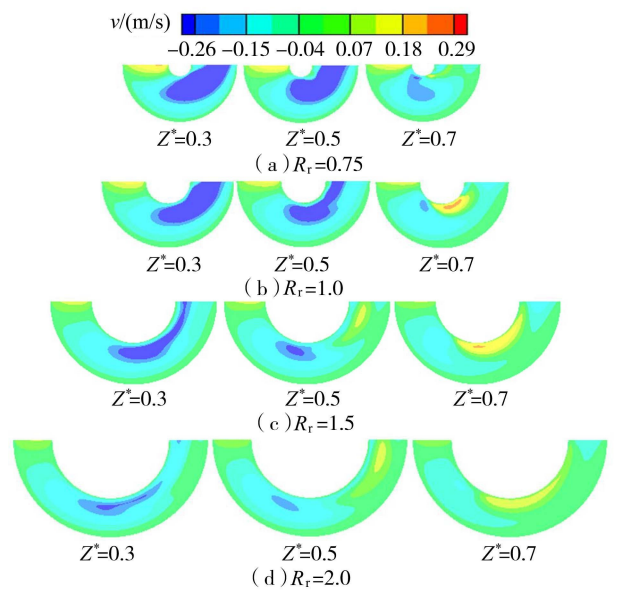


图 11 不同径宽比工况下横向流速分布

2.4 断面环流

在弯道水流研究中,许多学者发现陡峭的边壁条件会促使弯道断面出现主体环流以及与其流向相反的次生环流^[16,21-22]。图 12 展示了不同宽深比工况下的断面环流结构。由图 12 可见,环流在入弯断面($\varphi=0^\circ$)尚未形成,随着水流在弯道内行进,各断面逐渐出现主体环流与次生环流共存的形态。其中,主体环流呈逆时针方向流动,且其中心位置随 φ 的增大而逐渐向凸岸偏移,导致凸岸侧环流强度持续增加,断面整体环流强度也随之变化。次生环流主要位于上层水体,其强度随主体环流的增强而增大,且中心位置由凹岸不断向凸岸迁移。此外,在同一断面位置,宽深比的差异对断面环流强度具有显著影响。

图 13 为不同径宽比工况下的断面环流结构。与不同宽深比的计算结果类似,环流在入弯断面($\varphi=0^\circ$)尚未形成,随着 φ 值的增大,断面内逐渐出现主体环流和次生环流。在同一断面上,随着径宽

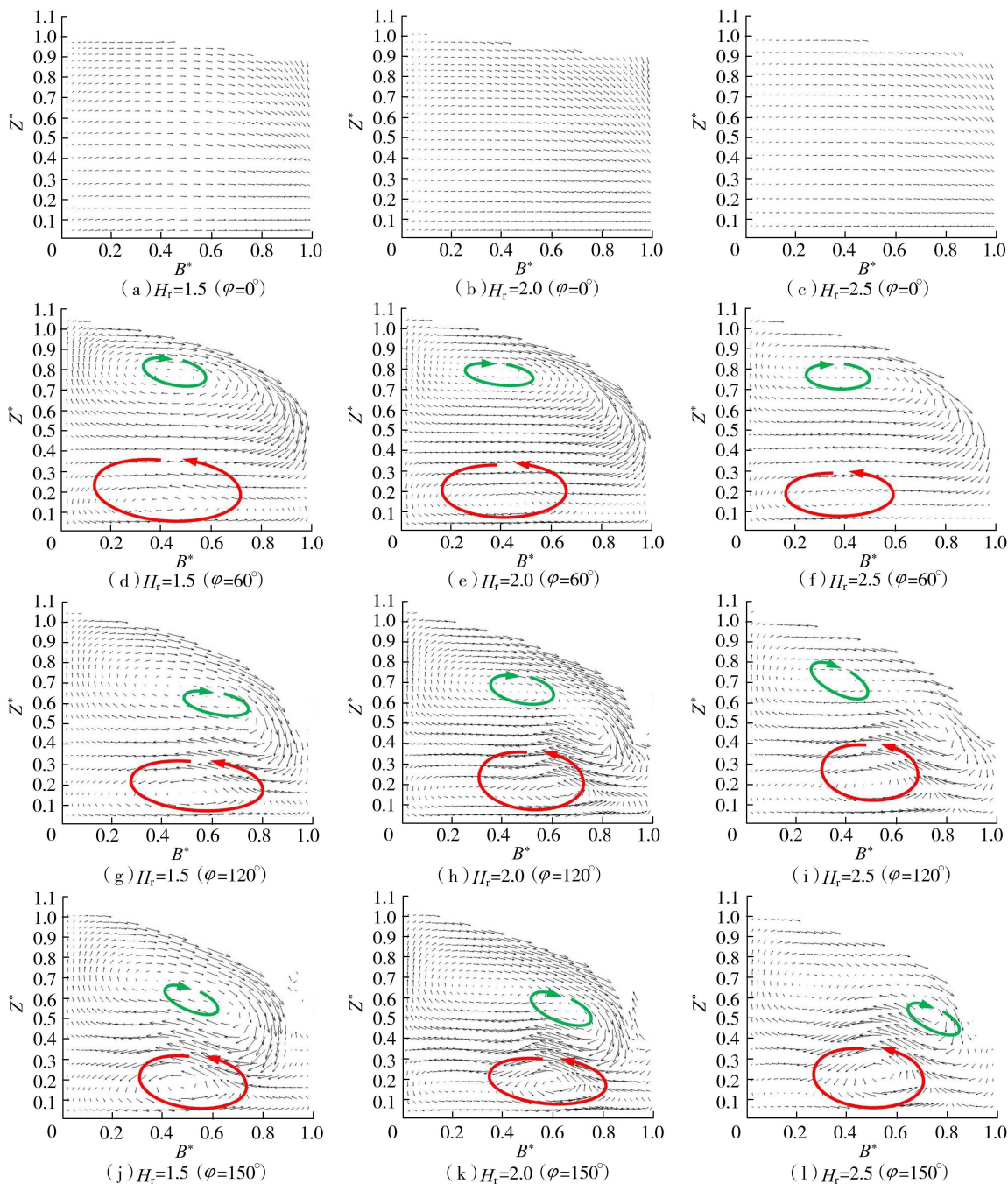


图 12 不同宽深比工况下断面环流结构(红色箭头为主体环流,绿色箭头为次生环流)

比的增大,主体环流和次生环流中心逐渐向凸岸偏移,环流强度也随之改变。总体来看,环流结构随水流发展沿程变化,中心位置持续向凸岸移动,次生环流随着主体环流的变化发生同向变化。对比分析表明,宽深比和径宽比对弯道环流结构的影响趋势一致,即弯道环流中心位置及环流强度均随宽深比和径宽比的变化而显著改变。

图 12 和图 13 不仅揭示了主体环流与次生环流的分布规律,还展示了二者的垂向分层现象:上部水体存在次生环流,下层水体存在主体环流。童思陈等^[23]在弯道水流研究中也观察到了类似的环流分层现象。然而,目前关于弯道断面环流结构的这种

水深分层现象尚缺乏充分的机理解释,其成因可能与来流条件及边壁约束作用有关。

2.5 弯道分离流

弯道分离流是指弯道水流因能量不足以克服阻力,导致水流脱离边壁,形成与主流相反方向的回流,进而在主流和边壁间产生漩涡的现象。弯道分离流的出现受弯道水深、几何形态及壁面特性等因素的影响。对弯道分离流的研究,实质上是探讨确保弯道水流连续、不发生回流的临界条件,对于阐明弯道造床过程和揭示泥沙运动规律具有重要意义。

图 14 和图 15 分别为不同宽深比和径宽比工况下出弯断面($\varphi = 180^\circ$)的流速分布,其中 U 为断面

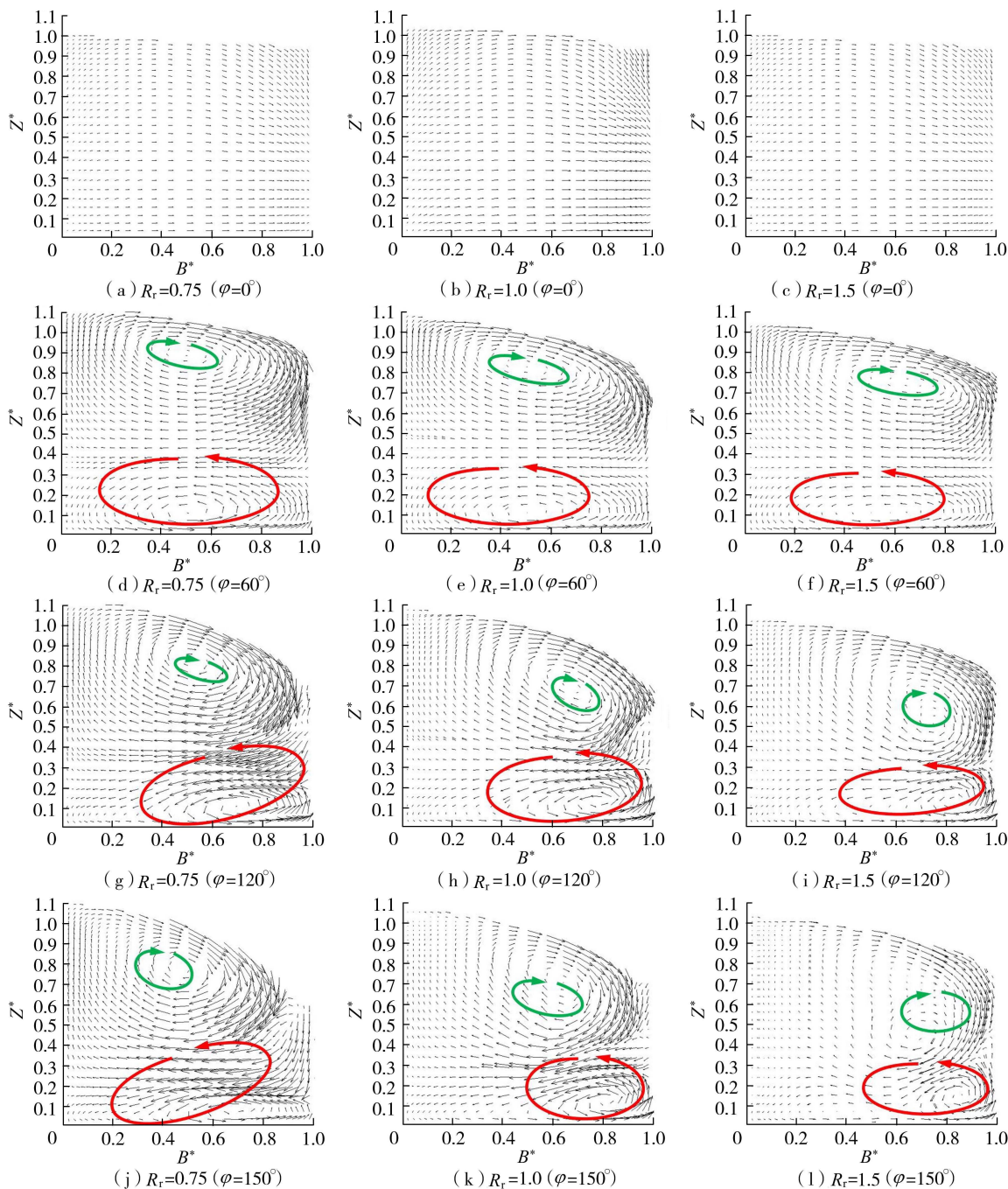


图 13 不同径宽比工况下断面环流结构(红色箭头为主体环流,绿色箭头为次生环流)

平均流速。图 14 表明,随着弯道水深增大(即宽深比减小),当宽深比降至 1.5 时,出弯断面凸岸开始出现分流现象;图 15 表明,随着弯道曲率半径减小(即径宽比减小),当径宽比降至 1.0 时,水流发生分离。当宽深比和径宽比进一步减小,面流与底流的运动差异显著增大,水流分离的可能性也随之增加。

本文数值模拟计算结果表明,弯道分离流易发生于出弯断面的凸岸附近。分离流的产生受宽深比和径宽比的影响显著,随着宽深比或径宽比的减小,分离流发生的可能性增大。针对本文涉及的 U 形 180°小宽深比和小径宽比明渠弯道,产生分离流的

临界条件为 $H_r=1.5$ 、 $R_r=1.0$ 。马森等^[24]针对宽深比为 1.0 的 90°明渠弯道的研究发现,当径宽比为 1.0 时出现水流分离,这与本文计算结果一致。该对比表明,在小宽深比条件下,无论是 90°还是 180°弯道,径宽比等于 1.0 均为水流分离发生的临界值。

分离区的界定通常采用流线法或等值线法。流线法将回流结构的最外侧流线定义为分离区边界,取其在边壁的投影作为分离区长度,与边壁的最大距离作为分离区宽度。显然,流线法虽适用于二维平面,但在界定三维分离区时存在局限,需通过对垂向多层水平截面进行连续拟合才能较为准确地确定分离区边界。相比之下,等值线法将纵向流速为 0

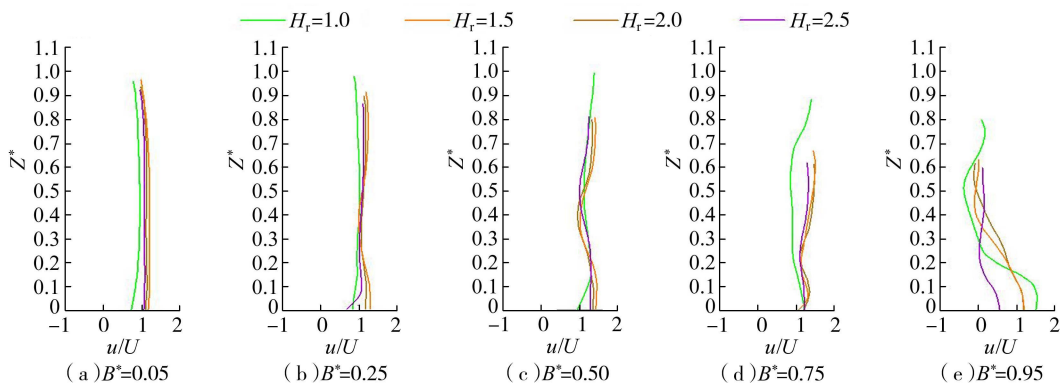


图 14 不同宽深比工况下出弯断面 ($\varphi = 180^\circ$) 流速分布

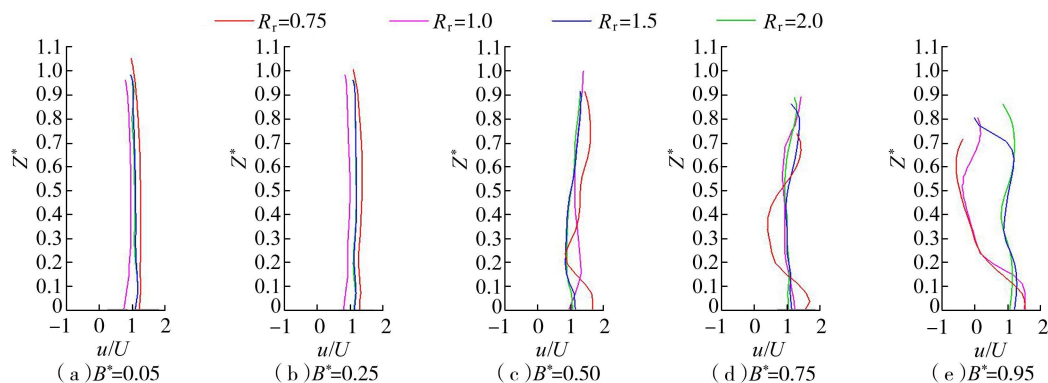


图 15 不同径宽比工况下出弯断面 ($\varphi = 180^\circ$) 流速分布

的等值线定义为分离区边界。由于在实际应用中获取流速等值面图比多层截面拟合更易实现,该方法被广泛用于三维分离区的界定^[25]。因此,本文采用等值线法定义分离区。图 16 为工况 1 ($H_r = R_r = 1.0$) 下由纵向流速 $u = 0$ 等值面确定的分离区边界三维示意图。结果显示,弯道分离区始于靠近出弯断面的弯段凸岸边壁,出弯后沿直段凸岸侧顺流向发展,并在延伸一段距离后逐渐消失。在垂向上,分离区由中部水体分别向上下层扩展;从几何尺寸来看,分离区的水平范围由下层向上层逐渐增大。

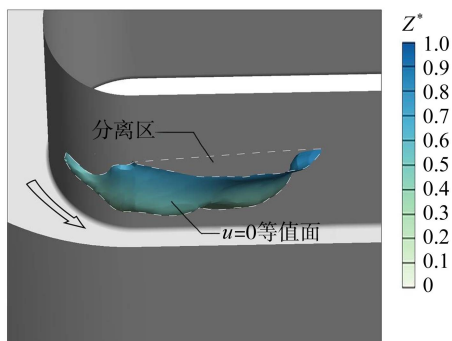


图 16 工况 1 条件下分离区三维示意图

3 结 论

a. 受离心力作用,弯道水面产生纵比降,沿程呈下降趋势,尤其在凸岸侧更为显著。同时,水面由凹岸向凸岸倾斜形成横比降。在横断面上,凸岸侧

的水位下降速率较快,宽深比和径宽比对水面形态的影响也在此处最为显著。水面纵比降和水面横比降均随宽深比的增大或径宽比的减小而增大。水面横比降沿程呈现先增大后减小的变化趋势,且最大横比降出现位置随径宽比的减小而向下游后移。

b. 弯道水流流速呈现典型的重分布特征,最大流速位置由上部凸岸侧向下部凹岸侧偏移,且偏移速度随径宽比的减小而加快。径宽比的减小加剧了流速分布的不均匀性,增强了水流的紊动特性。

c. 弯道环流中心位置沿程逐渐向凸岸移动,次生环流随主体环流的变化呈现同向变化趋势。增大宽深比或径宽比对弯道环流结构的影响趋势一致。断面环流强度随宽深比或径宽比的增大而减小,且环流强度峰值的出现位置随宽深比的增大而滞后。

d. 弯道分离流易发生于出弯断面附近的凸岸侧。随着水深增加及水流挤压程度加剧,水流分离的概率随之增大。换言之,宽深比和径宽比的减小均会提高水流发生分离的可能性。基于数值模拟计算结果,针对小宽深比和小径宽比的 U 形弯道,确定分离流的临界条件是宽深比为 1.5、径宽比为 1.0。

参考文献:

[1] 李民康,冀鸿兰,罗红春,等. 流凌条件下弯道水力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(3): 41-49.
(Li Minkang, Ji Honglan, Luo Hongchun, et al. Numerical

- simulation of hydraulic characteristics of curved channels under ice flow conditions[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(3): 41-49. (in Chinese)
- [2] 罗索夫斯基 И Л,尹学良. 弯道水流的研究[J]. *泥沙研究*, 1958(1): 85-97.
- [3] 卡拉乌舍夫. 河流与水库水力学[M]. 程昌国,译. 北京:水利电力出版社,1958.
- [4] 张红武,吕昕. 弯道水力学[M]. 北京:水利电力出版社,1993.
- [5] Bridge J S, Jarvis J. Flow and sedimentary processes in the meandering river South Esk, Glen Clova, Scotland[J]. *Earth Surface Processes*, 1976, 1(4): 303-336.
- [6] De Vriend H J. Steady flow in shallow channel bends[D]. Delft: Delft University of Technology, 1981.
- [7] 波达波夫. 波达波夫选集[M]. 北京:水利电力出版社, 1958.
- [8] Kalkwijk J P T, Booij R. Adaptation of secondary flow in nearly-horizontal flow[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1986, 24(1): 19-37.
- [9] 孙东坡. 弯道横向流动与输沙的探讨[J]. *华北水利水电学院学报*, 1992(3): 60-68. (Sun Dongpo. Study of circulating velocity profile and lateral silt discharge in curved channels[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 1992(3): 60-68. (in Chinese))
- [10] 张耀先,丁新求,孙东坡. 弯道水流横向流动与输沙研究[J]. *水利建设与管理*, 2003(4): 76-78. (Zhang Yaoxian, Ding Xinqiu, Sun Dongpo. Study on lateral flow and sediment transport in curved channels[J]. *Water Conservancy Construction and Management*, 2003(4): 76-78. (in Chinese))
- [11] Leeder M R, Bridges P H. Flow separation in meander bends[J]. *Nature*, 1975, 253(5490): 338-339.
- [12] 刘焕芳. 弯道水流的分离[J]. *武汉水利电力学院学报*, 1989, 22(6): 50-55. (Liu Huanfang. Flow separation in curved channels[J]. *Journal of Wuhan University of Hydraulic & Electric Engineering*, 1989, 22(6): 50-55. (in Chinese))
- [13] Blanckaert K. Saturation of curvature-induced secondary flow, energy losses, and turbulence in sharp open-channel bends: laboratory experiments, analysis, and modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2009, 114(F3): F03015.
- [14] Blanckaert K. Hydrodynamic processes in sharp meander bends and their morphological implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2011, 116(F1): F01003.
- [15] Van Balen W, Blanckaert K, Uijtewaal W S J. Analysis of the role of turbulence in curved open-channel flow at different water depths by means of experiments, LES and RANS[J]. *Journal of Turbulence*, 2010, 11: N12.
- [16] Wang Xiekang, Liu Xingnian. Experimental investigation of flow structures and bed deformation with small width-to-depth ratio in a bend flume[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2016, 20(1): 497-508.
- [17] Moncho-Esteve I J, García-Villalba M, Muto Y, et al. A numerical study of the complex flow structure in a compound meandering channel[J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 116: 95-116.
- [18] Yan Xiaohui, Rennie C D, Mohammadian A. A three-dimensional numerical study of flow characteristics in strongly curved channel bends with different side slopes[J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 2020, 20(6): 1491-1510.
- [19] 曾诚,尹雨然,陈辰,等. 明渠弯道交汇口水动力特性数值模拟[J]. *水利水电科技进展*, 2023, 43(2): 9-15. (Zeng Cheng, Yin Yuran, Chen Chen, et al. Numerical simulation of hydrodynamics of open-channel confluences with bend flow[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2023, 43(2): 9-15. (in Chinese))
- [20] Shukry A. Flow around bends in an open flume[J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1950, 115(1): 751-778.
- [21] Bathurst J C, Hey R D, Thorne C R. Secondary flow and shear stress at river bends[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1979, 105(10): 1277-1295.
- [22] 王平义. 弯曲河道动力学[M]. 成都:成都科技大学出版社,1995.
- [23] 童思陈,钟亮,许光祥. 弯道水流环流结构的试验研究[J]. *水运工程*, 2009(10): 32-35. (Tong Sichen, Zhong Liang, Xu Guangxiang. Experimental study on the circulation configuration in curved conduit[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2009(10): 32-35. (in Chinese))
- [24] 马淼,李国栋,张巧玲,等. 弯道弯曲度对水流结构的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2016, 24(6): 1193-1202. (Ma Miao, Li Guodong, Zhang Qiaoling, et al. Effects of curve bending on the flow structure[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, 24(6): 1193-1202. (in Chinese))
- [25] 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))

(收稿日期:2025-03-07 编辑:俞云利)