

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.04.012

凹岸边坡型式对急弯河道水力特性影响的数值模拟

李倩¹, 马黎², 余明辉¹, 吴迪², 龚兰强²

(1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 为研究弯道凹岸边坡型式变化对近岸水力特性的影响, 以荆江石首急弯河段为研究背景建立三维水动力数学模型, 模拟凹岸不同边坡型式下的弯道水流结构。研究表明: 相同过水断面面积和水深情况下, 凹岸坡度越缓, 最大纵向流速越远离凹岸且接近水面, 主环流尺度越小, 凹岸成对出现的反向次环流位置越接近水面, 凹岸深槽水流紊动越弱。对比综合坡度相同的单一岸坡, 凹岸复式岸坡情况下, 最大纵向流速变化不大, 主环流尺度增大, 次环流成对模式被改变; 出口直段凹岸侧最大剪切力增大为单一岸坡的1.2倍; 凹岸侧弯顶上游紊动减弱, 弯顶下游紊动加剧。研究成果丰富了弯道岸坡型式对弯道水流结构影响的认识, 为不同型式岸坡防护研究提供基础依据。

关键词: 水力特性; 边坡型式; 凹岸; 环流; 剪切力

中图分类号: TV147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)04-0599-11

弯曲型河道是最常见的河型之一, 弯道水流受重力及离心力共同作用, 其自身结构沿横向及纵向重新分配, 使得水流特性变得复杂^[1-2]。分析弯道水流结构, 揭示弯道几何形态与水流结构之间的关系, 是研究天然弯曲河段演变特性的基础; 研究岸坡型式对弯道水流结构影响, 对河道整治、工程建设和改善航运条件都具有重要意义。

在以往研究中, 国内外学者针对弯道几何形态对弯道水流结构的影响进行了大量的研究, 得出了许多理论及经验成果。先前的研究主要关注弯道中心角、径宽比、宽深比对弯道水流结构的影响。van Balen等^[3]、Blanckaert^[4]、Vaghefi等^[5]和陈启刚等^[6]采用物理模型的方法研究了不同宽深比、弯曲半径与河宽比和弯道曲率对弯道水流结构和紊动特性的影响; 马森等^[2]采用数值模拟法对7种弯道弯曲度的水流结构分析, 发现弯道弯曲度越大, 主流越集中; 王永强等^[7]对三峡库区黄花城河段进行原型测量, 分析了弯道环流和湍流结构尺度分布特性; Zeng等^[8]对宽深比为9.2的急弯弯道进行了数值模拟, 分析了曲率对纵向流速及环流的影响; Kimiaghali等^[9]根据水动力数学模型, 通过河流水位确定河岸施加的剪切力; 侯慧敏等^[10]通过湍流数值模拟发现梯形弯道与其他弯道流场普遍规律保持一致; 刘胜琪等^[11]通过数值模拟研究发现了荆江急弯段河床形态调整对弯道段流速分布和二次流结构强度的影响。以往研究表明, 河岸边坡坡度对环流模式和边界剪切力分布有重要影响, 并且环流对河道形状十分敏感。Tominaga等^[12]、Blanckaert等^[13]均研究了不同边坡坡度下顺直河道的水力特性, 发现环流模式由边坡坡度决定以及边坡坡度越缓最大剪切力越靠近坡脚。目前边坡型式变化对河道水力特性影响的研究主要集中在顺直河道且仅关注岸坡坡度变化对河道水力特性的影响, 因此, 全面考虑不同岸坡边界条件(岸坡坡度及复式岸坡)对弯道水流结构的影响至关重要。

弯道水流具有强三维特性, 因此, 许多学者通过建立三维水动力数学模型的方式研究弯道水流结构, 并

收稿日期: 2023-03-25; 网络出版日期: 2023-07-11

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/32.1309.P.20230710.1730.007.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11972265; 12372385)

作者简介: 李倩(1995—), 女, 河南南阳人, 博士研究生, 主要从事河流泥沙动力学方面研究。

E-mail: liqianwhu@whu.edu.cn

通信作者: 余明辉, E-mail: mhyu@whu.edu.cn

且得到了很好的结果。湍流数值模拟主要包括直接数值模拟(DNS)、雷诺平均法(RANS)和大涡模拟(LES)等3种^[14]。在计算的过程中,由于方程的非线性性质,解析求解瞬时 Navier-Stokes 方程的难度较大,实际应用中更关注流场中各参数的时间平均,因此本文采用 RANS 模型。常用的 RANS 模型包括标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和雷诺应力模型(RSM 模型)。相较于其他的 RANS 模型,RSM 模型考虑了紊流黏度的各向异性,对弯道中复杂的三维紊流特性和二次流结构模拟效果更好,精度更高。本文选取 RSM 模型进行弯道三维数值模拟。

本文以荆江石首急弯河段为研究背景,建立概化模型的三维水动力数学模型,研究弯道凹岸多种边坡型式下急弯展宽河段的水力特性,进一步探讨弯道凹岸边坡型式变化对弯道不同区域侵蚀破坏的影响。研究成果以期丰富弯道岸坡型式对弯道水流结构影响的认识,为不同型式岸坡防护研究提供基础依据。

1 研究方法

1.1 模型设计

长江中游石首河段由顺直过渡段和急弯段组成,自上而下河道逐渐变宽,凸岸弯曲角约为 120° ^[15-16](图1)。概化模型参考石首河段的平面形态,按 1:800 的水平比尺塑造河道,垂直比尺为 1:200,设计弯曲角度为 120° ,凹岸边坡坡比为 1:0.5。弯道上游顺直段长约 4 m,从顺直段到弯道,凸岸河道逐渐展宽,出弯后河道逐渐束窄至进口宽度,下游顺直段长约 3 m,弯道凸岸边滩坡度较缓,约为 1:3,弯道及断面尺寸布置如图 2 所示。

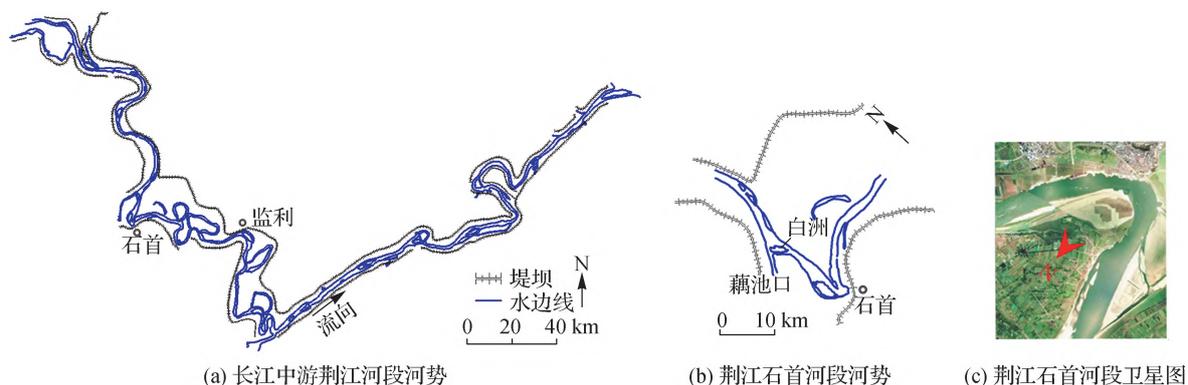


图1 长江中游石首河段

Fig.1 Shishou reach in the middle reaches of the Yangtze River

1.2 模拟工况

模拟工况以 2021 年地形条件下石首河段平滩流量 $Q = 22\ 000\ \text{L/s}$ 、水位 33 m(黄海高程)为背景,在此流量和水位条件下石首河段典型断面弗劳德数(Fr)在 0.09~0.1 左右。概化模型的凹岸边坡坡度为 63.4° ,岸坡型式定义为陡坡。设置模型进口流量为 50 L/s,出口控制断面水深为 0.25 m, Fr 在 0.098 左右。因此,概化模型和背景河段基本满足 Fr 相似。在概化模型(陡坡)的基础上变换凹岸边坡型式,将模型分为缓坡、直坡和复式岸坡,凹岸边坡坡度分别为 63.4° 、 90° 和 26.6° ,其中陡坡与复式岸坡凹岸边坡坡度相同均为 63.4° ,复式岸坡平台宽 0.1 m,凹岸边坡底部宽 0.4 m、高 0.6 m。通过改变概化模型河道底宽,保证 4 种工况(表1)弯道断面过水面积 $A = 0.323\ \text{m}^2$ 、平均流速 $U = 0.154\ \text{m/s}$ 不变,弯道模型、断面布置及详细尺寸如图 2 所示。

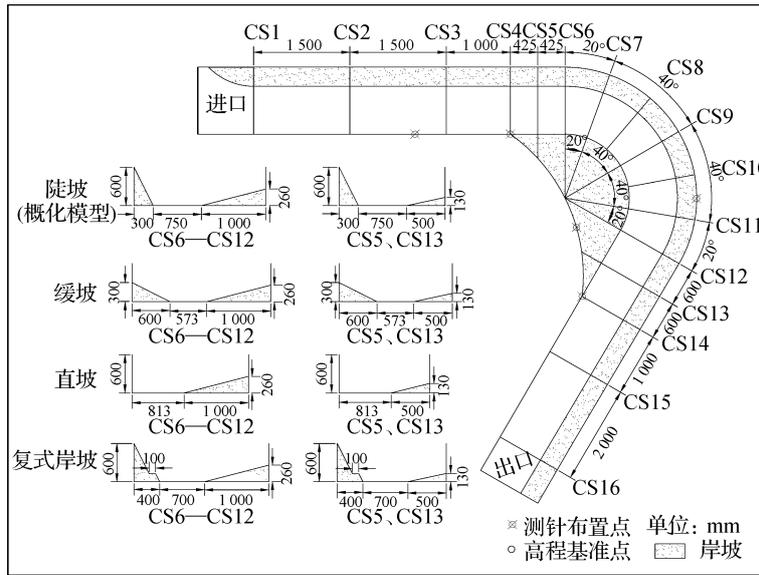


图2 模型断面布置

Fig.2 Location of cross sections

表1 计算工况物理参数

Table 1 Physical parameters of working conditions

工况	河道	岸坡	岸坡型式	凹岸坡比	凹岸坡度/(°)
1			直坡	-	90
2	梯形河道	单一岸坡	陡坡	1:0.5	63.4
3			缓坡	1:2.0	26.6
4	复式河道	复式岸坡	复式岸坡	1:0.5	63.4

1.3 控制方程

RSM 模型连续性方程、动量守恒方程和紊流模型如下:

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(U_k \rho \overline{u'_i u'_j}) = P_{ij} + D_{ij} + \pi_{ij} - \varepsilon_{ij} \tag{3}$$

式中: u_i 、 u_j 为雷诺平均速度分量; x_i 、 x_j 为坐标分量; ρ 为水的密度; t 为时间; p 为压强; μ 为水的分子黏性系数; $\overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力分量; U_k 为对流项; P_{ij} 为生成项; D_{ij} 为扩散项; π_{ij} 为压力应变相关项; ε_{ij} 为耗散项。

1.4 网格划分及计算方法

网格划分对于计算的收敛性和可靠性非常重要。本文使用计算流体动力学(CFD)主流软件 ANSYS 前处理模块 ICEM 对模型进行网格划分, 网格为六面体结构化网格。第一层网格到壁面的量纲一距离为 $y^+ = Re(u^*/U)(\Delta y/H)$ (u^* 为近壁面摩阻流速; Re 为雷诺数; U 为断面平均流速; H 为断面水深; Δy 为网格间距)。壁面处第一层网格需布置在黏性底层和过渡段之外, 因此保证 $20 < y^+ < 100$ 。各单一岸坡凹岸边坡型式模型网格数相同, 生成的网格总数为 2 761 268, 其中横断面网格数为 105×41 , 而复式岸坡生成的网格较少, 总数为 2 450 220。以复式岸坡为例, 壁面网格如图 3 所示。

本计算采用 Pressure-Based(基于压力法)求解器, 利用有限体积法离散控制方程, 使用 PISO 算法进行压力-速度耦合, 动量、紊动能和紊动能耗散率的空间离散使用二阶迎风格式, 计算残差设定为 1×10^{-6} 。模型边界条件采用质量入口(50 L/s)、压力出口的条件, 设置压强为大气压强, 水槽的上边界设置为压力入口, 采用流体体积法捕捉上表面, 模型边壁粗糙度高度为 0.7 mm。

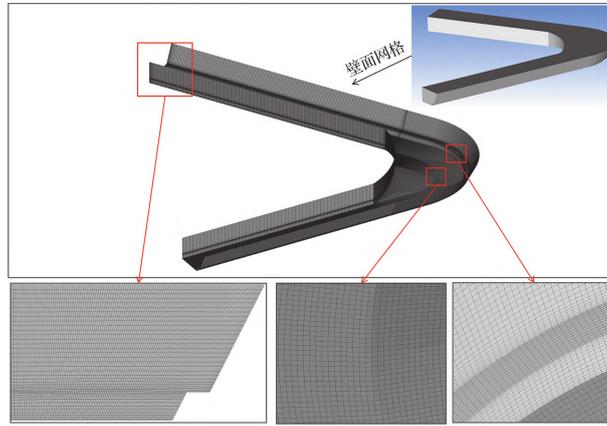
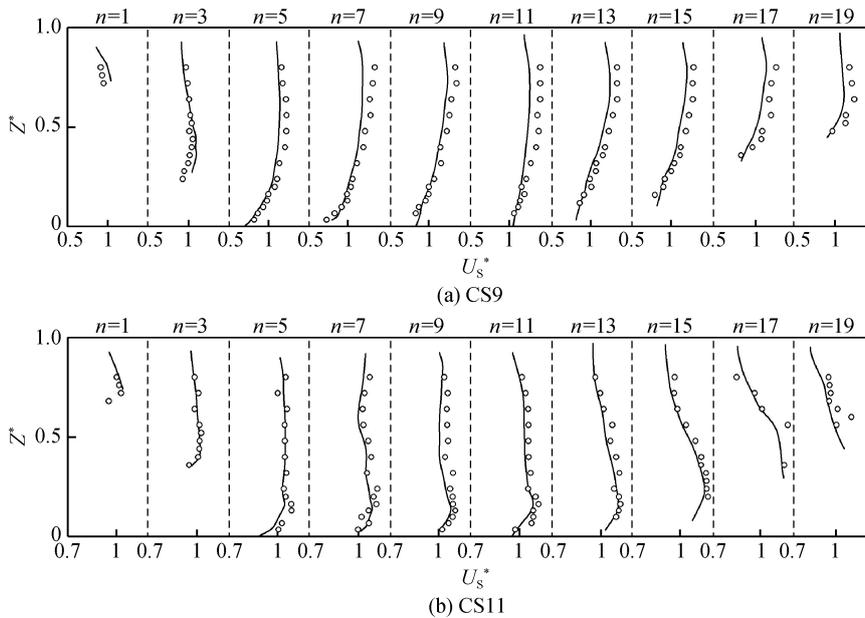


图3 复式岸坡河道网格
Fig.3 Compound bank slope channel grid

1.5 模型验证

选取石首概化模型中的陡坡(进口流量为 50 L/s, 出口水深为 0.25 m)进行模型的验证, 图 4 为弯道水槽中沿程断面 CS9、CS11 量纲一纵向流速的计算值与实测值对比图($U_s^* = U_s/U$, $Z^* = Z/H$, 式中 U_s 为测点流速, Z 为测点水深), 由图 3 可知大部分区域计算值与实测值吻合良好, 经过计算, CS9 和 CS11 平均相对误差分别为 7.4% 和 3.0%, 均小于 10%。少部分区域由于靠近边壁, 水流结构复杂, 计算值与实测值稍有差别。



n 为垂线编号, “—”代表数值模拟结果, “○”代表实测值

图4 量纲一纵向流速计算值及实测值对比

Fig.4 Comparison between modelled and experimental data of normalised longitudinal velocity

2 凹岸边坡型式对急弯展宽河道水流结构的影响

2.1 纵向流速和次生流

纵向流速分布是影响弯道河岸稳定的重要因素。弯道环流是引起泥沙横向搬运的主要动力, 是促使弯道凹岸冲刷和凸岸淤积变形的主要原因^[17]。图 5 和图 6 显示了 4 种凹岸边坡型式下, 弯顶及上下游断面量纲一纵向流速和环流的发展过程。由于河道展宽, 从 CS5 断面开始最大纵向流速逐渐向凸岸偏移。在 CS5 和 CS7 断面, 水流受到凸岸展宽和离心力的双重作用, 凸岸展宽迫使水流向凸岸运动, 而离心力迫使水面附近水流向凹岸运动, 前者作用强于后者, 因此断面内未出现明显的主环流, 而 CS7 断面凹岸附近出现次环流, 环流强度较弱。弯道自 CS9 弯顶断面开始出现明显的上部指向凹岸, 下部指向凸岸的横向主环流, 且在 CS9 弯顶断面环流尺度最大, 大部分河道凹岸自 CS9 弯顶断面开始出现成对反向次环流。根据 Blanckaert^[18] 的研究, 这种形成于凹岸的小尺寸环流, 不仅受离心力作用的影响, 也受湍流动能的影响。这种环流的形成, 有利于近岸水流湍动能的耗散, 能有效降低岸坡侵蚀速率。水流进入顺直段 CS13 断面后, 在凸岸和离心力双重约束下, 最大纵向流速偏移至凹岸, 并且一直沿着凹岸流动。

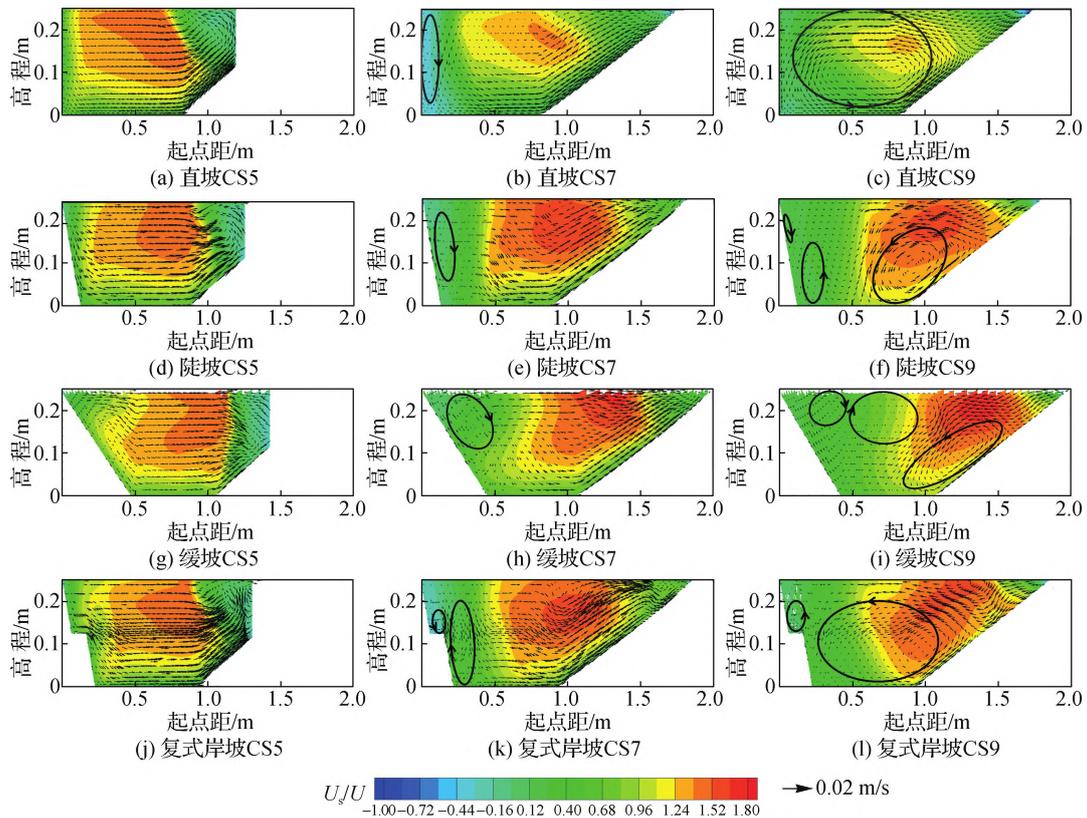


图 5 弯顶及弯顶上游断面量纲一纵向流速等值线图与断面横向流速矢量图

Fig. 5 Cross sectional velocity vectors and normalised longitudinal velocity contours before apex of bend

在单一岸坡条件下, 凹岸边坡坡度越缓, 最大纵向流速沿河宽方向上越远离凹岸, 垂向上越接近水面。凹岸边坡坡度越缓, CS5、CS7、CS9 和 CS11 断面的量纲一最大纵向流速均越大, 其中弯顶 CS9 断面缓坡量纲一最大纵向流速是直坡的 1.2 倍。凹岸边坡坡度不同, 主环流尺度及次环流模式也不同。凹岸边坡坡度越缓, 主环流尺度越小。在直坡条件下, 近岸次环流模式为一上一下的反向环流, 凹岸坡度越缓, 位于底部的次环流越接近水面, 并在缓坡上潜至水面附近。

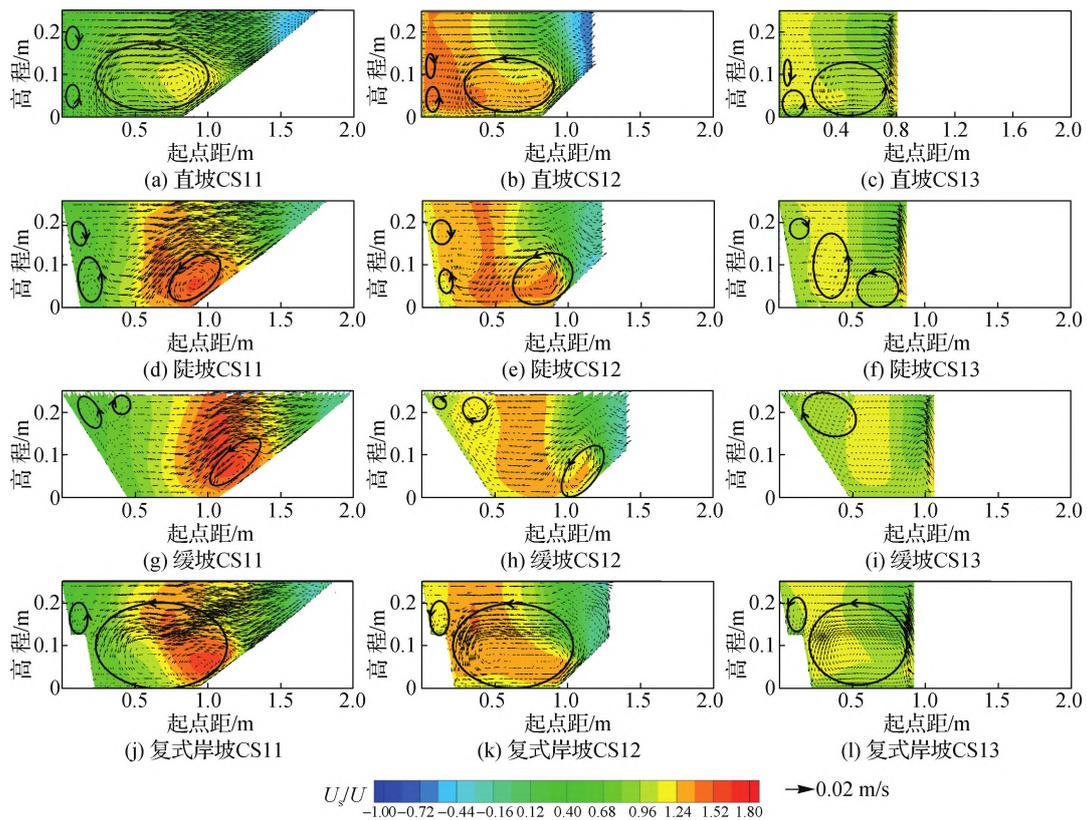


图6 弯顶下游断面量纲一纵向流速等值线图与断面横向流速矢量图

Fig. 6 Cross sectional velocity vectors and normalised longitudinal velocity contours after apex of bend

陡坡的凹岸边坡坡度与复式岸坡一致，因此，以陡坡为单一岸坡的代表与复式岸坡进行对比。相较于单一岸坡(陡坡)，复式岸坡最大纵向流速位置变化不大，最大纵向流速区面积在CS5和CS11断面略有增加，主环流尺度增加。复式岸坡次环流模式较单一岸坡(陡坡)也发生了改变。在单一岸坡(陡坡)条件下，自弯顶CS9断面开始凹岸附近成对出现反向次环流，而复式岸坡的次环流模式为阶地上的单环流，不利于坡脚稳定。从环流角度，相较于单一岸坡(陡坡)，复式凹岸岸坡受环流保护变少，因此更易被冲刷破坏。

2.2 壁面剪切力

壁面剪切力是研究泥沙起动、输移等问题的重要参数^[19]，剪切力分析对河床侵蚀和河岸保护研究具有重要意义^[20]。剪切力的不均匀分布会导致河道局部破坏和床面侵蚀^[21]，因此，将剪切力大小作为衡量河道在水流冲刷作用下稳定的影响因素。图7为不同断面的壁面剪切力及沿程平均壁面剪切力大小。根据河岸和河床地形，将断面分为3个区域，分别为凹岸坡面、床面和凸岸边滩，对不同岸坡型式下的坡面、床面和边滩的长度做量纲一化处理。从弯道入口到弯道出口直段，不同工况下平均壁面切应力先上升再下降，在出口直段CS14断面平均剪切力达到最大值，由于弯道水流过流面积相同，各工况下弯道沿程平均壁面剪切力相差不大(图7)。

图8为不同工况下壁面剪切力投影图。进入弯道后，最大壁面剪切力分布整体与最大纵向流速一致。在弯道进口CS5断面，最大壁面剪切力主要分布在凸岸边滩；弯顶CS9断面凸岸边滩出现弯道中第1个局部高剪切力区；随着最大纵向流速向凹岸偏移的过程，第2个局部高剪切力区出现在CS12和CS13断面之间的凸岸边滩坡脚附近(图8)；各边坡型式下，除了弯道出口束窄区，弯道壁面剪切力最大的区域在弯道出口直段凹岸CS14断面。在单一岸坡条件下，CS14坡面处均存在一个低剪切力区(图7)，这是因为凹岸坡面附近存在次环流，近岸环流促使动量远离河岸，对岸坡具有保护作用。在单一岸坡中，CS14缓坡、陡坡和直坡凹

岸最大剪切力值相差不大, 分别为 0.28、0.30 和 0.29 Pa, 但高剪切力区范围明显呈现陡坡最多、直坡次之、缓坡最少的规律(图 8)。相较于单一岸坡(陡坡), 复式岸坡 CS14 断面坡脚附近的坡面和床面剪切力明显分布不均匀, 最大剪切力为 0.36 Pa, 是单一岸坡(陡坡)的 1.2 倍, 因此, 复式岸坡更易发生冲刷破坏, 这是因为在复式岸坡中存在遍布河槽的主环流, 将高动量流体输送到坡脚附近, 增大了岸坡冲刷。不同凹岸边坡型式下出口直段易受冲刷破坏的排序为: 复式岸坡 > 陡坡 > 直坡 > 缓坡。

在单一岸坡(陡坡)中, 凹岸局部最大剪切力分布在床面, 且较大值在河槽中分布较宽(图 8), 因此, 在进行河道防护时, 除凹岸坡面外, 需注重整个河床防护。复式岸坡低剪切力区主要位于岸坡平台及远离坡脚的床面处, 高剪切力区分布在坡脚附近的坡面和床面处且高剪切力区持续范围较长(图 7), 因此, 在对岸坡进行防护时, 复式岸坡需重点关注凹岸出口坡脚附近的床面和坡面很长一段距离。此外, 与其他定宽河道不同的是, 急弯展宽河道在出口直段存在束窄, 因此, 在凸岸束窄区存在大流速区域, 此处同样存在高剪切力区极易被冲刷破坏。

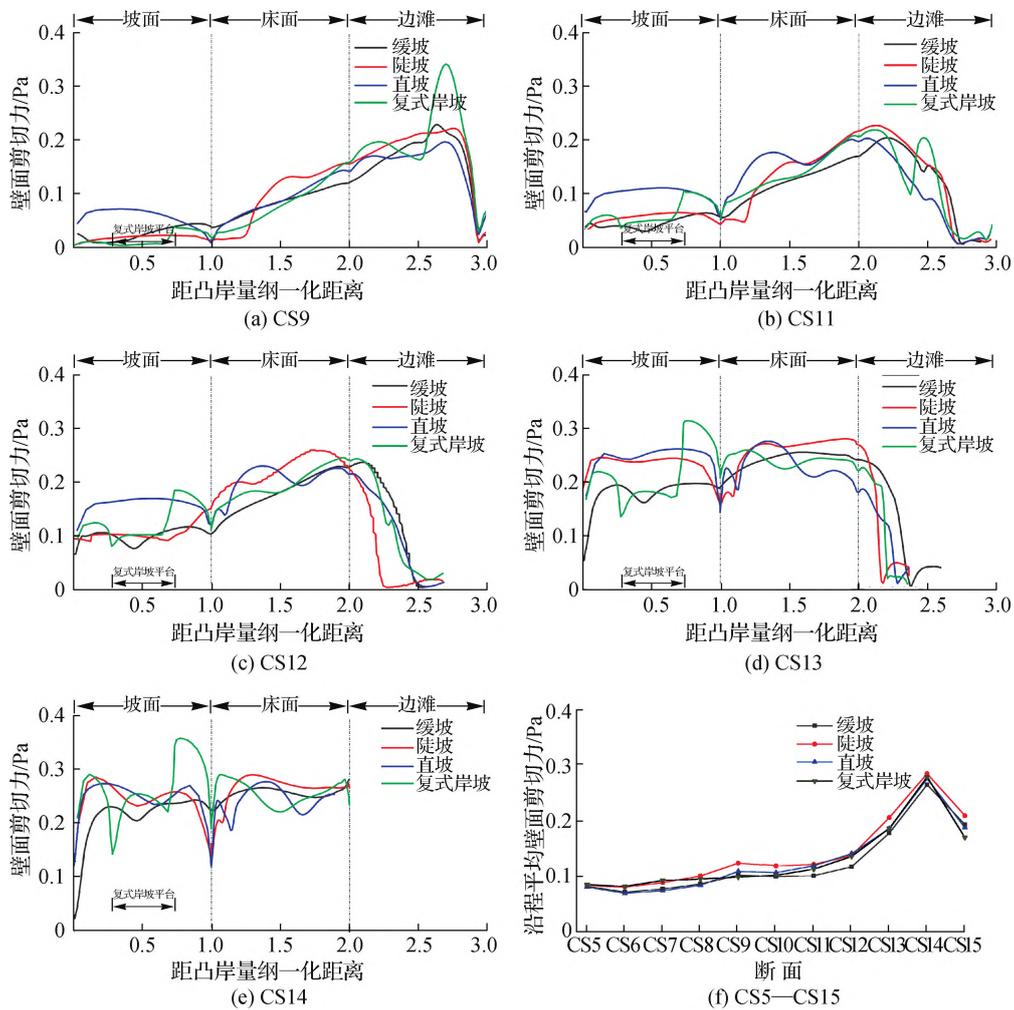


图 7 壁面剪切力

Fig. 7 Wall shear force

2.3 湍动能

湍动能用来表征流体的紊动程度, 代表紊动水流中脉动水团所具有的能量。河岸在水流作用下稳定与否主要取决于水流对壁面的冲刷, 近壁面局部流速和局部紊动决定了局部冲刷^[22]。图 9 为 4 种工况下 CS5—

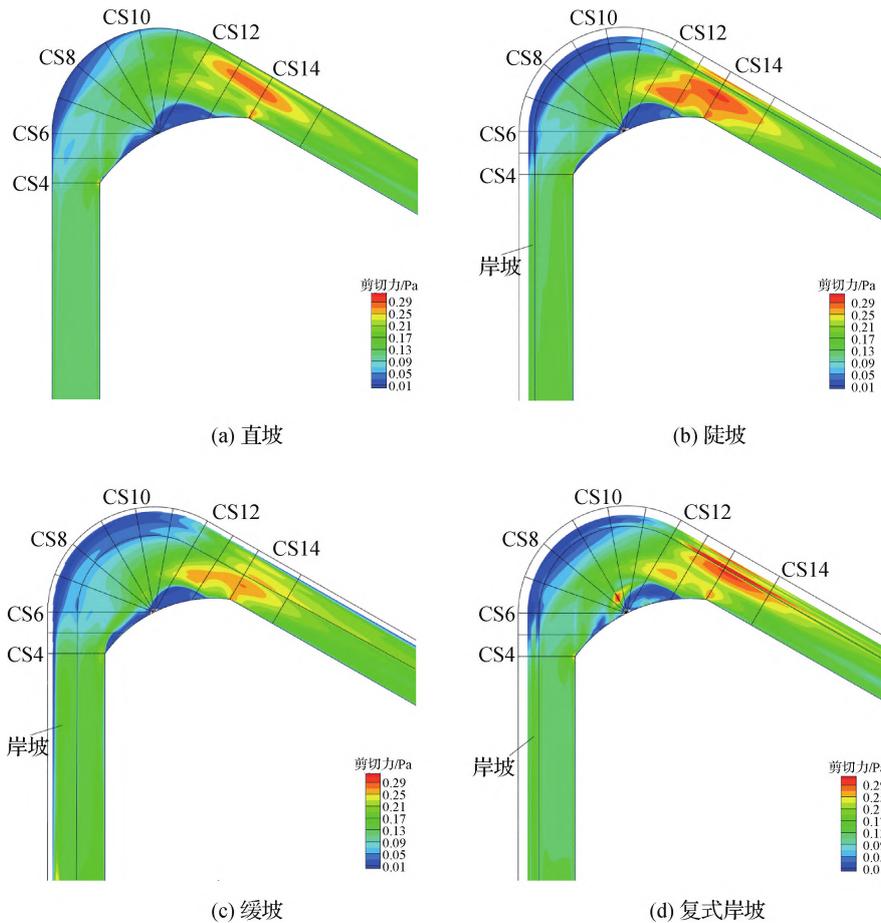


图 8 不同工况下壁面剪切力投影图

Fig. 8 Projection of wall shear force contours under different working conditions

CS14 断面湍动能分布等值线图。在各断面中,水槽中部受到边壁的扰动较小,因而湍动能较小。弯曲前顺直段 CS5 断面湍动能分布规律与谢亚光等^[16]研究一致,最大湍动能存在于右岸侧回流区与断面水流核心区交界的区域,因此,水流掺混较为剧烈,水流湍动强度大;CS5 断面为弯曲前的顺直断面,其左岸侧水面附近存在较高湍动能区,这是由于弯道中的水流回流分离影响到了上游顺直断面。在谢亚光等^[16]和马森^[1]的研究中,弯曲前的顺直断面水面也均存在较高湍动能区。在弯道中,凸岸侧主流集中,且横向流速较大,弯道内水流紊动高值存在于凸岸侧。凹岸坡面附近水域存在湍动能较大区域,一方面是因为环流促进水面混掺增大局部水流湍动强度;另一方面是由于凹岸存在水流凹陷区和回流分离区加剧了水流紊动。

在单一岸坡中,凹岸坡度越缓,凹岸区域湍动能最大值越小,主槽及凹岸湍动能分布趋于均匀。以陡坡为单一岸坡代表,对复式岸坡和单一岸坡进行对比。相较于单一岸坡(陡坡),复式岸坡凸岸侧湍动能增大;凹岸侧,弯顶前湍动能最大值减小,紊动程度减弱,弯顶后湍动能最大值增大,紊动加剧。发生这种现象的原因是,复式岸坡的存在使凸岸更易发生流速分离,加剧了凸岸的扰动。弯顶前紊动减弱的原因是,相较于陡坡,复式岸坡弯顶前水流分离现象消失;弯顶后紊动加剧的原因是复式岸坡边壁加剧了水流紊动。

3 讨 论

Tominaga 等^[12]和 Blanckaert 等^[13]均研究了不同边坡坡度对顺直河道环流模式及壁面剪切力的影响。本文将不同边坡坡度对河道水力特性影响的研究延伸到弯道并加入了复式河岸的边坡型式。与顺直河道相似的

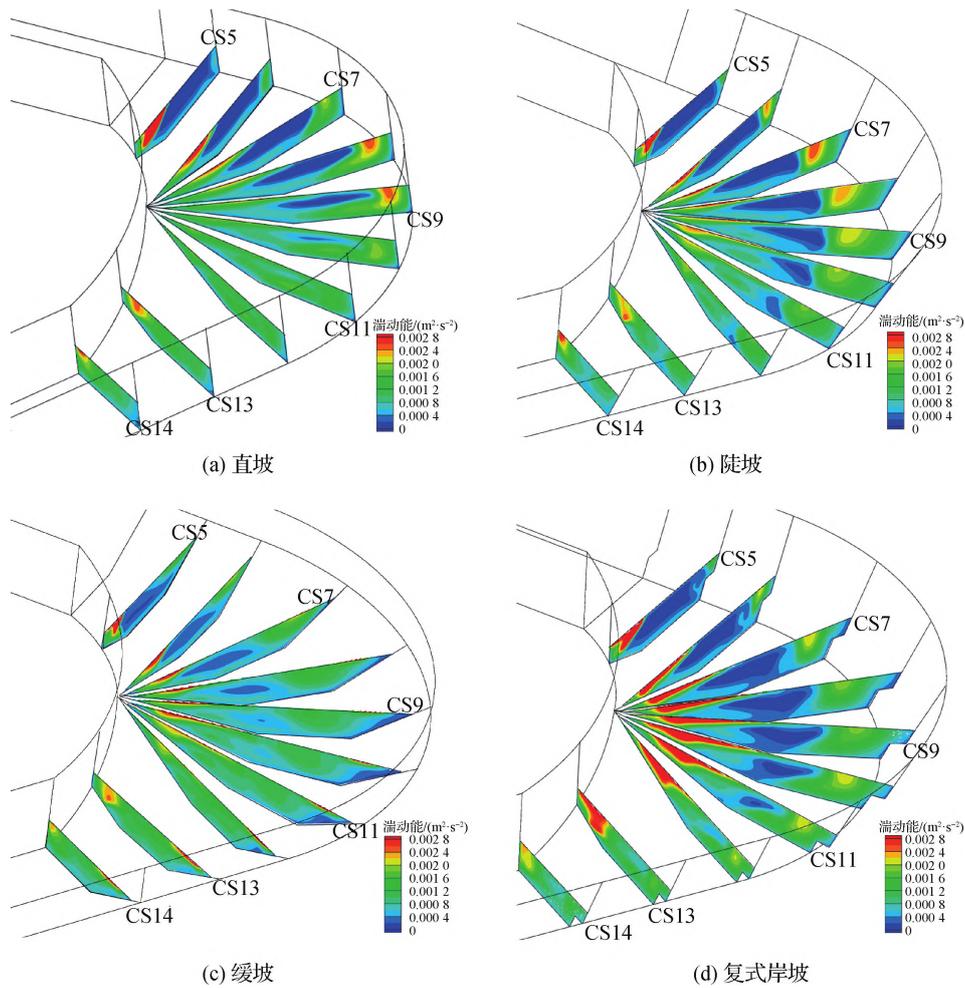


图 9 横断面湍动能等值线

Fig.9 Contours of turbulent kinetic energy in cross sections

是, 河道环流由近岸反向次环流及主环流组成, 河岸边坡型式影响了环流模式; 近岸环流促使高动量流体远离河岸, 使近岸存在一个剪切力减小区域。与顺直河道不同的是, 在顺直河道中岸坡变缓主环流尺度变大, 而在本研究的弯道中发现岸坡变缓主环流尺度变小。在顺直河道中, 边坡坡度对近岸环流的影响主要体现在环流尺度的变化, 而在弯道中发现岸坡坡度变化, 近岸环流的位置也会发生变化, 且岸坡坡度越缓近岸次环流越接近水面。胡呈维等^[22]在 33°和 45°边坡坡度条件下进行了水流冲刷对塌岸淤床交互作用影响的试验研究, 发现较陡岸坡经水流冲刷后更易失稳, 与本研究中缓坡壁面切应力较小的结果一致; 此外, 本研究在胡呈维等^[22]基础上进一步研究了复式岸坡的边坡型式并发现复式岸坡较陡坡更易发生冲刷。

本文通过弯道三维数值模拟分析了在不同凹岸边坡型式下急弯河道水力特性, 并进一步讨论了弯道凹岸边坡型式变化对弯道不同区域侵蚀破坏的影响。本文仅对单一流量和水深工况下凹岸边坡型式对急弯河道水力特性的影响进行了研究, 未来需进一步深化研究不同的来流条件(水流、水深)下, 凹岸边坡型式对急弯河道水力特性的影响。此外, 壁面粗糙度也是河道水力特性的重要影响因素, 针对弯道不同凹岸边坡型式下壁面粗糙度对河道水力特性影响的系统研究仍需进一步开展。

4 结 论

本文采用弯道三维数值模拟方法, 研究凹岸边坡型式变化对急弯河段水力特性的影响。主要结论如下:

(1) 凹岸坡度越缓, 最大纵向流速越远离凹岸和接近水面; 主环流尺度越小, 凹岸成对出现的反向次环流位置越接近水面; 相较于单一岸坡, 复式岸坡最大纵向流速变化不大; 主环流尺度增加, 次环流成对模式被改变。

(2) 由于近岸次环流作用, 单一岸坡坡面均存在低剪切力区。相较于单一岸坡, 复式岸坡出口直段凹岸侧最大剪切力增大为单一岸坡的 1.2 倍, 床面高剪切力区更靠近坡脚, 局部剪切力分布较不均匀且高剪切力区持续范围较长, 不利于岸坡稳定。

(3) 凹岸坡度越缓, 主槽及凹岸湍动能最大值越小; 相较于单一岸坡, 复式岸坡凹岸侧弯顶前湍动能最大值减小, 弯顶后湍动能最大值增大。

参考文献:

- [1] 马森. 弯道水流结构及几何形态对水流特性影响的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017. (MA M. Flow characteristics and influence of geometric factors in a bend[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [2] 马森, 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 M, LI G D, ZHANG Q L, et al. Effects of curve bending on the flow structure[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(6): 1193-1202. (in Chinese))
- [3] van BALEN W, BLANCKAERT K, UIJTTEWAAL 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.
- [4] BLANCKAERT K. Hydrodynamic processes in sharp meander bends and their morphological implications[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2011, 116(F1): 1-22.
- [5] VAGHEFI M, AKBARI M, FIOUZ A R. An experimental study of mean and turbulent flow in a 180 degree sharp open channel bend: secondary flow and bed shear stress[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(4): 1582-1593.
- [6] 陈启刚, 钟强, 李丹勋, 等. 明渠弯道水流平均运动规律试验研究[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 369-375. (CHEN Q G, ZHONG Q, LI D X, et al. Experimental study of open channel flow in a bend[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 369-375. (in Chinese))
- [7] 王永强, 胡春宏, 张鹏, 等. 三峡库区黄花城河段环流结构与涡尺度特征初探[J]. 水科学进展, 2022, 33(2): 253-263. (WANG Y Q, HU C H, ZHANG P, et al. Primary study on circulation structures and vortex-scale characteristics of Huanghuacheng reach in the Three Gorges Reservoir area[J]. Advances in Water Science, 2022, 33(2): 253-263. (in Chinese))
- [8] ZENG J, CONSTANTINESCU G, WEBER L. 3-D calculations of equilibrium conditions in loose-bed open channels with significant suspended sediment load[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 136(9): 557-571.
- [9] KIMIAGHALAM N, GOHARROKHI M, CLARK S P, et al. A comprehensive fluvial geomorphology study of riverbank erosion on the Red River in Winnipeg, Manitoba, Canada[J]. Journal of Hydrology, 2015, 529: 1488-1498.
- [10] 侯慧敏, 邓凯文, 杨紫海. 基于湍流模型数值模拟的梯形弯道水流特性研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(1): 124-127. (HOU H M, DENG K W, YANG Z H. Study on flow characteristics of trapezoidal bend based on numerical simulation of turbulence model[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(1): 124-127. (in Chinese))
- [11] 刘胜琪, 夏军强, 邓珊珊, 等. 下荆江急弯段河床形态调整对水流特性的影响[J]. 泥沙研究, 2023, 48(2): 9-16. (LIU S Q, XIA J Q, DENG S S, et al. Influence of riverbed geomorphic adjustment on flow characteristics in a sharp bend of the Lower Jingjiang reach[J]. Journal of Sediment Research, 2023, 48(2): 9-16. (in Chinese))
- [12] TOMINAGA A, NEZU I, EZAKI K, et al. Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows[J]. Journal of Hydraulic Research, 1989, 27(1): 149-173.
- [13] BLANCKAERT K, DUARTE A, SCHLEISS A J. Influence of shallowness, bank inclination and bank roughness on the variability of flow patterns and boundary shear stress due to secondary currents in straight open-channels[J]. Advances in Water Resources, 2010, 33(9): 1062-1074.
- [14] 崔桂香, 许春晓, 张兆顺. 湍流大涡数值模拟进展[J]. 空气动力学学报, 2004, 22(2): 121-129. (CUI G X, XU C X, ZHANG Z S. Progress in large eddy simulation of turbulent flows[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2004, 22(2): 121-129. (in Chinese))
- [15] 谢亚光. 急弯河道二元结构河岸塌岸淤床交互作用试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019. (XIE Y G. Experimental study on composite bank failure process and interaction with riverbed deformation in sharply curved channels[D]. Wuhan: Wuhan

- University, 2019. (in Chinese))
- [16] 谢亚光, 余明辉, 胡鹏, 等. 弯道凹岸不同部位崩塌体对近岸水流结构影响的试验研究[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 727-737. (XIE Y G, YU M H, HU P, et al. Experimental study on the effects of slump block at different locations upon the flow structure near the outer bank[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(5): 727-737. (in Chinese))
- [17] 孙东坡, 朱岐武, 张耀先, 等. 弯道环流流速与泥沙横向输移研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 61-66. (SUN D P, ZHU Q W, ZHANG Y X, et al. Study of circulating velocity profile and lateral sediment transport in curved channels[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 61-66. (in Chinese))
- [18] BLANCKAERT K. Topographic steering, flow recirculation, velocity redistribution, and bed topography in sharp meander bends [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(9): 1-23.
- [19] 向媛, 余明辉, 魏红艳, 等. 急弯河道壁面切应力及计算方法研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 45-53. (XIANG Y, YU M H, WEI H Y, et al. Calculation method of boundary shear stress in a sharply-curved channel[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(2): 45-53. (in Chinese))
- [20] 周卓亮, 余明辉, 李大成, 等. 凹岸崩塌体对急弯河道水力特性的影响[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 816-825. (ZHOU Z L, YU M H, LI D C, et al. Study on the effects of failed soil block upon the hydraulic characteristics of sharp bend [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(5): 816-825. (in Chinese))
- [21] 王旭, 张雅卓, 赵新, 等. 基于复式断面河道水力特性的分区防护设计研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(7): 129-133. (WANG X, ZHANG Y Z, ZHAO X, et al. Study on design of zoned protection based on hydraulic characteristics of compound channel[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2013, 44(7): 129-133. (in Chinese))
- [22] 胡呈维, 余明辉, 魏红艳, 等. 冲刷过程中岸坡条件对塌岸淤床交互作用影响的试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 77-85. (HU C W, YU M H, WEI H Y, et al. Experimental study of the influence of bank conditions on bank failure and interaction with riverbed deformation during scouring process[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(2): 77-85. (in Chinese))

Numerical simulation of effect of outer bank slope types on the hydraulic characteristics in sharp bends*

LI Qian¹, MA Li², YU Minghui¹, WU Di², GONG Lanqiang²

(1. *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;*

2. *POWER CHINA Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)*

Abstract: To study the effect of the outer bank slope types on the hydraulic characteristics in sharp bends, a three-dimensional hydrodynamic mathematical models was developed to simulate the flow structures under different slope types of the outer bank in the Shishou sharp bend section of the Jingjiang reach. The results show that, with the same cross-sectional area and water depth, the gentler the slope can move the maximum longitudinal velocity and the outer-bank reverse secondary flow away from the outer bank and the riverbed. The gentler slope can also decrease the turbulence intensity and the main secondary flow scale. Comparing to the simple and composite riverbank with the same slope, the maximum longitudinal velocity remained almost the same but the main secondary flow scale increased and the pairing model of secondary flow were changed. The maximum shear force on the composite riverbank was 1.2 times larger than that on the simple riverbank, and thus, the composite riverbank was more vulnerable to erosion and damage. Moreover, the turbulence in the upstream of apex of bend was weakened, while in the downstream of apex of bend was intensified. The results can deepen our understanding of the effect of bank slope types on the flow structure in sharp bends, and provided a basis for the protection of different types of bank slope.

Key words: hydraulic characteristics; slope type; outer bank; secondary flow; shear force

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11972265; No. 12372385).