



三维数值模拟在斗湖堤水道 护岸工程设计中的应用

周成成, 张明

(长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

摘要: 在对斗湖堤水道河床演变特性进行深入分析的基础上, 建立了三维水流数学模型, 根据整治目标和治理思路, 对该河段整治方案的效果进行了三维局部定床研究, 主要是对工程局部水流流速流态进行计算, 并对各流量级下水流强度及切应力的平面分布进行分析研究, 给出了工程守护范围内冲刷强度的变化情况, 研究成果为护岸工程设计及优化提供参考依据。

关键词: 斗湖堤水道; 三维数值模拟; 工程设计

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)12-0173-06

Application of 3D numerical simulation to shore protection engineering design on Douhudi channel

ZHOU Cheng-cheng, ZHANG Ming

(Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

Abstract: Based on the in-depth analysis of the bed evolution characteristics of Douhudi channel, we establish the 3D current numerical simulation model. According to the regulation objective and regulation thought, we carry out 3D movable fixed-bed study on the regulation effect for the river reach, including mainly the calculation of the speed and pattern for local current, and analysis and study on the flow strength and plane distribution of the shearing stress, and obtain the variation situation of scouring strength within the engineering protection scope. The research result may serve as reference for the revetment engineering design and optimization.

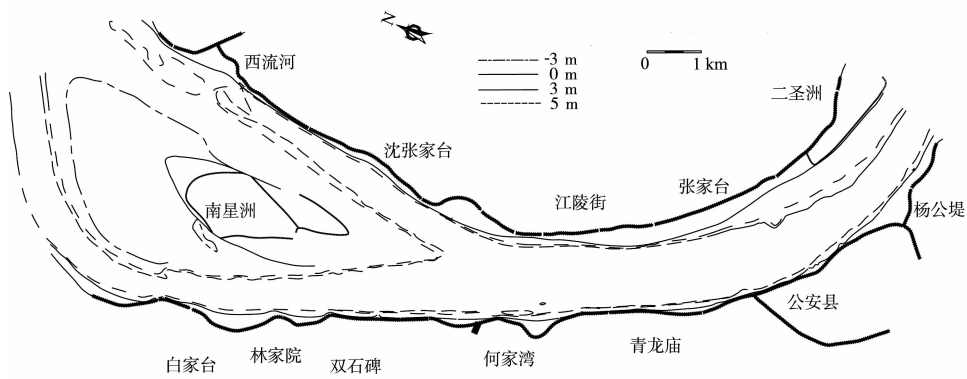
Keywords: Douhudi waterway; 3D numerical simulation; engineering design

斗湖堤水道位于长江宜昌市下游约 179 km, 上起双石碑, 下至朱家湾, 长约 7 km, 位于沙市河弯与公安河弯的连接段, 左岸地域为荆州市, 右岸为公安县。其上为马家嘴水道, 下接马家寨水道。斗湖堤水道位于上荆江河段, 属长江流域中下游平原水系。水道顺直微弯, 左岸有张家台边滩, 历史上斗湖堤水道河道单一, 航道条件优良, 三峡水库蓄水以后受来沙减少的影响, 上游滩槽格局明显调整, 出现不利于航道条件的变

化。受其影响, 近年来, 左岸江陵一带岸坡崩退, 张家台边滩冲刷萎缩明显, 枯水期中段深泓坐弯左摆, 右岸黄家湾一带右侧潜滩不断淤积下延, 枯水期淤积尤其明显, 沿岸航道受阻, 航道有向不利方向发展的趋势。斗湖堤河段现行航道等级为 II 级, 航道维护类别全年按一类进行维护, 年内航道水深实行分月维护方式, 2010 年 11 月开始试运行 3.2 m 枯水期最小航道维护水深。斗湖堤水道河势见图 1。

收稿日期: 2014-10-08

作者简介: 周成成 (1985—), 女, 硕士, 工程师, 从事航道建设规划、科研及工程设计方面工作。



注：1. 根据长江航道测量中心1:10 000测图绘制；
2. 测图时间：2012年2月。

图1 斗湖堤水道河势

1 河床演变特点

1.1 河道特性

斗湖堤水道上游紧邻马家嘴水道，两者关系密切，在形态特征上并没有明显的分割点。马家嘴水道位于公安河弯弯顶上游的放宽段，为微弯分叉河型，其平面形态也呈两头窄中间宽，而且放宽率大，观音寺至西湖庙约 10 km 的范围内河宽由 900 m 扩展至 3 700 m。斗湖堤水道是公安弯道与郝穴弯道之间的顺直过渡段，上段为南星洲左、右两汉的汇流段，中下段为单一微弯段。斗湖堤水道除汇流段河宽较大、沿程逐渐缩小外，单一段的河宽变化较小，基本稳定在 1 200 m 左右。以该水道出口青龙庙为界，河道宽度才逐渐缩窄至 1 000 m 以下。

根据近几年的资料来看，斗湖堤水道的洪枯水沙输移特性有显著的差别。在洪水期，水流动力大，在惯性的作用下，水流经过西湖庙弯顶段后，基本取直沿河道右岸进入斗湖堤水道，并继续贴靠右岸进入马家寨水道。所以说，在汛期，西湖庙以下一直到马家寨水道，水流一直位于河道右岸，没有过渡发生。

进入枯水期以后，水流能量趋弱，惯性作用较小，在西湖庙至林家院一带，逐渐偏离右岸，到南星洲尾，也就是斗湖堤水道的上段，水流已过渡至左岸，顶冲南星洲洲尾。水流经过江陵后，由于马家寨弯道段凹岸深槽（右岸）的吸溜作用，水流又重新回到右岸。因此，在枯水期，斗湖堤水道内的水流存在二次过渡的现象。

1.2 近期变化

在三峡水库蓄水以后，受来沙减少的影响，滩槽格局明显调整，出现不利于航道条件的变化，因此，这里重点分析该水道蓄水以来的演变情况。

1) 深泓变化。

蓄水以来，在斗湖堤水道较窄的河宽条件下，水道内的枯水深泓并未保持稳定，在双石碑以下，深泓走向逐年左摆。在南星洲尾至江陵一带，枯水深泓线在 2001 年初贴靠右岸，在 2010 年初已贴靠左岸，枯水河势已发生重大调整。

2) 洲滩变化。

随着深泓的逐渐左摆，南星洲洲尾高滩和出口段左岸窑头埠一带的稳定受到极大的影响，蓄水以来，南星洲洲尾高滩持续崩退，累积崩退已达 200 m 左右，从踏勘的情况来看，高滩滩面虽有良好植被，但新崩岸线十分明显（图 2），岸坡陡峻，前沿流速湍急，可见在当前自然条件下，崩岸的现象没有缓和的迹象。河段出口段左岸窑头埠一带自蓄水以来持续崩岸，2001 年以来累积崩退已达 280 m 左右，现场踏勘也看出，崩岸的现象仍在继续（图 3）。



图2 南星洲洲尾高滩岸线崩退现状



图 3 斗湖堤河段出口段左岸窑头埠一带崩岸状况

河段两处高滩的崩退一方面是受到了上游来沙减少的影响、另一方面也是受深泓逐渐左摆的影响。同时,高滩的崩退又反过来促进了深泓的持续左摆。

高滩与深泓的相互关系直接影响了斗湖堤水道中段的滩槽变化,引起了黄家湾、何家湾一带滩槽格局的不利调整。具体表现为:该位置河道左侧河床逐渐冲深,而河道右侧则成为了枯水缓流区,泥沙落淤形成浅包,浅包在蓄水以来年际变化表现为逐年淤高淤宽,挤压河道左侧航槽,使得航道弯窄。

2 整治目标及治理思路

根据河床演变分析,斗湖堤水道历史上航道条件较好,常年 5 m 线航宽在 500 m 以上,但该水道上游马家嘴水道是荆江重点碍航河段之一,且随着三峡工程蓄水运用后,马家嘴水道存在恶化趋势,故而先期分别于 2006、2010 年对马家嘴水道实施了 2 次航道整治工程,该工程实施后根本解决了马家嘴水道的碍航问题,进一步稳定了河势格局,且将斗湖堤水道上游主流稳定于南星洲的右汊。然而,三峡水库蓄水后,来沙减少造成一些重要洲滩岸线不断地冲刷崩退,如南星洲洲尾右缘岸线的崩退,致使该水道进口主流不断左摆,汇流点的左偏造成左岸侧张家台边滩的冲刷缩小,相应右岸侧浅滩向左淤积不断挤压航槽,航宽条件不断恶化。随着三峡水库蓄水的持续运用,南星洲洲尾的进一步崩退,将造成主流进一步左摆,过渡段浅滩将持续淤涨,航道条件将难以满足规划标准。

因此,斗湖堤水道航道的根本问题在于进口段洲滩岸线的崩退致使主流摆动空间加大,从而造成过渡段浅滩淤展挤压航槽。故本水道航道整治目标

为:通过对关键洲滩岸线的守护,限制主流的摆动空间,防止三峡水库蓄水运用后浅滩进一步淤展,解决本水道的碍航隐患,改善航道条件^[1]。

3 三维水流模型建立及验证

3.1 基本原理及网格离散

本文采用 Reynolds 平均来简化 N-S 方程,得到简化的三维水流运动方程组,采用有限体积法,在非结构化交错的坐标网格系统下,求解三维水流运动方程组^[2-4]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial (uu)}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} + \frac{\partial (uw)}{\partial z} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xy} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{xy} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{xz} \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (vu)}{\partial x} + \frac{\partial (vv)}{\partial y} + \frac{\partial (vw)}{\partial z} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{xy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{yz} \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3)$$

建立了模拟具有自由表面的三维水波流动非静压数值模型,其目的是模拟自由表面流动中的非静压过程。为了模型的稳定性不受自由面波速、风应力、垂向黏性和底摩擦力的影响,采用半隐分步法。采用满足自由表面运动学边界条件的水位演化方程来计算新时刻自由表面的位置。为了增加模型对计算域的适应性,采用在非结构化网格上求解控制方程。动量方程中的对流项采用显式守恒 Euler 方法离散,其具有除表层单元外守恒性的优点。在表层采用对垂向动量方程积分的方法,通过插值的方法获得在表层单元的非静压边界条件,在垂向分很少层(2~5层)就能正确地模拟波浪浅化、非线性效应、折射、绕射等现象。紊流方程中的对流项采用与连续性方程和水位演化方程相兼容的方法离散,保证了紊流方程的离散是局部和全局质量守恒的。

3.2 计算网格的划分

根据提供的河道、地形和水文资料,建立长江斗湖堤河道三维水流数值模拟的模型^[5]。数学模型计算范围上游起郑江市,下游至朱家湾,模型采用无结构三角形网格。边界和工程区域网格

加密, 网格边长 40 m, 模拟区域共计 66 474 个单元, 33 822 个网格节点, 垂向网格共分为 10 层, 采用对数形式分布。上游边界采用流量控制, 下游开边界由实测水位流量关系控制。

3.3 模型的验证

斗湖堤水道三维模型采用 2012 年 2 月 (流量为 $6\ 197\ \text{m}^3/\text{s}$)、2004 年 11 月 (流量为 $10\ 178\ \text{m}^3/\text{s}$) 实测资料进行验证。验证结果表明数学模型的三维流速计算结果与实测资料吻合良好, 误差均在允许范围内。

4 三维定床研究

4.1 流态分析

为了分析不同流量下护岸工程区域三维流场的变化, 在工程守护范围近岸处选取 15 个特征点 (图 4), 通过展示特征位置沿水深流速分布在不同流量下的变化, 掌握不同流量对特征位置流速分布的影响, 进而对护岸工程的稳定性进行分析。

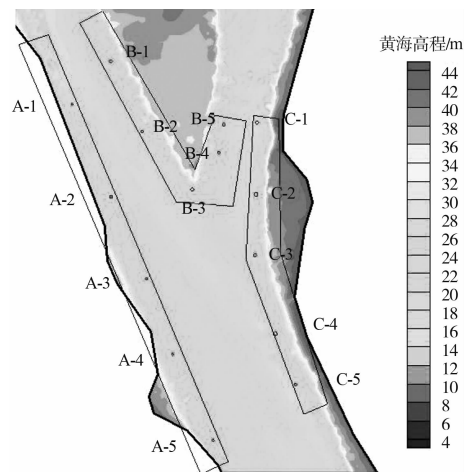
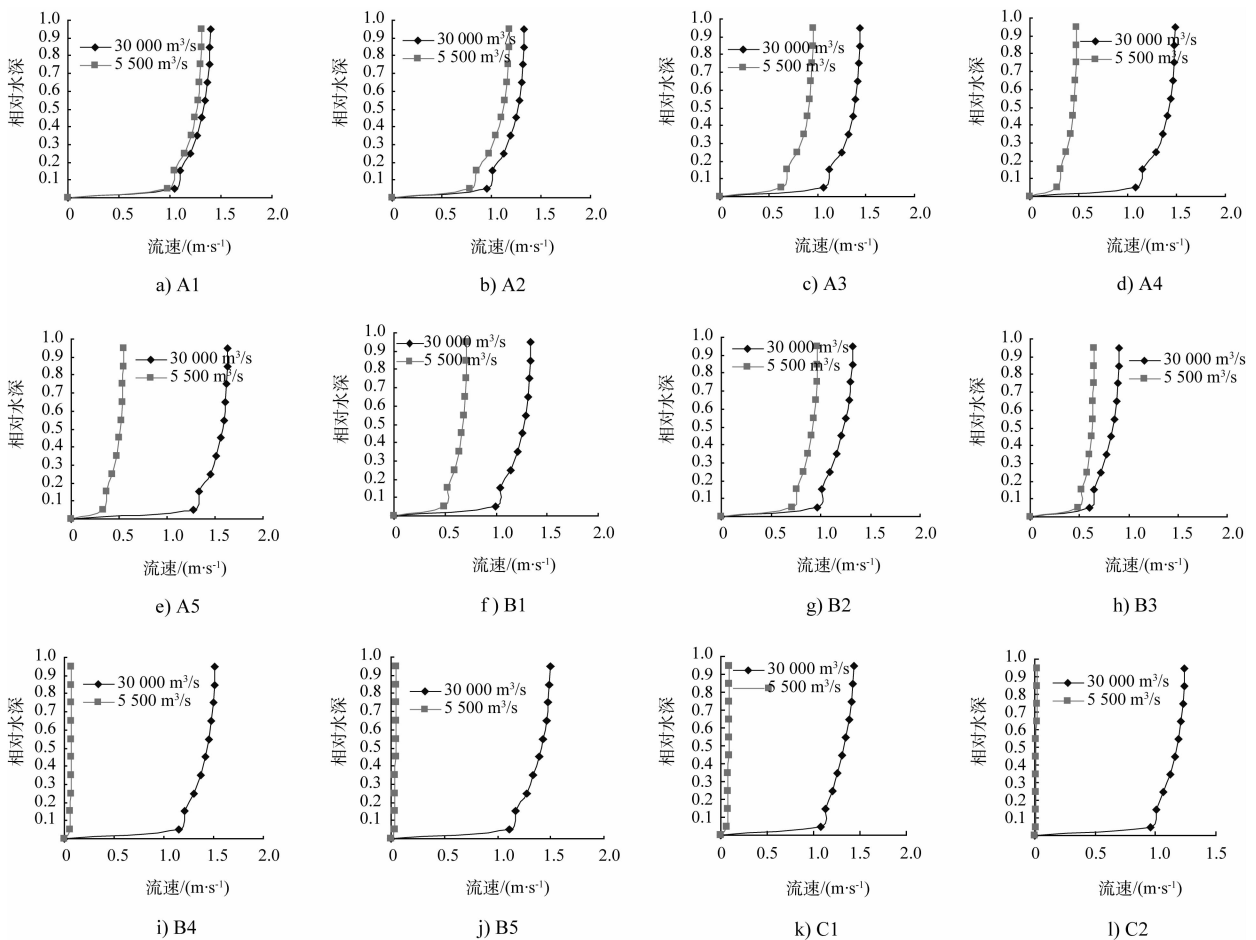


图 4 特征点位置

各特征位置的垂向流速分布见图 5, 各特征点流速分布情况基本类似, 底层流速值较小, 随着水深的增加流速值逐渐增加, 各特征点垂向流速在中下层流速较小, 随着水深的增加流速值逐渐增加, 在中上层流速值基本达到最大值, 流速随水深增加值较小。



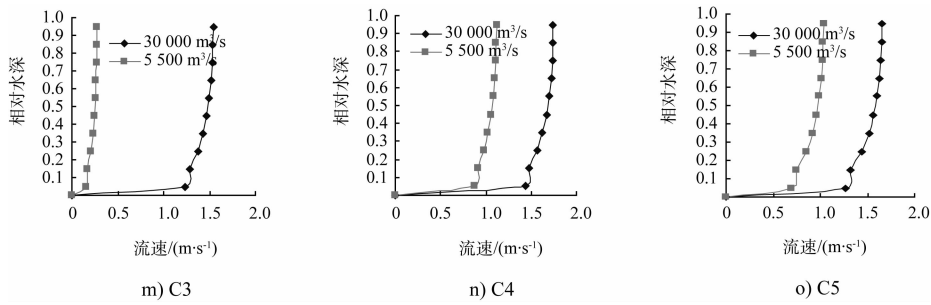


图 5 工程局部特征点不同流量下垂向流速分布

河道右岸护岸加固工程上段流速较大, A-1 处流速值最大, 约为 1.21 m/s, A-4 处流速值最小, 约为 0.38 m/s。随着流量的增加工程守护处近岸流速逐渐增加, A-4 与 A-5 流速增加较大, 分别由 0.38、0.43 m/s 增加至 1.21、1.24 m/s; 南星洲右缘下段守护工程处, 洲尾右缘流速较大, B-1、B-2 及 B-3 处平均流速值为 0.55 ~ 0.81 m/s, 洲尾左缘流速较小, B-4 及 B-5 处平均流速分别为 0.06、0.05 m/s, 随着流量的增加南星洲左汉分流逐渐增加, B-4 及 B-5 流速增加较大, 分别增加至 1.27、1.24 m/s, B-1、B-2 流速分别增加至 1.11、1.08 m/s, 受两股水流顶冲作用, B-3 处流速值增加较小, 仅增加至 0.73 m/s。江陵高滩守护工程处, 上段流速较小, C-1、C-2 及 C-3 处流速值分别为 0.08、0.01、0.21 m/s, 下段流速值较大, C-4 与 C-5 流速值分别为 0.94、0.84 m/s; 随着流量增加至平滩流量, C-1、C-2 及 C-3 流速增加值较大分别增加至 1.18、1.04、1.31 m/s, C-4 与 C-5 流速增加至 1.49、1.39 m/s, 仍属于流速较大区域。

4.2 切应力变化

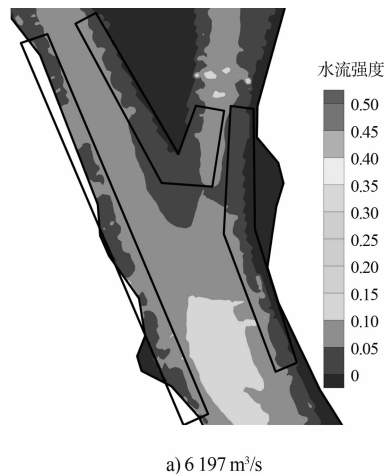
为进一步分析工程守护范围内冲刷强度的变化, 对不同流量级下斗湖堤水道水流强度及切应力的平面分布进行分析, 水流强度及切应力的平面分布情况见图 6、7, 各特征点水流强度及切应力的值见表 1。

河底或渠底泥沙的起动, 是由于水流作用在河底或渠底的切应力而引起的, 河床临界切应力一定的情况下, 水流强度越强河床泥沙越容易起动, 脱离河床的泥沙在水流带动作用, 以上浮或者沿河床滑动、滚动或跳跃的方式向下游运动,

造成河床冲刷。所以通过计算河段水流强度的分布, 掌握泥沙容易起动的位置, 采取相应的工程措施, 增加河床临界切应力以稳固河床。随着流

表 1 不同流量级下特征点水流强度与切应力变化

编号	水流强度		切应力/Pa	
	$Q=6\ 197\ \text{m}^3/\text{s}$	$Q=30\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$	$Q=6\ 197\ \text{m}^3/\text{s}$	$Q=30\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$
A-1	0.052 2	0.113 1	1.20×10^{-4}	2.61×10^{-4}
A-2	0.049 3	0.105 8	1.02×10^{-4}	2.30×10^{-4}
A-3	0.063 3	0.130 9	1.38×10^{-4}	2.95×10^{-4}
A-4	0.052 8	0.138 3	1.10×10^{-4}	3.05×10^{-4}
A-5	0.061 6	0.169 9	1.42×10^{-4}	4.16×10^{-4}
B-1	0.045 4	0.110 3	9.79×10^{-5}	2.53×10^{-4}
B-2	0.043 8	0.101 7	9.70×10^{-5}	2.31×10^{-4}
B-3	0.010 2	0.051 8	2.00×10^{-5}	1.06×10^{-4}
B-4	0.054 4	0.146 1	1.29×10^{-4}	3.53×10^{-4}
B-5	0.052 6	0.134 9	1.19×10^{-4}	3.14×10^{-4}
C-1	0.033 8	0.112 8	8.13×10^{-5}	2.72×10^{-4}
C-2	0.028 9	0.093 6	7.23×10^{-5}	2.32×10^{-4}
C-3	0.052 8	0.148 3	1.36×10^{-4}	3.82×10^{-4}
C-4	0.083 7	0.205 6	2.25×10^{-4}	5.40×10^{-4}
C-5	0.059 6	0.165 7	1.35×10^{-4}	3.93×10^{-4}



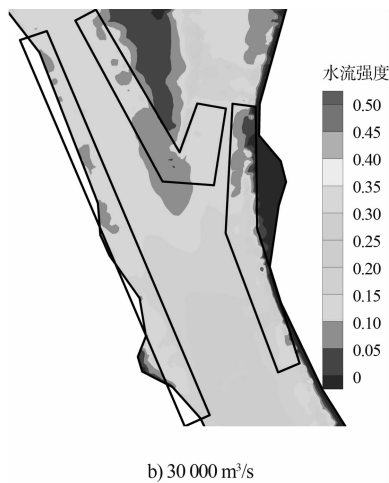


图6 不同流量级下斗湖堤水道水流强度平面分布

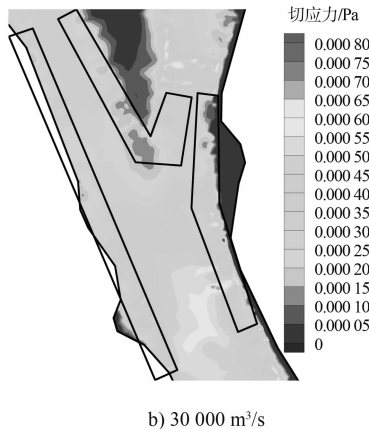
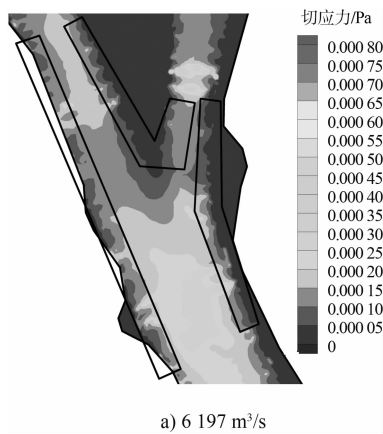


图7 不同流量级下斗湖堤水道切应力平面分布

量增大,水流强度和切应力都明显增大,表明其对河床及岸堤的冲刷随着流量的增加而增加。在护岸加固工程守护区内, A-3处水流冲刷力度最大,但随着流量的增加,水流冲刷力度最大的部位转移至 A-5处, A-2始终冲刷力度较小;南星洲右缘下段守护工程各级流量下, B-4、B-5处水流

冲刷力度均较大。江陵高滩守护工程处,在枯水流量时 C-1、C-2及 C-3处水流冲刷力度较小,随着流量的增加, C-1、C-2及 C-3水流冲刷力度大幅增加,但 C-5始终为冲刷力度最大的位置。

5 结论

1) 对斗湖堤水道河道特性及演变规律进行把握的基础上,通过建立三维数学模型,对该水道守护工程范围内流态及切应力变化进行了统计分析,结果表明,无论在平面上还是垂线方向流速及水流冲刷强度遵从一定的规律变化,随着流量加大,护岸工程区域流速都相应增加,河床切应力以及水流强度普遍增大,水流强度的增加对河床以及堤岸的冲刷加剧,但在工程守护区域内,不同流量级下不同部位的水流冲刷强度有所不同。

2) 在护岸加固工程守护区内,护岸中上段水流冲刷力度较小,下段冲刷力度较大;南星洲右缘下段守护工程,头部水流冲刷力度较大;江陵高滩守护工程下段为冲刷力度最大的位置,上述部位护岸设计中应加强结构稳定性。

参考文献:

[1] 长江航道规划设计研究院. 长江中游荆江河段航道整治工程昌门溪至熊家洲段工程初步设计阶段-斗湖堤水道治理方案研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2013.

[2] 邵军荣, 何建兵, 吴时强, 等. Z坐标系下分层三维水流数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2012(3): 191-198.

[3] 黄国鲜, 周建军. 复杂边界条件下三维水流数学模型的建立与验证[J]. 水力发电学报, 2007(8): 66-70.

[4] 王平义, 方铎, 蔡金德, 等. 弯曲河道三维水流模型[J]. 成都科技大学学报, 1993(3): 1-8.

[5] 长江航道规划设计研究院. “长江中游荆江河段航道整治工程昌门溪至熊家洲段工程”工程初步设计阶段——斗湖堤水道水沙数值模拟研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2013.

(本文编辑 武亚庆)