

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.01.005

河道改造对弯曲河段的水力影响模拟研究

曹磊¹, 张贵金¹, 夏波¹, 雷鹏^{1,2,3}

(1.长沙理工大学 水利工程学院, 湖南长沙 410114;

2.南京水利科学研究所 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098;

3.水能资源利用关键技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410014)

摘要:以浏阳河朝正垸急弯河段为例,采用 MIKE21 水动力平面二维水流-泥沙模型先进行率定,综合考虑长沙枢纽运行后湘江水位抬升对浏阳河下游的顶托与浏阳河不同频率洪水的叠加作用,采用该模型对上游直线段、弯段、下游直线段的水文变化、流速变化及冲淤情势进行多工况模拟。结果表明:对于弯曲河道尽管改造拓宽弯曲段,在凸岸水流流速增大,可能存在冲刷,凹岸局部会产生淤积,在近邻弯曲下游段凹岸局部还会产生水位壅高。结果可指导本河段防洪规划设计,对类似工程也具有借鉴意义。

关键词:弯曲河道;河道改造;MIKE21;浏阳河;朝正垸

中图分类号:TV133

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2016)01-0021-06

Simulation of the Hydraulic Impacts of the River Channel Regulation on the Tortuous River Channel

CAO Lei¹, ZHANG Guijin¹, XIA Bo¹, LEI Peng^{1,2,3}

(1. College of Water Conservancy Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China;

2. China National Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Water Conservancy Engineering, Nanjing Institute of Water Conservancy, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Key Technologies of Water Resources Utilization, Changsha, Hunan 410014, China)

Abstract: In this paper the section of Liuyang River in Chaozheng embankment was chosen as an example, MIKE21 model was adopted which is able to solve plane 2D flow-sand mathematical model. The parameters were calibrated first, real world situation was considered thoroughly, such as the development of Changsha junction and the Xiang River water level raise afterwards, which will block Liuyang River, as well as the superposition of different frequencies of floods. Many operation situations were also considered to simulate the changes in hydrological regime, flow velocity and erosion and deposition balance at straight section in the upstream, tortuous section, and straight section in the downstream, The results showed that for tortuous river channels the regulation will increase the flow velocity at concave bank where erosion and deposition at convex bank will happen and water level rising because of block in the downstream. This research is valuable to practice and similar projects.

Keywords: tortuous river channel; channel regulation; MIKE21; Liuyang River; Chaozheng embankment

随着城市河段改造、河道合理开发利用工程日趋增多,需要准确把握河道改造对弯曲河段水位、流场及冲淤等的影响。常见的河道改造水力影响分析方法有理论分析、模型试验和数值模拟等。数值模拟不受试验场地的影响,计算速度快,周期短,可以较快得到研究成果,是研究弯道水流运动的有效途径和方法。国内外有许多学者进行了弯道水流数值

模拟计算,如:华祖林^[1]通过拟合曲线,对急弯河段引起的回流及环流进行了三维模拟,结果较为理想。李艳红等^[2]将不同坐标系结合,建立三维水流模型,对流速的垂向结构进行了研究。林小平等^[3]采用 FLUENT 软件,对沿河公路弯道水流处的三维流场进行分析,得到了流场分布、河床剪应力等特征。许栋、杨燕华等^[4-5]为探究弯曲河道中的水流运动特

性,基于雷诺方法和有限体积法建立了三维水流数学模型。吕岁菊等^[6]采用有限体积法和 SIMPLEC 算法,模拟天然连续弯道的水流。史莹等^[7]通过环境流体动力学模型,模拟多种工况下的弯道水流特性。但弯曲河道改造对水流的影响成果还不多见。

浏阳河朝正垸河段现状为一急弯,加上下游长沙枢纽运用后湘江水位顶托的作用,使得这一河段的水流情势异常复杂,考虑城市开发的需要,在这一弯曲河段要进行拓宽改造,河道改造规划到底对弯曲河段水位、流场及冲淤等产生怎样的影响有必要进行研究。本文基于 MIKE21 水动力水流-泥沙模型,展开多工况数值分析,为河道改造规划设计和治理提供依据。

1 工程概况

浏阳河属湘江一级支流,在长沙市北郊汇入湘江,流域面积 4 237 km²,河流长度 219 km,河流平均坡降 0.57‰,每年 10 月至第二年 2 月为枯水期,水位高差变化幅度较大^[8]。朝正垸属亚热带气候,地貌以河流冲积堆积地貌为主,属浏阳河 I 级阶地,见图 1。河段洪水期易受湘江回水顶托影响,当湘江水位较高而浏阳河来水较小时以沉积作用为主,当湘江水位较低而浏阳河来水较大时以冲刷作用为主。规划在朝正垸 5.2 km 区域,融合浏阳河的景观水体打造文化娱乐设施,下游段建设一个休闲景观区、弯段通过堤防内退形成湿地景观区并形成城市印象区、上游直线段利用自然内凹段形成滨水码头。

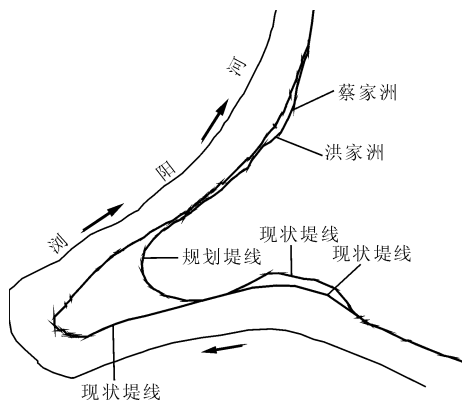


图 1 浏阳河朝正垸段堤线

2 水力影响分析

2.1 MIKE21 水动力模型

(1) 基本方程及定解条件

将朝正垸河道水流视为非恒定不可压缩流体,则水流运动规律满足 Navier - Stokes 方程^[9],对连续

方程和 Navier - Stokes 方程取时均值,根据假设^[10]设定压强服从静水分布、不计垂直方向的流动时间和空间的微分,并考虑该处模拟河段范围不大(不考虑科氏力),且为内陆中小型河流(不考虑表面切应力),将方程沿水深积分可得朝正垸河道平面二维水流运动的连续方程和运动方程,具体见式(1)~式(3)。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$h \frac{\partial h}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} = -gh \left[\frac{\partial e_b}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right] - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{h}{\rho} \left[E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} = -gh \left[\frac{\partial e_b}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{h}{\rho} \left[E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

式中: h 为水深; u 和 v 为 x 和 y 向流速; g 为重力加速度; e_b 为床面高程; ρ 为水密度; τ_{bx} 和 τ_{by} 表示底部切应力的 x 和 y 向分量; E 为紊动黏滞系数。

初始条件:结合朝正垸河道特点,初始条件见式(4)~式(6)。

$$\zeta(x, y, t) \Big|_{t=t_0} = \zeta_0(x, y, t_0) \quad (4)$$

$$\mu(x, y, t) \Big|_{t=t_0} = \mu_0(x, y, t_0) \quad (5)$$

$$v(x, y, t) \Big|_{t=t_0} = v_0(x, y, t_0) \quad (6)$$

边界条件:结合朝正垸河道特点(有部分洲滩存在),上游边界取上游来水流量。下游边界给出水位过程线。闭边界不考虑渗透,满足滑移边界条件,取法向流速为 0。对于有洲滩存在的地方,随着水位的变化,采用动边界处理技术(干湿网格法)^[11-14]。

(2) 数值求解方法及计算程序

采用有限单元法和有限差分法相结合的办法对上述方程求解:空间上采用有限单元法,以适应复杂的边界地形条件,时间上采用全隐式非线性有限差分进行离散以提高计算速度。其中,为较好的描述朝正垸河道岸线和地形对水流运动的影响,本文采用二次四边形网格和三角形网格合计对计算区域进行离散^[15-17]。

2.2 模型率定及验证

验证所采用的数学模型计算范围上游边界取在蔡家洲洲头以上约 2.5 km 河段,下游边界取在距洪家洲洲尾约 1.5 km 河段,距坝址约 8.2 km 处,模拟河段长度约 12 km,图 2、图 3 为该河段测点位置及流场流态图。

(1) 水面线率定和验证

分析和比较各测点的数学模型计算值和原型实

测值可知,沿程水位计算值和观测值最大绝对误差为 4.9 cm,平均绝对误差为 1.8 cm,数学模型计算水面线与原型水面线均吻合较好,模拟精度可满足计算要求,具体见图 4、图 5。

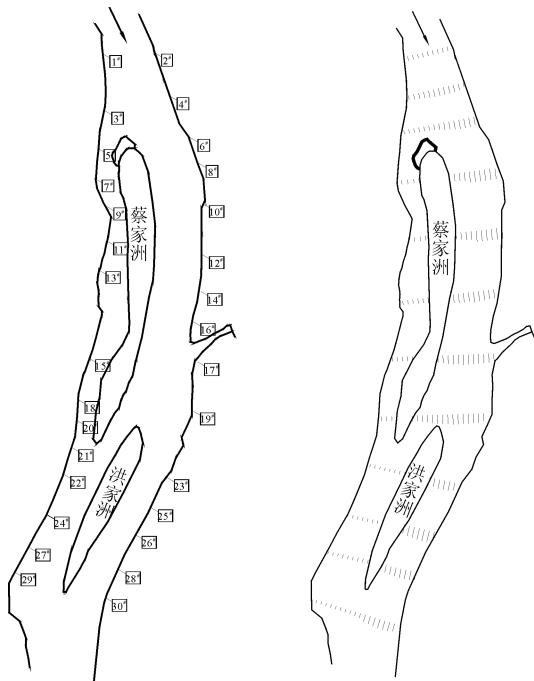


图 2 蔡家洲附近水文测点位置 图 3 蔡家洲附近水域流场流态

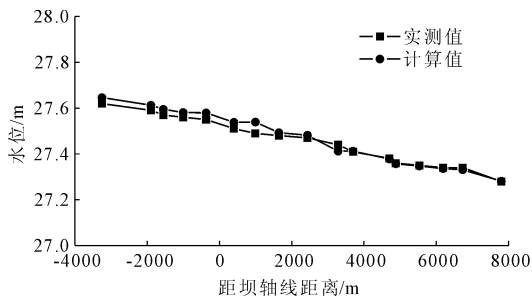


图 4 中水情况下水面线(左岸)

(2) 断面流速分布验证

取两个典型断面流速测量资料,将原型与模型计算结果进行比较,表明模型与原型流速分布吻合较好,满足规范规定,具体见图 6、图 7。

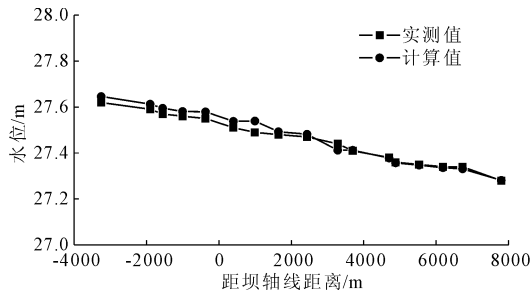


图 5 中水情况下水面线(右岸)

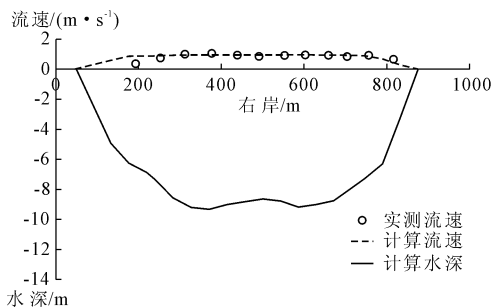


图 6 中水 A 断面流速分布对比图

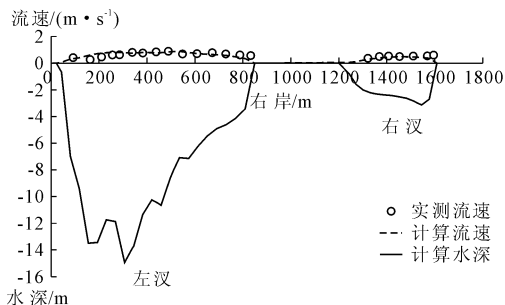


图 7 中水 B 断面流速分布对比图

2.3 工程影响分析

朝正垸浏阳河沿岸景观规划设计工程对所在河道水位和流速的影响的计算成果主要包括:12 组不同水流条件下,工程兴建前后计算河段内的水位、水深及垂线平均流速等成果。为了分析方便,在计算河段共布置了 29 个监测断面分析洪水水面线的沿程变化,在工程所在水域选择了 8 个断面(如图 8 所示)分析水位的变化情况。

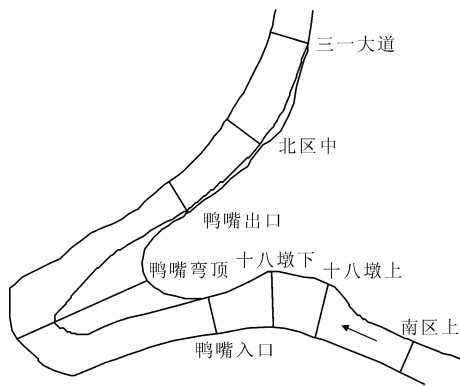


图 8 计算河段监测断面图

为合理描述改造河岸的影响,模型采用三角形网格对区域进行离散,共设置网格 49 617 个,节点总计 26 864,最小步长 5 m,计算糙率取 0.025,急弯河段和有植被水域适当加糙,模拟河长约 13 km,具体见图 9。由于所处河道同时受湘江水位和上游流量的影响,在模拟工程对浏阳河水流条件及行洪过程影响时,综合考虑如下原则:合理考虑浏阳河洪水

与湘江洪水的遭遇概率;典型组合与已有水面线成果相对应;选取组合时尽可能偏于安全。基于上述原则,选取表 1 所示的组合情况。

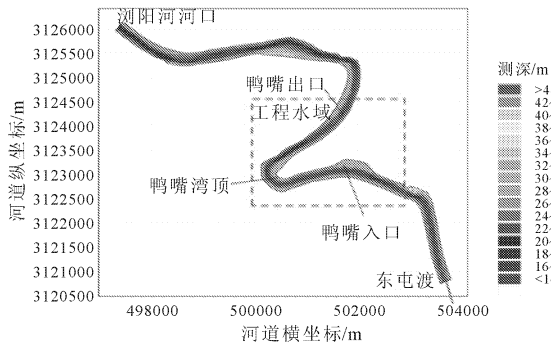


图 9 浏阳河计算范围及水下地形(13 km)

表 1 计算水流条件

组次	上游流量 $/(m^3 \cdot s^{-1})$	河口水位 /m	备注
Run01	7010	35.61	浏阳河 200 年一遇洪水,湘江 10 年一遇洪水
Run02	7010	36.10	浏阳河 200 年一遇洪水,湘江 20 年一遇洪水
Run03	6200	35.61	浏阳河 100 年一遇洪水,湘江 10 年一遇洪水
Run04	6200	36.10	浏阳河 100 年一遇洪水,湘江 20 年一遇洪水
Run05	5380	35.61	浏阳河 50 年一遇洪水,湘江 10 年一遇洪水
Run06	4780	35.61	浏阳河 30 年一遇洪水,湘江 10 年一遇洪水
Run07	2460	36.35	浏阳河 5 年一遇洪水,湘江 30 年一遇洪水
Run08	2460	36.63	浏阳河 5 年一遇洪水,湘江 50 年一遇洪水
Run09	2460	37.04	浏阳河 5 年一遇洪水,湘江 100 年一遇洪水
Run10	2460	37.64	浏阳河 5 年一遇洪水,湘江 200 年一遇洪水
Run11	3470	37.04	浏阳河 10 年一遇洪水,湘江 100 年一遇洪水
Run12	3470	37.64	浏阳河 10 年一遇洪水,湘江 200 年一遇洪水

(1) 水位影响分析

取典型组次(Run09)进行分析,由图 10~图 13 可知:工程后,北区河段水位略有增高。鸭嘴区堤防内退后,洪水期过流断面宽度显著增大,断面水位的横向分布发生重要变化,横向坡降变缓,凹岸水位总体高于凸岸,相比工程前,断面最大水位有所降低。对南区 and 十八墩而言,其过流断面虽有所减小,但位于主流区以外,且由于鸭嘴区流速减小,水面纵向坡

降减缓,弯道入口水域水位下降,使得其上游水域水位均有所下降。

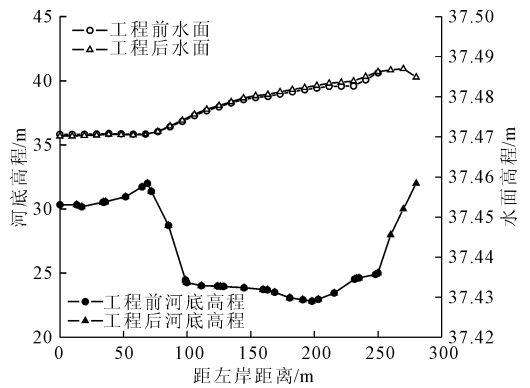


图 10 工程前后北区水位变化

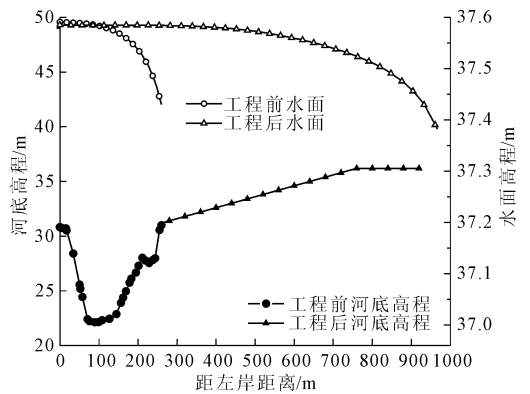


图 11 工程前后鸭嘴区水位变化

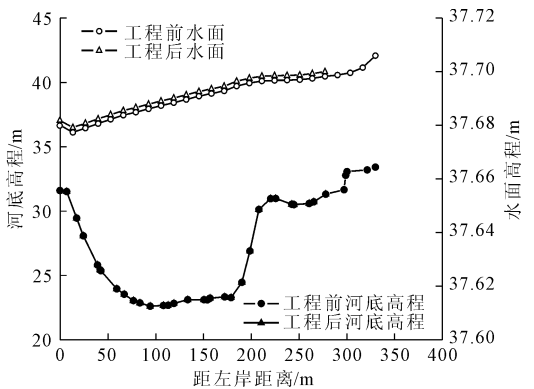


图 12 工程前后十八墩水位变化

(2) 流场影响分析

取典型组次(Run11)进行分析,由图 14~图 19 可知:北区岸线及地形变化较小,工程对北区整体流场影响较小,受上游弯道水流流速横向分布不均的影响,左岸流速增加,右岸流速减小。鸭嘴区为急弯河段,堤线内退,河宽急剧增加,在惯性作用下,水流主流流向发生较大改变,深泓区及凹岸流速减小幅度较大。南区和十八墩段虽占用部分水域,但均为

内弯滩地,位于主流区外,行洪时流速较小,对行洪贡献有限。

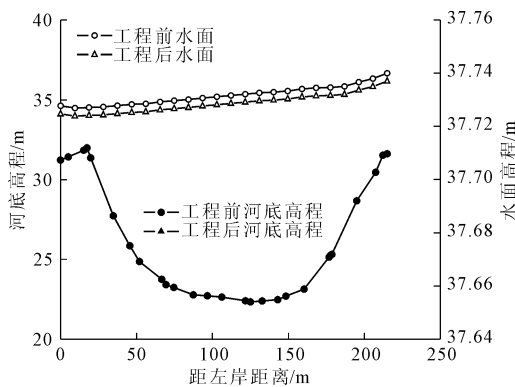


图 13 工程前后南区水位变化

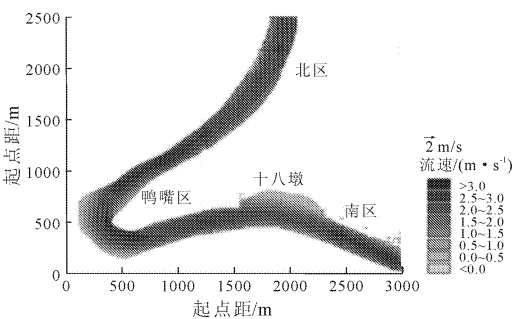


图 14 工程前流场图

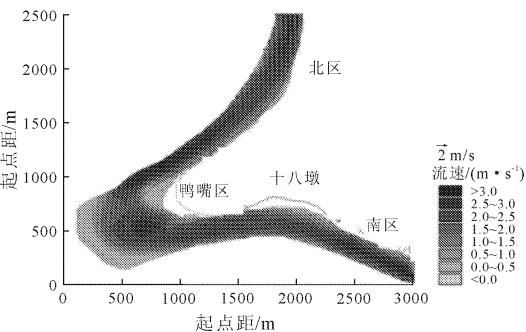


图 15 工程后流场图

(3) 冲淤变化分析

由流场分析可知,河岸边界及地形的变化引起部分水域流速流向发生明显的变化,进而对所在河道泥沙运动规律及冲淤演变产生相应的影响,流速

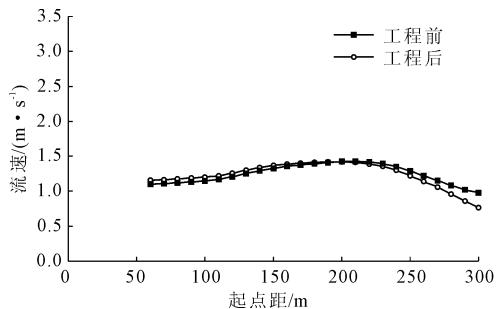


图 16 工程前后北区流速变化

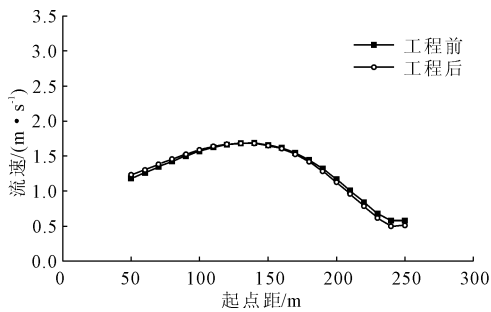


图 17 工程前后鸭嘴区流速变化

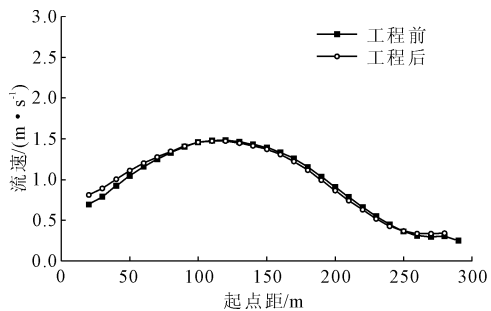


图 18 工程前后十八墩流速变化

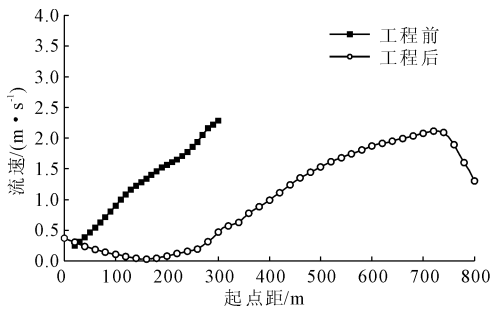


图 19 工程前后南区流速变化

流场变化分析表明:随着北区流速沿横向分布的变化,洪水期冲淤情势随之发生变化,床面形态有一定的调整,整体幅度不大。鸭嘴区流速流向变化较大,泥沙运动机床面冲淤均将发生重要变化,主要体现在:(1)弯道凹岸水域流速减小明显,可能造成局部淤积,淤积范围集中在原河道主流区;(2)堤防内退形成的新增过流水域水深较浅,工程后成为行洪主流区,流速显著增大,易造成冲刷,主要集中在凸岸浅滩滩头附近;(3)弯道凸岸出口段易形成回流区,可能造成局部淤积。南区 and 十八墩河段工程实施以后,河道水流流场分布变化不大,主流区流速略有增加,但幅度不大,不会造成明显的冲淤变化。

3 结 论

通过建立平面二维水流数学模型,采用 MIKE21 软件对浏阳河朝正坑急弯河段改造的影响进行了多工况模拟,主要结论如下:

(1) 对于弯曲河道, 尽管改造拓宽弯曲段, 在凸岸水流流速增大, 可能存在冲刷, 凹岸局部会产生淤积, 在近邻弯曲下游段凹岸局部还会产生水位壅高。

(2) 成果可直接作为河段规划设计的依据, 也可为类似工程提供借鉴。

要获得更精确的结果, 边界条件非常重要, 需要精确的河道水下和防洪堤的地形资料, 和合理的河床糙率参数。

参考文献:

- [1] 华祖林. 拟合曲线坐标下弯曲河段水流三维数学模型[J]. 水利学报, 2000, 31(1): 1-8.
- [2] 李艳红, 周华君. 弯曲河流三维数值模型[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2004, 19(Z1): 856-864.
- [3] 林小平, 凌建明, 苏华才, 等. 弯道水流的数值模拟及沿河路基冲刷机理分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(11): 1492-1496.
- [4] 许 栋, 刘召平, 乾爱国, 等. 弯曲河道中水流运动的三维数值模拟[J]. 水利学报, 2010, 41(12): 1423-1431.
- [5] 杨燕华, 白玉川. 连续弯道水流运动的三维数值模拟[J]. 泥沙研究, 2011(6): 46-49.
- [6] 吕岁菊, 冯民权, 李春光. 天然连续弯道中水流运动的三维数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2013(5): 10-16.
- [7] 史 莹, 江春波, 陈正兵, 等. 弯曲河道对水流流态影响数值模拟[J]. 水利学报, 2013, 44(9): 1050-1057.

- [8] 张海斌. 浏阳河流域水资源分析与评价[J]. 人民长江, 2011, 42(S2): 32-35, 41.
- [9] 李 剑. 二维不可压缩 Navier - Stokes 方程若干算法研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2007.
- [10] 邓敏艺, 刘慕仁, 孔令江. 二维对流扩散方程的格子 Boltzmann 方法模拟[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 1999, 17(3): 1-5.
- [11] 吴 巍, 孙文心. 渤海局部海域风暴潮漫滩计算模式—ADI 干湿网格模式在渤海局部海域风暴潮漫滩计算中的应用[J]. 青岛海洋大学学报, 1995, 25(2): 146-152.
- [12] 许 婷. MIKW21 HD 计算原理及应用实例[J]. 港工技术, 2010, 47(5): 1-5.
- [13] 郑志飞. MIKE21 模型在码头工程流场模拟中的应用研究[J]. 海峡科学, 2010(10): 104-106, 115.
- [14] Danish Hydraulic Institute. MIKE21 Flow Model: Hydro dynamic Module Scientific Documentation [M]. Denmark: Danish Hydraulic Institute, 2007.
- [15] 王万战, 董利瑾. 渤海流场基本特性的 MIKE21 模拟研究[J]. 人民黄河, 2007, 29(10): 32-33.
- [16] 孙德强, 胡 方, 姜国徽. MIKE21 模型在白浪河治理工程中的应用[J]. 水利科技, 2009(6): 25-28.
- [17] 李梓嘉, 董增川, 樊孔明, 等. MIKE21 模型在泗洪县城城区河网引水冲污工程中的应用[J]. 水电能源科学, 2012, 29(8): 100-103.

(上接第 9 页)

- [5] 李冠男, 邓居智, 陈 辉. 改进的 Dias 复电阻率模型在江西相山铀矿田中适用性研究[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(6): 732-740.
- [6] 余金煌, 陶月赞, 王铁强. 应用探地雷达法测量浅水域薄层抛石体厚度[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 214-216.
- [7] 江 凡, 林智勇. 瑞雷波在滑动面探测中的应用效果讨论[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2014, 42(2): 299-304.
- [8] 林向东. 瞬态瑞雷波法在铁路戈壁填料路基检测中的应用[J]. 兰州工业学院学报, 2014, 21(6): 52-55.
- [9] 李建慧, 朱自强, 曾思红, 等. 瞬变电磁法正演计算进展[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1393-1400.
- [10] 李 文, 牟 义, 张俊英, 等. 煤矿采空区地面探测技术与方法优化[J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(1): 102-

- 106.
- [11] 安 岩, 邹 建, 王玉凤, 等. 浅层折射波在覆盖层厚度探测中的研究及应用[J]. 勘察科学技术, 2011(5): 51-54.
- [12] 申建平. 折射波法应用于工程勘察的若干问题讨论[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(6): 655-658.
- [13] 孙茂锐. 折射波法探测断层的实例分析[J]. 工程地球物理学报, 2012, 9(6): 705-707.
- [14] 吕小彬, 吴佳晔, 王荣鲁, 等. 基于卓越波长的瞬态表面波法的应用[J]. 水利水电技术, 2014, 45(10): 86-94.
- [15] 寿 旋, 夏唐代. 重力对具有表面层的半空间中 Rayleigh 波的影响[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 191-194.
- [16] 中华人民共和国水利部. 堤防工程地质勘察规程: SL188 - 2005[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.