

基于 CCHE 模型的石门子渠首弯道水沙数值模拟

李园园¹, 牧振伟¹, 孙阳平², 贾亚非³

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐, 830052; 2. 新疆乌鲁木齐水业集团有限公司, 新疆 乌鲁木齐, 830000; 3. 美国密西西比大学 国家水科学及工程计算中心, 美国)

摘要: 采用 CCHE 2D 软件中的 $k-\varepsilon$ 闭合紊流模型, 对大西沟石门子渠首人工弯道段进行二维水沙数值模拟研究, 得到弯道水位横比降、典型断面泥沙冲淤形态、泥沙的横向输移现象以及泥沙冲淤后的河床变形, 并将断面泥沙冲淤形态与物理模型试验数据进行对比, 二者吻合较好, 并且符合弯道凹岸冲刷, 凸岸淤积的机理。通过对比分析可知, CCHE2D 软件在用于模拟弯道水沙运动时, 可充分展现弯道环流作用下的泥沙冲淤效果, 但对于横断面环流作用下的流速矢量分布及水沙变化过程还需借助三维软件。

关键词: CCHE 2D 软件; 弯道水沙; 冲淤形态; 数值模拟

中图分类号: TV146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2014)06-0207-03

Numerical simulation of water and sediment in Shimenzi bend headwork based on CCHE model

LI Yuanyuan¹, MU Zhenwei¹, SUN Yangping², JIA Yafei³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052;

2. Water Industry group co., LTD, Urumqi, Xinjiang 830000;

3. Nation Center for Computational Hydrosience and Engineering, the University of Mississippi, Oxford, USA)

Abstract: Using the $k-\varepsilon$ closure turbulence model in CCHE2D software, This paper simulate the water and sediment movement in artificial bend of the Shimenzi headwork at Daxigou. Furthermore, we get the transverse slope of water surface, the sediment scouring and deposition patterns of typical sections, the sediment of lateral transport phenomena and the riverbed deformation after sediment deposition. Compare the numerical simulation results about the sediment scouring and deposition patterns of sections with the experimental data. The result is good and in line with the mechanism of the concave bank erosion, convex bank deposit. Analysing of the results predicted showed that the CCHE2D software used to simulate the curve of water and sediment, can fully demonstrate the sediment scouring and deposition patterns under the effect of the circulation flow. But for the cross-sectional velocity vector distribution and the water and sediment change process under the effect of the circulation flow, three-dimensional software is needed.

Key words: CCHE 2D software; water and sediment; the scouring and deposition patterns; numerical simulation

自然界的河流一般都携带着泥沙, 泥沙防治是河道整治中一直关注的问题。新疆河流含沙量较大, 泥沙冲淤、磨损问题尤为严重, 同时泥沙处理问题也成为多沙河流渠首工程设计中的关键问题^[1]。在新疆, 弯道式渠首运用广泛, 主要在弯道环流的作用下, 使泥沙在凸岸淤积, 凹岸冲刷, 从而达到引水输沙的目的^[2]。

在弯曲河道中, 数学模型可用于模拟弯道水流特性和泥沙冲淤规律, 弄清楚河流弯道处的水流结构^[3-5]。另外, 在模型试验中针对不同工况, 利用数值模拟可节约时间, 减少人力和物力、财力的耗费, 其结果亦可为弯道式渠首设计提供理论指导。

1 工程概况

石门子渠首位于乌鲁木齐河流域峡谷出口处,

收稿日期: 2014-10-10; 修回日期: 2014-11-11

基金项目: 新疆维吾尔自治区国际科技合作计划资助项目(20136021)

作者简介: 李园园(1989-), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向: 环境水力学。

通讯作者: 牧振伟(1973-), 男, 河南南阳人, 硕士, 教授, 从事水力学及河流动力学研究。

距乌鲁木齐市 60 km、青年渠渠首 10 km,主要代替原有的青年渠渠首和大西沟渠首引水,以满足乌鲁木齐河上游灌区用水及乌拉泊水库、西山水厂输水,确保乌鲁木齐市工农业及城市用水。

石门子渠首主要由左右岸导流护堤、泄洪闸、人工弯道、冲沙闸及进水闸组成,包括进水闸 3 孔,设计流量 $35 \text{ m}^3/\text{s}$;冲沙闸 3 孔,设计流量 $48 \text{ m}^3/\text{s}$;泄洪闸 3 孔,设计流量 $172 \text{ m}^3/\text{s}$ 。模型模拟长度约为 750 m,上游河道段约 300 m,弯道枢纽布置约 250 m,下游河道约 150 m。重点研究渠首人工弯道内的泥沙冲淤情况,在实验室的物理模型中,将泄洪闸关闭,使水流全部流过人工弯道,流量设为 $40 \text{ m}^3/\text{s}$,几何比尺为: $\lambda_l = 30$,流量比尺为: $\lambda_Q = 4929.5^{[6]}$ 。其弯道枢纽布置见图 1 所示。

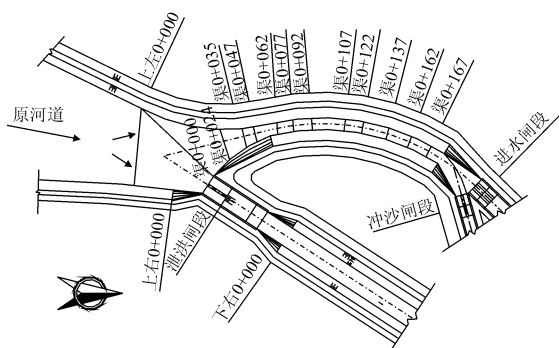


图 1 弯道枢纽平面布置图

2 数学模型

2.1 CCHE 模型

CCHE 是针对一般自由水面模拟分析的数学模型,由美国密西西比大学国家水科学及工程计算中心开发研制,该模型采用隐式时间推进有效元素法,用较粗网格求解连续方程式,用速度校正法来求解系统方程式,对于干湿点问题采用移动边界法来处理^[7-8]。

2.2 控制方程

研究采用 $k-\varepsilon$ 闭合紊流模型,泥沙分别满足连续方程、动量方程、能量方程、 k 方程、 ε 方程,在此不加以赘述,主要补充泥沙颗粒自身方程,这里主要考虑推移质泥沙,故不考虑悬沙对流扩散。

则推移质输沙率公式^[9-10]:

$$q_{bk} = \frac{Q_{bk} q^{m_b}}{\int_0^B q_{m_b} dy}$$

河床变形公式:

$$(1-p') \frac{\partial Z_{bk}}{\partial t} = (q_{tk} - q_{t*})/L_t$$

式中: q 为每个节点上的指定流量; m_b 是经验系数; p' 为床沙的孔隙度; q_{tk} 为实际输沙率; q_{t*} 为床沙质的输沙能力; L_t 为床沙质的适应长度。

2.3 计算模拟区域及网格划分

数学模型是以石门子渠首的水工模型为基础建立的,数值模拟的建模部分,是对物理模型的弯道段进行概化得到的,模拟范围包括整治段和弯道段。

网格划分时,分别设定 I、J 方向的节点,若网格太粗会导致计算结果不精确,太细则会加大计算量。因此,在保证计算精度的前提下,最终确定网格数量为 1 600 个 (20×80),再采用 RL 正交网格及 RL 正交网格(带光滑函数)两种方法对网格进行优化。

2.4 边界条件设置

定义 J 为顺水流方向,对于进口边界设定总流量 $Q = 0.0081 \text{ m}^3/\text{s}$,泥沙采用以推移质为主的全沙模型,故仅导入推移质泥沙输沙量,泥沙粒径分别设为 0.0003、0.0005 mm。对于出口边界设定出口水面高程为 1 748.065 m 即可。固壁滑移系数设为 0.5。

3 结果对比及分析

数值模拟得到了石门子渠首人工弯道段在进口水深 h 为 0.065 m、流量 Q 为 $0.0081 \text{ m}^3/\text{s}$ 下的水位横比降、典型断面冲淤形态、泥沙的横向输移现象及泥沙冲淤后的河床变化图,将断面冲淤形态结果与物理模型试验数据进行对比分析。

3.1 水位横比降

图 2 为水流流经人工弯道段的水面高程分布,图中蓝色代表水面高程为 1 748.06 m,红色代表水面高程为 1 748.10 m,由红色向蓝色渐变即为水面高程降低的过程。图中可看出,水流进入弯段后,在离心力作用下,打破自由水面的平衡状态,产生水面横比降^[11]。在出口末端,受闸门出口水深的限制,在弯道尾部水面高程均降低。

3.2 典型断面冲淤形态

分别提取各特征断面的数值模拟数据,得到泥沙冲淤后的河床高程,并将其与实测数据对比分析,图 3 即为泥沙冲淤后典型断面河床高程的数值模拟结果及实测结果对比,图中 a_1 、 b_1 为数值模拟计算结果, a_2 、 b_2 为模型实测的结果。图中左侧均为凹岸,右侧均为凸岸。

由图 3 的 a_1 、 a_2 可知,泥沙进入弯道前期在断面 0+77 处,表现为冲淤平衡的状态,砂带较为均匀; b_1 、 b_2 为泥沙进入弯道中后期,即断面 0+122.5 处的冲淤结果,可以看出,泥沙在经过弯道一段距离

后冲沙效果明显,在弯道环流的作用下,呈现出凹岸冲刷凸岸淤积的现象。

经对比两个典型断面数值模拟结果与物理模型试验结果相吻合,并且符合弯道水沙冲淤基本规律。

3.3 泥沙横向输移

图 4、5 分别表示不同时刻弯道泥沙的分布,图中可看出随着计算时间的增加,凹岸泥沙因水流冲刷而减少,凸岸泥沙量增多逐渐淤积,在弯道横断面

上发生输移现象。同时,泥沙的淤积带也因水流的冲刷作用而推移,逐渐向着凸岸顶部移动。

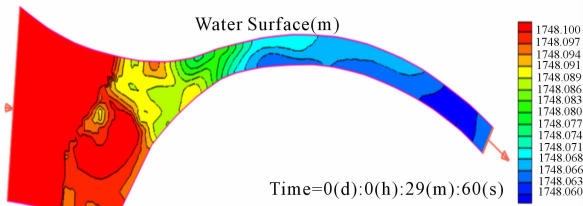


图 2 人工弯道段水面高程

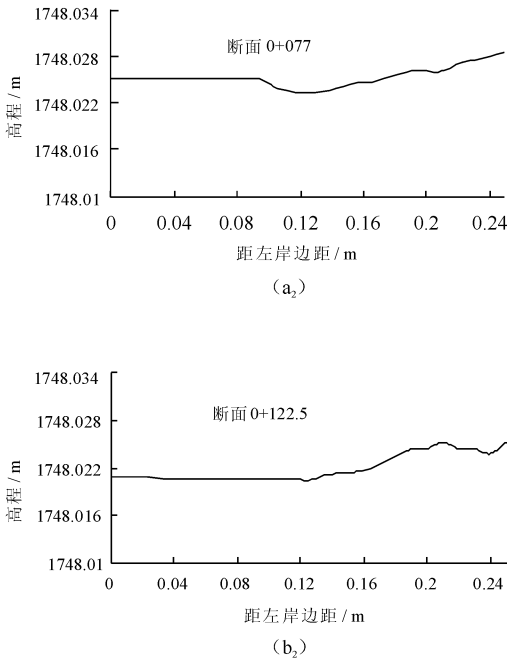
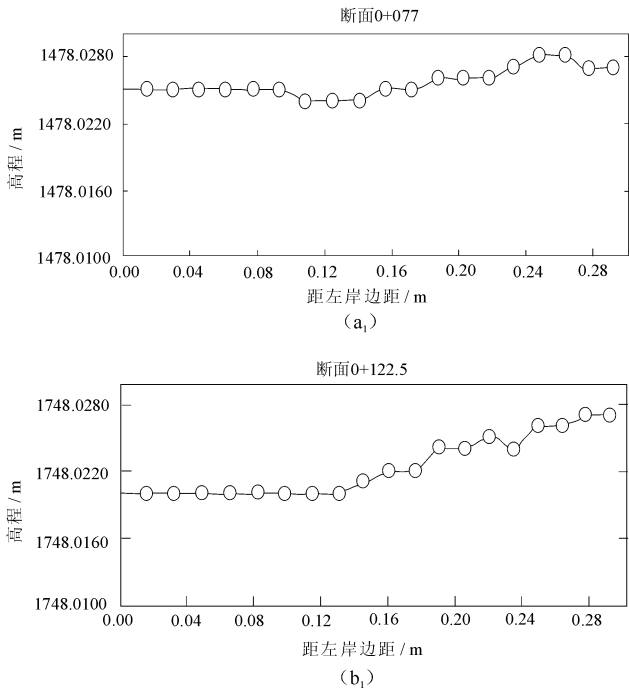


图 3 典型断面泥沙冲淤后河床高程数值模拟结果及实测结果图

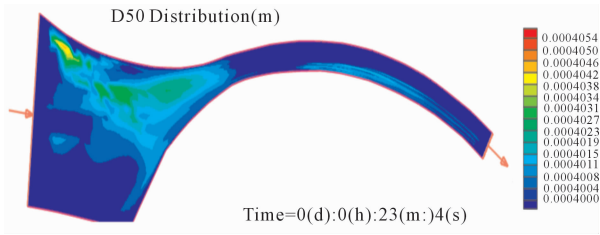


图 4 $T = 1\,384\text{ s}$ 泥沙分布图(单位:m)

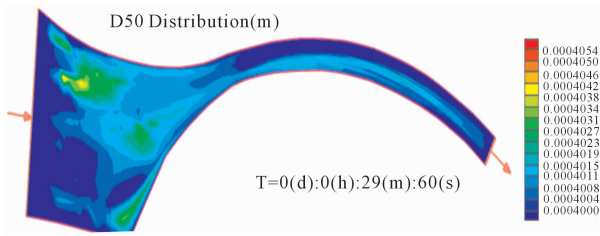


图 5 $T = 1\,800\text{ s}$ 泥沙分布图(单位:m)

3.4 冲淤后河床变化

图 6 为泥沙冲淤后的河床形态图,图中最小值蓝色为 0 m,最大值红色为正值 0.05 m,模型模拟时间为 1 800 s,河床属性为不可冲刷。

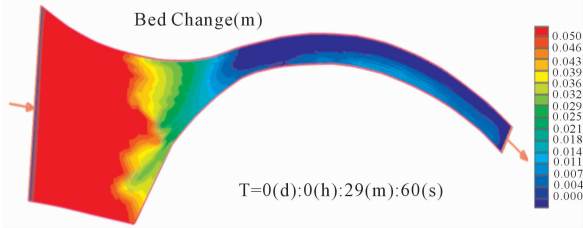


图 6 泥沙冲淤后的河床变化(单位:m)

由图可直观看出,由于采用均匀输砂的原理,在弯道的进口处,河床变化较大即泥沙淤积较多,在泥

(下转第 214 页)

寻踪回归 (PPR) 能定量分析各因子对悬栅消能工的影响,并能迅速找出影响因子优化区间。悬栅消力池内最大水深影响因子排序为悬栅数量 n_s > 栅距 b_s > 栅高 h_s ; 在设计流量 $Q = 8 \text{ L/s}$ 条件下,栅高 $h_s = 9 \text{ cm}$ 、栅距 $b_s = 5 \text{ cm}$ 和 $n_s = 16$ 的优化组合可将未设置悬栅的消力池内最大水深由 20.068 cm 消减到优值 18.233 cm ,降幅可达 9.14% 。

(2) 新疆多沙河流水利枢纽工程中消力池的均匀正交试验设计及投影寻踪回归试验,对系统而深入地研究悬栅消能工有重要意义,为后续深入研究悬栅消力池提供一定的理论基础。

参考文献:

- [1] 邱秀云,侯杰,王 铨. 无压隧洞洞内消能试验研究[J]. 新疆农业大学学报,2004,27(3):62-65.
- [2] 李凤兰,侯杰,邱秀云,等. 悬栅消力池消能特性的试验研究[J]. 新疆农业大学学报,2006,29(1):63-66.
- [3] 侯杰,赵涛,牧振伟,等. 悬栅消能率的 PPR 因子贡献率分析及优化仿真[J]. 水力发电,2005,31(2):38-40+64.

- [4] 邱秀云,赵涛,牧振伟,等. 悬栅消能率的投影寻踪回归因子贡献率分析及多因子优化组合仿真[J]. 新疆农业大学学报,2003,26(3):8-12.
- [5] 李虹瑾,魏敏,侯杰. 隧洞洞内新型消能试验研究[J]. 东北水利水电,2007,25(11):56-58.
- [6] 吴战营,牧振伟,潘光磊. 导流洞出口消力池内设置悬栅消能工试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(4):39-41+104.
- [7] 吴战营,牧振伟. 辅助消能工联合运用试验研究及数值模拟[J]. 中国农村水利水电,2013(7):111-117.
- [8] 李园园,牧振伟,吴战营,等. 新疆五一水库消力池悬栅消能水流水力特性数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(6):61-63+101.
- [9] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [10] 任露泉. 试验优化设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2003:481-505.
- [11] 郭鹏飞,何建新,刘亮,等. 浇筑式沥青混凝土配合比设计优选方法研究[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(4):42-46.

(上接第 209 页)

沙进入弯道中段后,河床凹岸呈现蓝色,其变化为 0,凸岸呈浅蓝色大致淤积了 0.014 m 厚的泥沙,整体呈现出凹岸冲刷,凸岸淤积的规律。

4 结 语

(1) 利用 $k-\varepsilon$ 闭合紊流模型对大西沟石门子渠首人工弯道段进行水沙数值模拟,提取数据并分析,得到水位横比降、典型断面处的泥沙冲淤高程、泥沙的横向输移现象及泥沙冲淤后的河床形态,将断面处的泥沙冲淤形态与实测结果进行对比,吻合较好且符合弯道冲淤规律。

(2) 弯道水沙本身具有三维特性,采用 CCHE 2D 模拟弯道,可通过读取河床变形及软件自带的历史记录文件等得到环流作用下的特殊现象及结果,并且与基本规律一致,大大缩短了数值模拟时间。但对于弯道横断面环流作用下的流速矢量分布图及其水沙变化过程,仍需借助三维软件来模拟。

参考文献:

- [1] 李山,卫树藩,严孝达,等. 新疆弯道式渠首引水防沙技术研究[J]. 中国水利,2003,(8):54-56.

- [2] 王庆,郭德发. 新疆人工弯道式引水枢纽的设计与运行[J]. 人民长江,2004,35(1):13-14.
- [3] 易雨君,王兆印,张尚弘. 考虑弯道环流影响的平面二维水沙数学模型(1)——模型的建立[J]. 水力发电学报,2010,29(1):127-132.
- [4] 钱宁. 河床演变学[M]. 科学出版社,1987.
- [5] 张瑞瑾. 水利工程. 河流泥沙动力学[M]. 水利电力出版社,1989.
- [6] 杜丽霞. 典型弯道水流中的水沙二相流三维数值模拟研究[D]. 新疆:新疆农业大学,2013.
- [7] 陆永军,张华庆. 推移质运动的二维数学模型[J]. 水动力学研究与进展:A 辑,1994(003):284-294.
- [8] 叶克家,陈弘由,王书益,等. 美国国家计算水科学及工程中心河道变迁模式之引进及应用研究[A]. 第十三届海峡两岸水利科技交流研讨会,2009.
- [9] 刘玉玲,刘哲. 弯道水流数值模拟研究[J]. 应用力学学报,2007,24(2):310-312.
- [10] Chao Xiaobo, Jia Yafei, A. K. M. Azad Hossain. Numerical Modeling of Salinity, Sediment and Algal Biomass in Lake Pontchartrain, Louisiana [C]. International Conference on Environmental Pollution and Public Health, China, Shanghai.
- [11] 李爱香,孙一,赵小娥,等. U 形弯道水流试验及其数值模拟[J]. 长江科学院院报,2009,26(9):29-31.