

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2015.06.007

李茜希, 韩昌海, 李艳富, 等. 河床取料对枢纽通航水流条件的影响[J]. 水利水运工程学报, 2015(6):47-53. (LI Qian-xi, HAN Chang-hai, LI Yan-fu, et al. Influence of riverbed material excavating field on entrance area navigation conditions[J]. Hydro-Science and Engineering, 2015(6):47-53.)

河床取料对枢纽通航水流条件的影响

李茜希^{1,2}, 韩昌海¹, 李艳富¹, 杨 宇¹

(1. 南京水利科学研究院 交通运输部通航建筑物建设技术行业重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 开挖河床料场使河床地形突变, 可导致枢纽通航水流条件发生较大变化。基于 SMS 软件, 以 Navier-Stokes 方程为数学模型基础, 采用加权余量伽辽金有限元求解方法, 对澜沧江橄榄坝枢纽工程上下游河床有无取料场的水流流场进行数值模拟, 分析取料场对水流流场和枢纽通航水流条件的影响。分析表明, 取料场对上下游口门区通航水流条件有一定影响, 但对上游影响较小, 对下游影响较为明显。具体体现为上游取料场对主流流向、口门区回流范围无大的影响, 但稍许降低断面流速; 下游取料场改变下游主流方向, 使主流偏离引航道口门区, 有效降低了口门区斜向水流流速, 水流平顺, 有利于船舶航行。模拟结果表明, 橄榄坝枢纽河床取料对通航有利, 为工程设计提供了关键的技术支撑。

关键词: 河床取料; 口门区; 水流; 数值模拟; 模型验证; 通航条件

中图分类号: TV135.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2015)06-0047-07

水利水电工程砂石料场的类型分为岩石料场和天然砂石料场, 而天然砂石料场又包括陆地料场、河滩料场和河床料场。砂石料场的选择和布置在施工中发挥极为关键的作用, 与工程的质量、投资及工期有直接关系^[1]。澜沧江橄榄坝枢纽附近河床天然砾石具有抗剪强度高, 压缩性强等特点, 开采工艺要求不高, 且运输方便, 是很好的筑坝材料, 因此确定河床料场是橄榄坝枢纽最佳料场。河床取料场可导致河床地质、水文情况发生很大变化, 取料场上游可能会出现跌水曲线, 因此, 通过模型分析取料场对通航条件影响具有重要意义。本文基于 SMS 软件的数值模拟方法, 对上下游河床有无采料场的水流流场进行模拟, 并通过 1:50 比尺的整体物理模型试验对数学模型进行验证, 分析采料场对水流流场和枢纽通航水流条件的影响。

1 工程概况

橄榄坝梯级电站是澜沧江中下游水电规划两库八级中的第七级, 坝址控制流域面积约 15.18 万 km², 多年平均流量 1 870 m³/s。工程采用河床式开发, 由拦河坝、泄水建筑物、电站厂房、船闸及过鱼建筑物组成, 最大坝高 60.5 m, 坝顶高程▽558 m, 坝顶总长 458 m, 枢纽建筑物按“一”字型布置, 为 II 等大(2)型工程。通航建筑物为单线单级船闸, 船闸级别 IV 级, 布置在右岸, 上游引航道主导航墙长约 250 m, 下游引航道主导航墙长约 323 m。设计最大通航流量 8 640 m³/s, 最小通航流量 504 m³/s。枢纽上下游取料场沿河道左岸布置为不规则多边形。上游采料场最大宽度 97 m, 长 500 m, 开挖面积 70 500 m², 开挖深度 15 m, 距上游引航道最短距离 100 m; 下游采料场最大宽度 150 m, 长 870 m, 开挖面积 106 300 m², 开挖深度 15 m, 距下游引航道最短距离 33 m, 如图 1 所示。

收稿日期: 2015-02-02

基金项目: 南京水利科学研究院基本科研业务费专项资金资助项目(Y115015)

作者简介: 李茜希(1990—), 女, 四川广汉人, 硕士研究生, 主要从事通航水力学研究。E-mail: 1140469878@qq.com

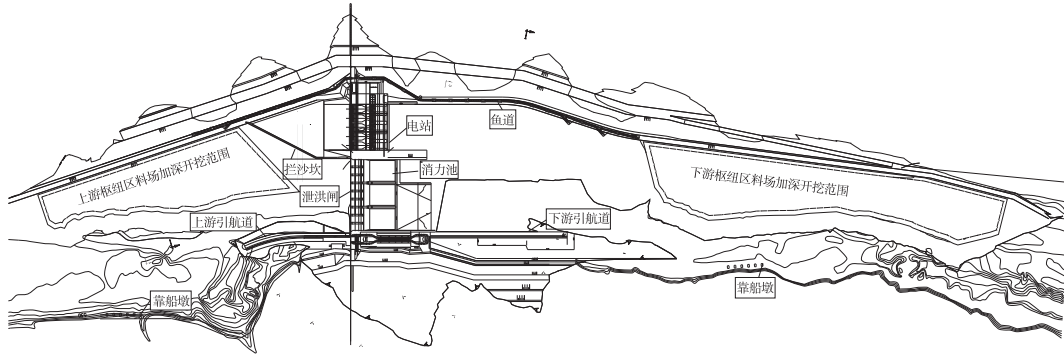


图 1 橄榄坝枢纽及取料坑布置

Fig. 1 General layout of Ganlanba hydropower complex

2 基于 SMS 软件的数值模拟方法

本次工程所在区域流场计算采用 SMS 中的 RMA2 模块。RMA2 为平面二维有限元水动力分析模型,该模块是计算非恒定流、恒定流条件下水位和二维流速的通用模块。RMA2 模块是以雷诺形式 Navier-Stokes 方程为基础,以加权余量伽辽金有限元为基本求解方法^[2],计算出整个研究区域的水位、流量及二维流速。其基本控制方程采用沿水深积分的二维连续方程和动量,形式如下^[3-4]:

$$\text{连续方程:} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x, y 方向动量方程:

$$h \frac{\partial h}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} (E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) + gh (\frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{gun^2}{(1.486h^{1/6})^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos\psi - 2hwv \sin\varphi = 0 \quad (2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} (E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) + gh (\frac{\partial z}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{gvn^2}{(1.486h^{1/6})^2} + (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \sin\psi - 2hwu \sin\varphi = 0 \quad (3)$$

式中: h 为水深; u, v 分别为 x, y 方向流速; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; E 为涡黏系数; z 为河床高程; n 为曼宁系数; ζ 为风应力系数; V_a 为风速; ψ 为风向; ω 为地球自转角速度; φ 为纬度。

根据所研究问题确定模型为枢纽坝址上下游局部模型,上、下游模拟长度应包括坝址石料场开采范围,不影响工作段流态和上、下游引航道口门区流态的范围,最终确定上游模型范围为从坝轴线以上 1.0 km,下游模型范围为从坝轴线以下 1.5 km。上、下游计算网格如图 2 所示。橄榄坝枢纽的入流和出流边界为开边界,陆地边界为闭边界,出口边界条件由天然情况下坝址处水位流量关系确定。

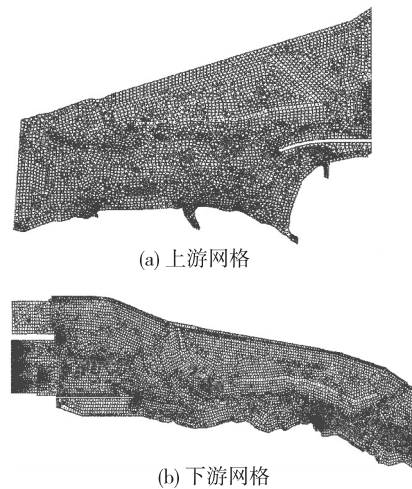


图 2 模型计算网格

Fig. 2 Calculation grids of a tidal current model

3 模型验证

水动力数学模型能否准确反映水流的各项特性,主要取决于该数学模型所得的水位和流速与实测数据是否吻合。水位验证采用流量 4 870 和 8 640 m³/s 两个工况计算值与物理模型进行比较(表 1);而流速验证将流量 8 640 m³/s 上下游采料场均保留时,上游口门区、距上游口门 150 m、下游口门区、距下游口门 150 m 共 4 个断面的物理模型(1:50 实测数据)与数学模型(计算数据)相比较(图 3)。其结果表明:计算水位与实测值差别较小,最大误差为 0.06 m;大部分计算水面流速与实测值能够吻合,部分有一定差异,尤其是下游主流流速误差稍大,这是因为下游入流断面上给定的是流速均匀分布的边界条件,与实际流速分布有一定差距^[5],但仍在合理范围内。因此该数学模型适用于橄榄坝枢纽的水流流场数值模拟。

表 1 水位验证
Tab. 1 Verification results of water level

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	位置	距坝轴线距离/m	物理模型实测数据/m	数学模型/m	误差/m
4 870	上游	200	532.88	532.92	0.04
	下游	200	532.66	532.65	-0.01
8 640	上游	200	537.84	537.9	0.06
	下游	200	537.34	537.31	-0.03

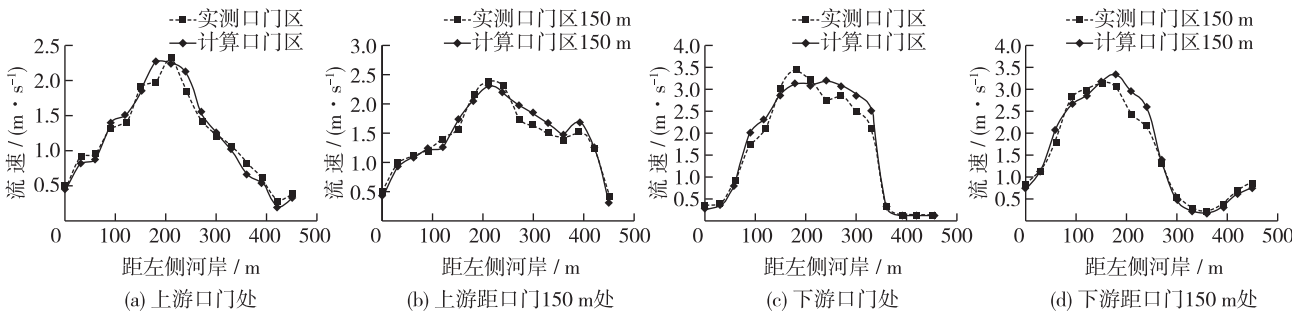


图 3 流量 8 640 m³/s 流速验证
Fig. 3 Verification of velocity for discharge of 8 640 m³/s

4 取料场对通航水流条件影响分析

通航水流条件主要是指:水流的表面流速、流态。水流条件影响船舶运动形态,转舵、刹车等操作的效果。若表面流速过大,上行船舶(队)的推力将不能克服逆流阻力而上行;下行船舶(队)的舵效也难以发挥,造成船舶操纵困难^[6]。开采取料场可能会对通航水流条件产生重大影响。根据船闸设计通航要求,Ⅳ级航道上下游引航道口门区的流速应满足:口门区水流条件控制指标:纵向流速≤2.0 m/s,横向流速≤0.3 m/s,回流流速≤0.4 m/s^[7]。橄榄坝梯级电站主要承担反调节、通航、发电任务,设计最低通航流量为 504 m³/s,最大通航流量为 8 640 m³/s,当来流量超过 8 640 m³/s 时,泄水闸闸门敞开泄洪,基本恢复天然行洪,河道不再通航,因此数学模型选用 504,2 625.5,4 870 和 8 640 m³/s 4 个典型流量进行对比分析。

4.1 上游有无采料场对比分析

图 4 对比了流量 8 640 m³/s 闸门敞泄情况下上游有无采料场的水流流态,由图可知,上游取料场存在与否对主流流向、口门区回流范围大小无大的影响。图 5 对比了流量 8 640 m³/s 闸门敞泄情况下,上游有无采料场时口门附近断面流速变化规律,由于取料场的存在使有效过水面积增大,断面流速会有所降低,但变化幅度不大。

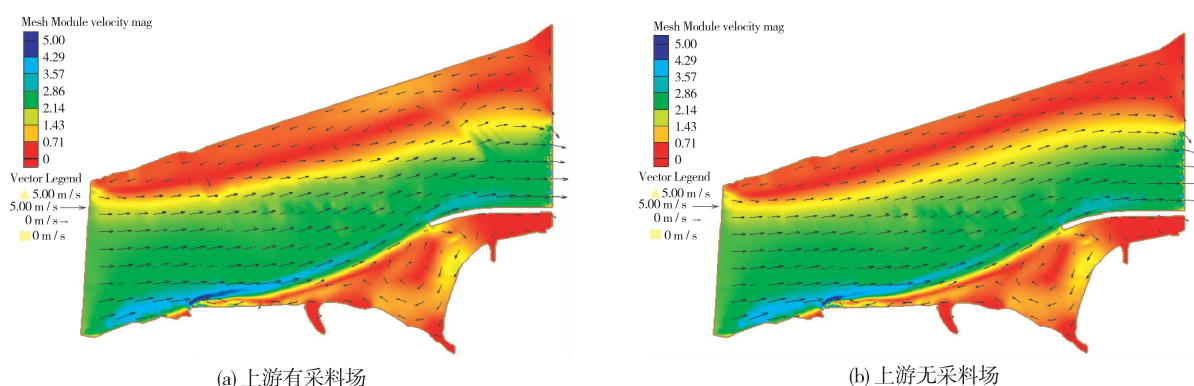
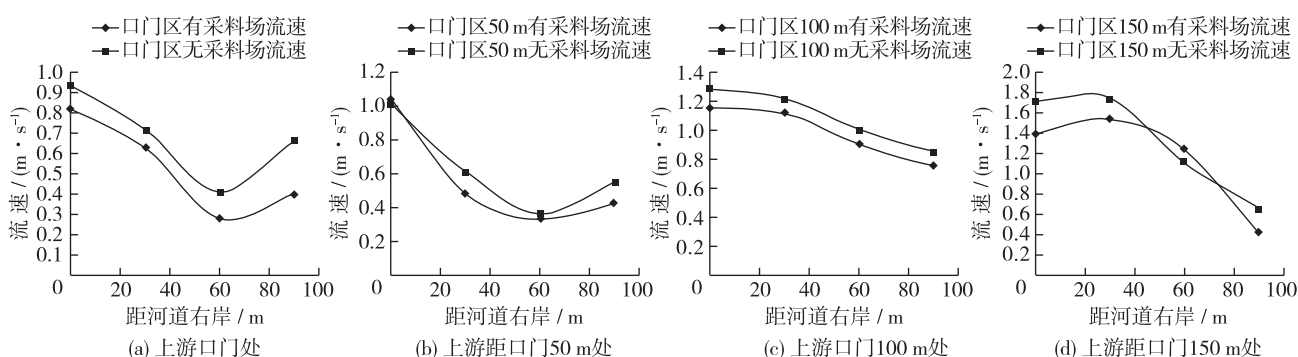
图 4 流量 $8\,640\text{ m}^3/\text{s}$ 上游流态Fig. 4 Flow fields of $8\,640\text{ m}^3/\text{s}$ 图 5 流量 $8\,640\text{ m}^3/\text{s}$ 时上游有无采料场口门附近断面流速变化

Fig. 5 Velocity variation of entrance area and nearby area

4.2 下游有无取料坑对比分析

本文对比分析了闸门敞泄时流量 504 和 $8\,640\text{ m}^3/\text{s}$ 两种工况有无取料场时口门附近水面比降,其结果表明:口门区及其连接段附近水面比降不大,不同工况有无取料场变化均不明显,取料场开挖前后口门区及连接段水面平顺,对通航没有不利影响。

口门区及连接段位于引航道静水与河道动水的交界处,受引航道边界的影响,河道在下口门区过水断面拓宽,导致河道水流扩散,形成斜向水流^[8],斜向水流的横向流速分量过大会使航行船舶(队)产生横漂和扭转,威胁船舶(队)安全进出引航道,从而造成碍航或断航^[9],斜流长期冲击淘蚀河岸,可能会影响河岸边坡稳定。图 6 对比了流量 $504, 2\,615, 4\,870$ 和 $8\,640\text{ m}^3/\text{s}$ 共 4 个工况闸门敞泄情况下下游有无采料场的水流流态。结果表明,无采料场时口门区出口处斜流偏向右岸,4 种流量工况下,最大斜流流速分别约 $0.6, 1.4, 2.3$ 和 3.0 m/s 。

各级流量下有无采料场流速变化情况详见表 2。由于下游采料场都具有较大规模(最大宽度 150 m , 长度 870 m , 开挖面积 $106\,300\text{ m}^2$, 开挖深度 15 m), 明显改变河道的地形条件,降低了部分河床高程,增大了水流有效过水面积,致使整个断面流速稍有降低,各工况下游口门区回流范围有所缩小,横向流速略微减小。以上由采料场引发的水流条件变化有利于船舶航行。有采料场时拓宽了主河道水流过水断面高程,使得水流主流偏向主河道方向,故采料场对水流表现出一定的吸附作用;无采料场各工况下口门区及其附近水流较为平顺,仅在中、大流量(流量 $4\,870$ 和 $8\,640\text{ m}^3/\text{s}$) 时存在较小范围的回流,这主要是由下游引航道以及河道右岸边界条件变化引起的;而有采料场时流量 $4\,870$ 和 $8\,640\text{ m}^3/\text{s}$ 两个工况在距离口门区 330 m 左右的

河岸右侧形成明显回流,回流位置下移,回流范围及强度均随流量的增大而增大,减少了河道右岸的冲刷。这是由于采料场存在时,采料场进口断面水流发生局部扩散,会产生水流分离现象。在水流分离面上出现摩擦力,在摩擦力作用下,分离面水体随主流一起向下游运动,为了填补留下来的空隙,岸边附近的水体必将流进来补充,由此将主流方向引向主河道而在岸边附近形成一个封闭的水流系统即回流^[10],此时的回流主要控制因素为采料场的边界条件。

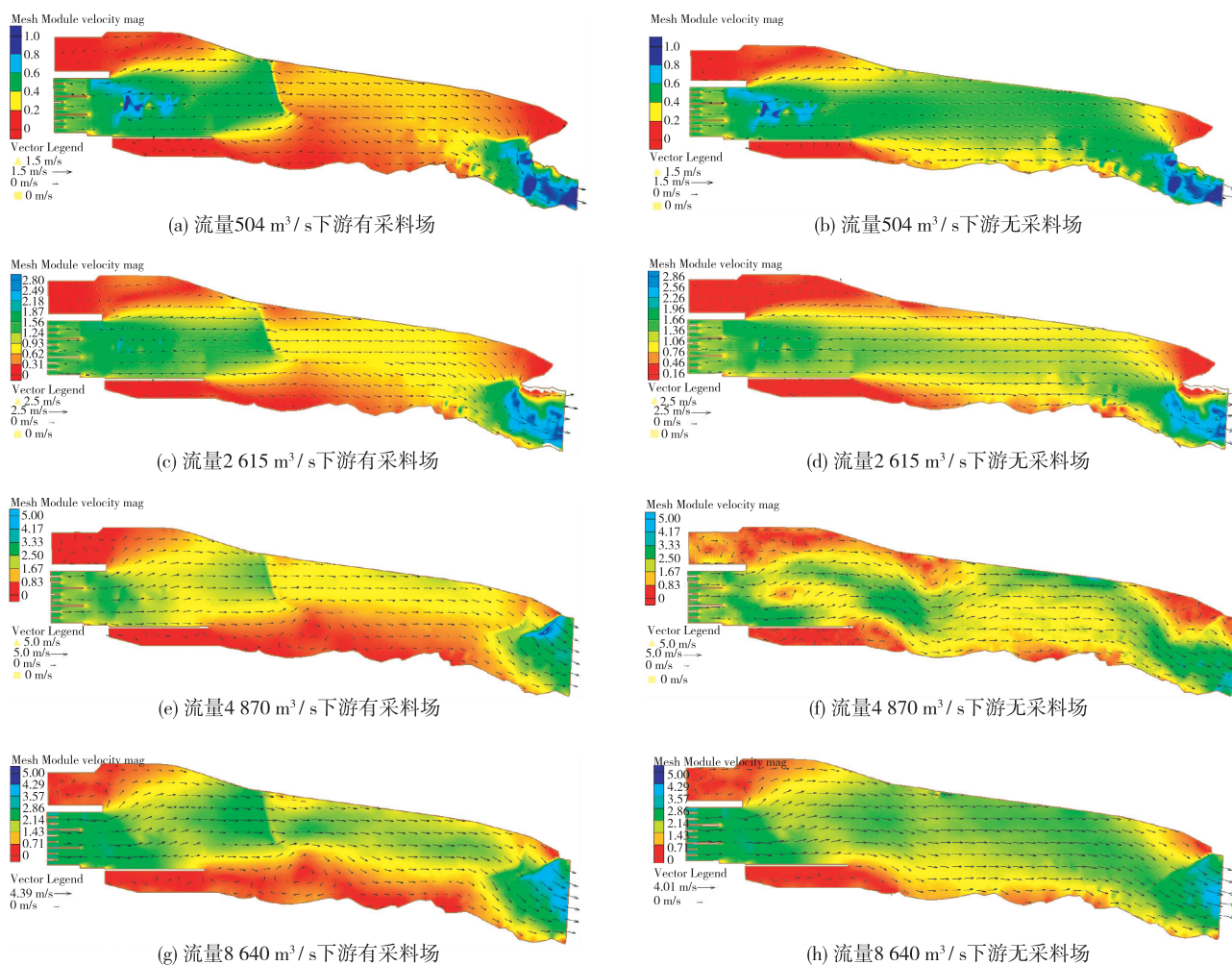


图6 各流量下游有无取料场水流流态

Fig. 6 Downstream flow fields with and without material excavating field

表2 各级流量下流速对比

Tab. 2 Comparison of velocities of entrance area under different discharges

流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	有采料场			无采料场		
	最大纵向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大横向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大回流流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大纵向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大横向流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大回流流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
504	0.28	0.13	0.29	0.32	0.23	0.28
2 615	0.38	0.10	0.31	0.57	0.31	0.35
4 870	1.56	0.26	0.39	2.14	0.42	0.74
8 640	1.71	0.32	0.85	2.20	0.83	0.83

5 结 语

本文基于流体计算软件 SMS,以橄榄坝枢纽为例,模拟其上下游河道有无采料场所引起的流态、流速分布变化,结果表明:

(1)有无采料场对上下游口门区通航水流条件有一定影响,但对上游影响较小,对下游影响较为明显;其影响主要体现在口门区流速、流态变化,而水面比降变化不大。

(2)有无上游采料场对主流流向、口门区回流范围大小没有明显影响,断面流速有所降低。

(3)下游采料场对下游口门区流态有一定调整作用,具体表现在:使主流向左岸偏离;流量较大时在距离口门区 330 m 左右的河岸右侧形成回流;减小口门区回流范围,平顺口门区水流;口门区横向流速略微减小,有利于船舶航行。

(4)橄榄坝枢纽河床取料对通航有利,从通航角度考虑此方案可行。

参 考 文 献:

- [1] 文宁. 水利水电工程中砂石料场优化选择研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2003. (WEN Ning. On optimizing selection of the place for sand & stone in project of hydraulics and electric power[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2003. (in Chinese))
- [2] 陈春燕, 汤子扬, 张丽萍. SMS 软件 RMA2 模块固边界的处理研究[J]. 水电能源科学, 2008, 26(5): 68-70. (CHEN Chun-yan, TANG Zi-yang, ZHANG Li-pin. Research on internal boundary condition in RMA2 module of SMS software[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(5): 68-70. (in Chinese))
- [3] 朱文瑾, 罗峰, 李瑞杰. 日照港二维潮流数值模拟[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004(32): 264-267. (ZHU Wen-jin, LUO Feng, LI Rui-jie. Simulation of 2-D tidal current field for Rizhao harbor[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 2004(32): 264-267. (in Chinese))
- [4] 汪德燿. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. (WANG De-guan. Computational hydraulics theory and application[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1989. (in Chinese))
- [5] 李冰冻, 李克峰, 李嘉, 等. 天然河段港口工程三维流场数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2006(2): 24-28. (LI Bing-dong, LI Ke-feng, LI Jia, et al. Numerical simulation of 3-D flow for harbor engineering in natural rivers[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(2): 24-28. (in Chinese))
- [6] 缪吉伦, 张晓明, 王召兵. 桥梁建设对内河通航条件影响研究[J]. 水运工程, 2004(9): 66-69. (MIAO Ji-lun, ZHANG Xiao-ming, WANG Zhao-bing. Influence of bridge construction on river's navigation condition[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(9): 66-69. (in Chinese))
- [7] GB 50139—2004 内河通航标准[S]. (GB 50139—2004 Navigation standard of inland waterway[S]. (in Chinese))
- [8] 黄伦超, 李伟, 肖政. 河岸形态对低水头枢纽船闸口门区水流条件影响研究[J]. 水运工程, 2006(11): 53-57. (HUANG Lun-chao, LI Wei, XIAO Zheng. Influence of different riverside shape on flow condition of low-head hydraulic lock's outlet area[J]. Port & Waterway Engineering, 2006(11): 53-57. (in Chinese))
- [9] 陈辉, 刘志雄, 江耀祖. 引航道通航水流条件数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 13-18. (CHEN Hui, LIU Zhi-xiong, JIANG Yao-zu. Numerical simulation of navigation conditions in a shiplock approach channel[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(4): 13-18. (in Chinese))
- [10] 朱红. 导流墩改善船闸引航道口门区水流条件的试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2006. (ZHU Hong. Tests on improving flow conditions at the entrance of approaching channel by diversion pier[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2006. (in Chinese))

Influence of riverbed material excavating field on entrance area navigation conditions

LI Qian-xi^{1,2}, HAN Chang-hai¹, LI Yan-fu¹, YANG Yu¹

(1. *Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology of Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Riverbed material excavating field may make changes in riverbed topography, which would lead to greater influence on navigable conditions. The velocity change may lead to the stop of ship sailing; the velocity direction change may give some impacts on the bank slope stability. In this article, using the fluid calculation software SMS (The Surface-Water Modeling System, created by USACE-WES and Brigham Young University, and widely used in the tidal estuary, river water flow simulation), based on the Navier-Stokes equations, a mathematical model adopting the weighted residual Galerkin finite element method is used for solving the problems. This module is to calculate unsteady flow and constant flow under the condition of water level and two-dimensional velocity universal module. The mathematical model is applied to the Ganlanba hydroelectric project which is one of the dams located on the Lancang River. Comparison analyses show that the mathematical model is in good agreement with experimental data. By simulating navigation flow conditions with presence or absence of the material excavating fields in the upstream and downstream riverbed, an analysis is made of impacts caused by riverbed material excavating field on entrance area navigation conditions. The analysis results also show that the riverbed material excavating fields have influences on navigation flow conditions of the entrance area of the approach channel, but less influences on the upstream flow patterns, and the downstream influence is more obvious. For example, the mainstream flow of the upstream does not change but the cross-section velocity is slightly lower; when the mainstream flow of the downstream changes, the mainstream flow is away from the entrance area of the approach channel, and the riverbed material excavating field can effectively reduce the oblique flow which is flowing along the entrance area of the approach channel, thus improving the flow conditions of the entrance area of the approach channel, which is favourable for the navigation. The simulation results show that the riverbed material excavating field for Ganlanba hydroelectric project is beneficial to the navigation. The research can provide a key technical support for engineering design.

Key words: riverbed material excavating field; entrance area; water flow; numerical simulation; physical model verification; navigation conditions