

泄水闸开启方式对通航水流条件的影响

伍志元¹, 蒋昌波^{1,2}, 陈杰^{1,2}, 邓斌^{1,2}, 杨武¹

(1. 长沙理工大学水利工程学院, 湖南长沙 410004; 2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410004)

摘要:为研究闸门开启方式对枢纽下游引航道口门区水流特征及通航水流条件的影响,以北江白石窑枢纽泄水闸为例,针对不同闸门开启方式对下游引航道口门区通航水流条件的影响开展三维数值模拟研究。结果表明:在较小流量情况下,闸门开启方式对下游引航道口门区通航水流条件影响较小;当流量较大时,闸门开启方式对下游引航道口门区通航水流条件影响较大。对于白石窑枢纽泄水闸,单开左岸泄水闸,或集中开启左岸泄水闸并间隔开启右岸泄水闸,下游引航道口门一线船闸航道右侧将不能满足通航水流条件要求。为保证船舶航行安全,建议该工程在下泄洪水时尽可能开启右岸泄水闸,或均匀开启全部泄水闸。

关键词:通航条件;三维数值模拟;泄水闸;口门区;白石窑枢纽

中图分类号:TV61 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)03-0073-05

Influence of sluice gate opening mode on navigation flow condition//WU Zhiyuan¹, JIANG Changbo^{1,2}, CHEN Jie^{1,2}, DENG Bin^{1,2}, YANG Wu¹ (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China; 2. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences & Flood Hazard Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: The sluice gates of the Baishiyao Hydro-Junction in the Beijiang River were selected to study the influence of the sluice gate opening mode on flow features and navigation flow conditions in the entrance area of an approaching channel downstream of the hydro-junction. Three-dimensional (3D) numerical simulation was conducted on the influence of different sluice gate opening modes on the navigation flow conditions in the entrance area of the downstream approaching channel. The results show that the influence of sluice gate opening modes on the navigation conditions is small when the flow is low, and the influence of sluice gate opening modes on the navigation conditions is large when the flow is high. For the sluice gates of the Baishiyao Hydro-Junction, a single opening of the left sluice gate or intensive opening of the left sluice gate with opening at intervals of the right sluice gate will prevent the navigation flow conditions of the right side of the first-line ship lock from meeting the requirements in the entrance area of the downstream approaching channel. To ensure the safety of navigation, it is suggested that the right sluice gate of the Baishiyao Hydro-Junction be opened or else all the sluice gates be opened during flood drainage.

Key words: navigation condition; 3D numerical simulation; sluice gate; entrance area; Baishiyao Hydro-Junction

通航问题在水利枢纽建设中占有特别重要的地位,引航道是否通畅是枢纽建设成败的一个重要因素^[1],引航道口门区水流特征是水利枢纽工程进行平面布置规划论证及优化研究必须考虑的重要因素。GBJ50139—2004《内河通航标准》^[2]对水流在引航道口门区3个方向上的流速都有相应规定,对I~IV级船闸而言,口门区纵向流速不大于2.0 m/s,横向流速不大于0.3 m/s,回流流速不大于0.4 m/s。现阶段,枢纽引航道及其连接段的通航水流特征分析大多采用物理模型试验进行,并据此论证平面布置方案^[3-4]。诸多学者在这方面开展了大量工作,取得了能够满足工程实际需求成果,为三峡枢纽^[5]、青田枢纽^[6]和湘江株洲枢纽^[7]等工程的建设提供了科学依据。但开展物理模型试验需耗费大量人力、物力和财力,时间周期长,且受到比尺效应的影响,采用数值模拟方法开展相关研究是解决这些困扰的可行手段^[8]。已有学者采用数值模拟方法对口门区水流特征进行探讨,但大多基于平面二维模型,计算得到的流速为水深平均流速^[9-12]。口门区水流结构十分复杂,其三维特性显著;《内河通航

基金项目:国家自然科学基金(51239001);湖南省教育厅科学研究项目(14C0024);湖南省研究生科研创新项目(CX2015B348)
作者简介:伍志元(1989—),男,博士研究生,主要从事河流、海岸动力过程及其模拟技术研究。E-mail:wuzhiyuan89@yeah.net
通信作者:蒋昌波(1970—),男,教授,主要从事河流、海岸动力过程及其模拟技术研究。E-mail:jcb36@vip.163.com

标准》^[2]对于口门区通航水流条件的规定均限定为表层流速,而基于平面二维模型计算得到的流速为水深平均流速,并不能准确反映口门区流速垂向分布特征^[8],亦无法为通航水流条件评定提供科学依据。发展适用于复杂条件下的引航道口门区三维水流数学模型,已成为水利枢纽通航水流条件计算研究的重要趋势^[8,13]。

水利枢纽中泄水闸的不同开启方式会改变引航道口门区的水流特征,从而直接影响船舶进出引航道^[14]。然而,目前关于泄水闸闸门开启方式对引航道口门区通航水流条件的影响研究相对较少,采用三维水流数学模型进行研究尚不多见。本文基于 Boussinesq 假定,采用雷诺平均的 N-S 方程建立引航道口门区三维水流数学模型,以白石窑枢纽为工程案例,对枢纽泄水闸不同闸门开启方式对通航水流条件的影响进行研究。

1 三维数学模型计算方法

1.1 控制方程

对于不可压缩流体,基于 Boussinesq 假定的雷诺平均 N-S 方程,可得到口门区三维水流方程组:连续性方程

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

x 方向动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = &fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \\ \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + &F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned} \tag{2}$$

y 方向动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = &-fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \\ \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + &F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(\gamma_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

式中: x,y,z 为笛卡儿坐标; u,v,w 分别为水流流速

在 x,y,z 方向上的 3 个分量; t 为时间; f 为科氏力参数; η 为水位; p_a 为大气压强; ρ_0 为水的密度; $F_u、F_v$ 为水平应力项; γ_t 为垂向紊动黏度。

紊动模型垂向采用 $k-\varepsilon$ 模型,垂向紊动黏度根据因子 k 和因子 ε 确定^[15]:

$$\gamma_t = \frac{c_\mu k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

式中 c_μ 为黏结系数。

水平紊动黏度采用 Smagorinsky^[16] 提出的模型进行计算:

$$A = c_s^2 l^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \tag{5}$$

其中

$$S_{ij} = 0.5 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{6}$$

式中: c_s 为常数; l 为特征长度; S_{ij} 为变形率。

1.2 数值方法

三维模型网格采用分层处理技术,平面上采用三角形网格,垂直方向采用结构化网格,采用有限体积法 (FVM) 对方程进行空间离散。根据 Roe 格式^[17]的近似黎曼 (approximate Riemann) 求解方法计算垂向界面的对流流量,采用线性梯度重构方法获取二阶精度,水平界面的对流流量使用一阶迎风格式求解,其中平均梯度采用 Jawahar 等^[18]的方法计算,采用二阶 TVD (total variation diminishing) 缓坡限制器可有效避免数值振荡,具体数值方法和动边界处理技术见文献^[8]。

2 计算结果与分析

2.1 白石窑枢纽口门区三维水流数学模型

基于上述方程,建立了白石窑枢纽口门区三维水流数学模型(图 1),模型入口为白石窑枢纽,出口位于枢纽下游约 2.0 km 处。计算模型在水平方向采用三角形网格,垂直方向采用 σ 坐标进行分层处理,共分为 10 层,网格最大长度约为 25 m,对枢纽泄水闸、电站、引航道和丁坝附近进行了网格加密,网

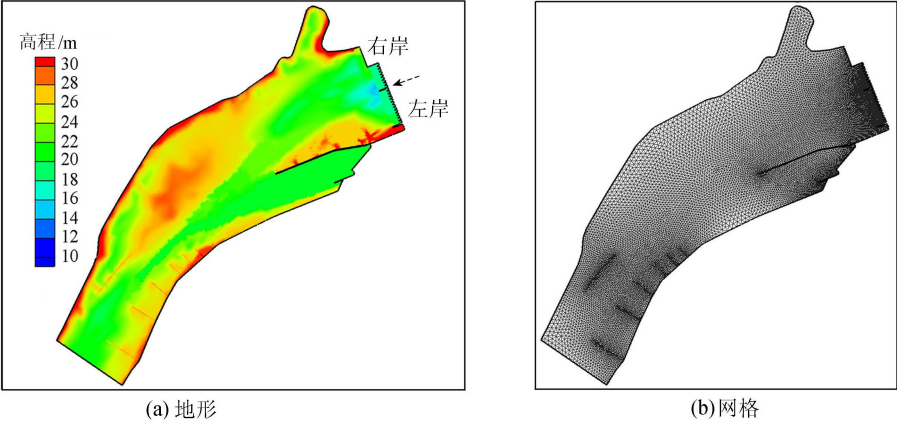


图 1 白石窑枢纽口门区三维水流数学模型

格最小长度约为 2.0 m。本文计算模型包括三角形网格节点 13 823 个,三角形单元 26 770 个。图 1 给出了白石窑枢纽下游引航道口门区三维水流数学模型的河道计算范围地形和计算网格。

数学模型验证包括水面线验证和流速验证,详见文献[8]。计算采用的地形资料是由广东省航道局提供的地形测图,在枯水 $Q=500\text{ m}^3/\text{s}$ 、中水 $Q=1000\text{ m}^3/\text{s}$ 和洪水 $Q=4990\text{ m}^3/\text{s}$ 这 3 级流量下,对三维数值计算结果进行水面线验证和流速验证。结果表明数值计算结果与实测水面线、流速保持一致,所建立的数学模型能够达到计算精度要求,可用于通航水流条件分析。

2.2 计算工况的确定

白石窑枢纽二线船闸平面布置采用相关主管部门和专家提出的“保留老船闸、新建二线船闸”的补充方案。泄水闸布置于大江河床,共计 22 孔。泄水闸前沿总长 279 m,分两区布置,如图 1 所示,左边 13 孔,编号为 1~13 号,右边 9 孔,编号为 14~22 号,以中隔墙分开。泄水闸属于开敞式宽顶堰,地基为坚硬岩石,闸顶桥面标高 44.32 m,孔口净宽 10 m,中墩宽 2.5 m,堰顶高程 25.32 m。白石窑枢纽上游来流大于 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,开启泄水闸下泄洪水。

根据交通部西南水运工程科学研究所进行的白石窑水利枢纽坝下整治后通航建筑物模试验的研究成果,分别考虑 2 级流量 8 个工况(表 1)。模型进口采用流量边界条件,在电站机组和 22 孔泄水闸处分别设置进口流量边界条件,各闸下泄流量根据闸门开度通过堰上闸孔出流公式推求得到。

2.3 口门区水流条件分析

在白石窑枢纽下游引航道口门区附近布置 6 个

表 1 白石窑枢纽下游计算工况					
工 况	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	坝前控制水位/m	电站开启情况	闸门开启情况	保证率 $P/\%$
1	6740		厂房关闭	全闸敞泄	20
2	6740	35.82	电站满发	14~22 号闸各开 8 m、5、7、9、11、13 号闸各开 7 m、3 号闸开 5 m	20
3	6740	35.82	电站满发	1~9 号闸各开 8 m、10、12、14、16、18 号闸各开 7 m、20 号闸开 5 m	20
4	6740	35.82	电站满发	10~22 号闸各开 10 m	20
5	6740	35.82	电站满发	1~13 号闸各开 10 m	20
6	4990		厂房关闭	全闸敞泄	50
7	4990	35.32	电站满发	14~22 号闸各开 6 m、13 号闸开 5 m、12 号闸开 4.7 m	50
8	4990	35.32	电站满发	1~13 号闸各开 4.7 m	50

断面,共 36 个测点,如图 2 所示,测量枢纽泄水闸下泄时的口门区表面流速,得到口门区附近纵向流速、横向流速、回流流速,探究泄水闸闸门不同开启方式对口门区通航条件的影响规律。

图 3 给出了流量 $Q=6740\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,白石窑枢纽泄水闸按照工况 1、4、5 下泄时枢纽下游表层流速分布云图。当泄水闸按照工况 1 开启时,下游引航道流场如图 3(a)所示,下游引航道口门区的 31 号测点最大纵向流速为 2.027 m/s ,略大于《内河通航标准》规定的 2.0 m/s ,但该区范围很小,其余均小于 2.0 m/s ;横向流速最大值为 0.282 m/s ,小于《内河通航标准》规定的 0.3 m/s ;回流速度最大值为 0.344 m/s ,小于《内河通航标准》规定的 0.4 m/s 。所以,该工况下游引航道口门区通航水流条件总体符合要求。

当泄水闸按照工况 4 进行开启时下游引航道流场如图 3(b)所示。下游引航道口门区纵向流速范

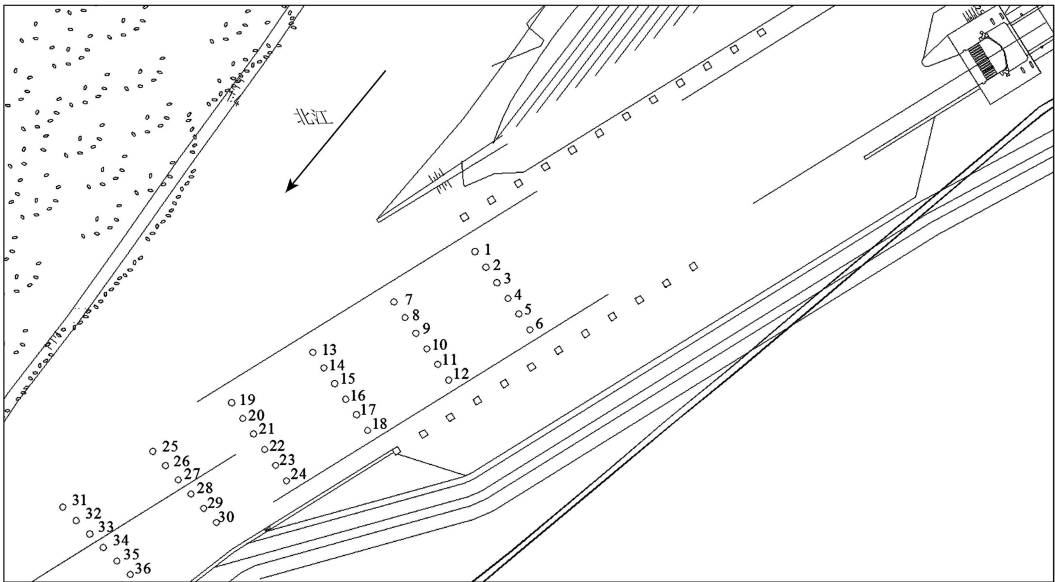


图 2 白石窑枢纽下游表层流速测点布置示意图

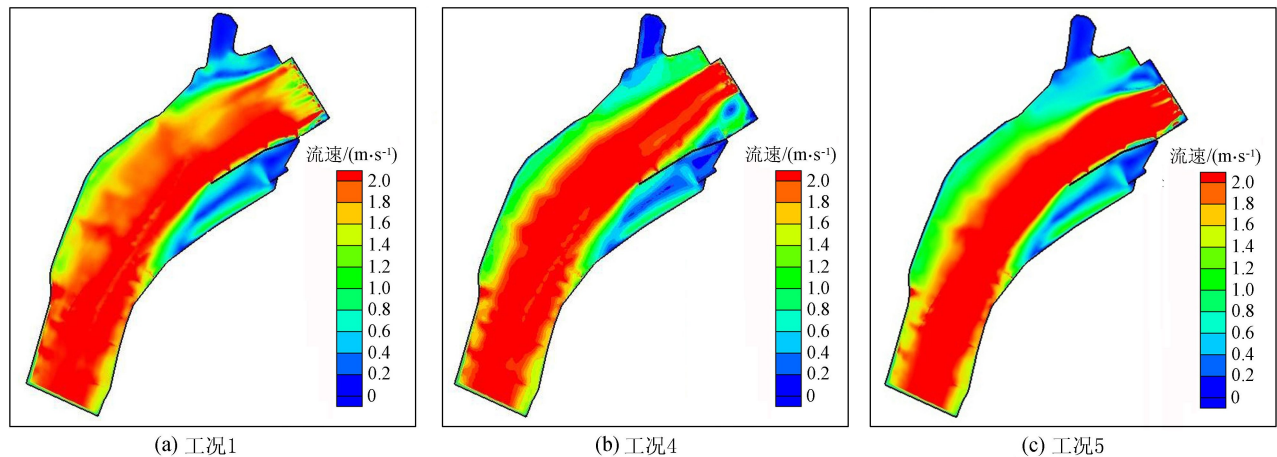


图3 白石窑枢纽下游表层流速分布云图 ($Q=6740\text{ m}^3/\text{s}$)

围是 $0.0046 \sim 1.986\text{ m/s}$, 小于 2.0 m/s ; 横向流速最大值为 0.280 m/s , 小于 0.3 m/s ; 回流速度最大值为 0.418 m/s , 略大于 0.4 m/s , 但范围很小。所以, 该工况下游引航道口门区通航水流条件总体符合规定要求。

当泄水闸按照工况 5 进行开启时, 下游引航道流场如图 3(c) 所示, 下游引航道口门区横向流速最大值为 0.300 m/s ; 回流速度最大值为 0.240 m/s , 小于 0.4 m/s ; 其中 25 号、31 号、32 号、33 号测点纵向流速大于 2.0 m/s , 最大纵向流速为 2.431 m/s , 局部区域纵向流速不满足要求。所以, 工况 5 下游引航道口门区通航水流条件不符合规定要求。

图 4 给出了流量 $Q=4990\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下, 白石窑枢纽泄水闸按照工况 6、7、8 下泄时枢纽下游表层流速分布云图。当泄水闸按照工况 6 进行开启时, 下游引航道流场如图 4(a) 所示。下游引航道口门区最大纵向流速为 1.843 m/s , 小于 2.0 m/s ; 最大横向流速为 0.237 m/s , 小于 0.3 m/s ; 最大回流流速为 0.373 m/s , 小于 0.4 m/s 。因此, 工况 6 下游引航道口门区能满足通航水流条件要求。

当泄水闸按照工况 7 进行开启时, 电站满发, 14~22 号闸各开 6 m , 13 号闸开 5 m , 12 号闸开 4.7 m , 下游引航道流场如图 4(b) 所示。下游引航道口门区最大纵向流速为 1.838 m/s , 小于 2.0 m/s ; 最大横向流速为 0.247 m/s , 小于 0.3 m/s ; 最大回流流速为 0.157 m/s , 小于 0.4 m/s 。因此, 工况 7 下游引航道口门区也能满足通航水流条件要求。

当泄水闸按照工况 8 进行开启时, 电站满发, 1~13 号闸各开 4.7 m , 下游引航道流场如图 4(c) 所示。下游引航道口门区最大纵向流速为 1.773 m/s , 小于 2.0 m/s ; 最大横向流速为 0.181 m/s , 小于 0.3 m/s ; 最大回流流速为 0.070 m/s , 小于 0.4 m/s 。因此, 工况 8 下游引航道口门区也能满足通航水流条件要求。

根据调度要求, 当白石窑枢纽上游来流大于 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 水库开启泄水闸开始下泄。对比工况 6~8 下游流态和口门区流速结果, 全闸敞泄、单开左岸泄水闸或单开右岸泄水闸, 枢纽下泄总流量为 $4990\text{ m}^3/\text{s}$, 此时下游引航道口门区均能满足通航对水流条件的要求。因此, 当流量较小时, 不同的闸

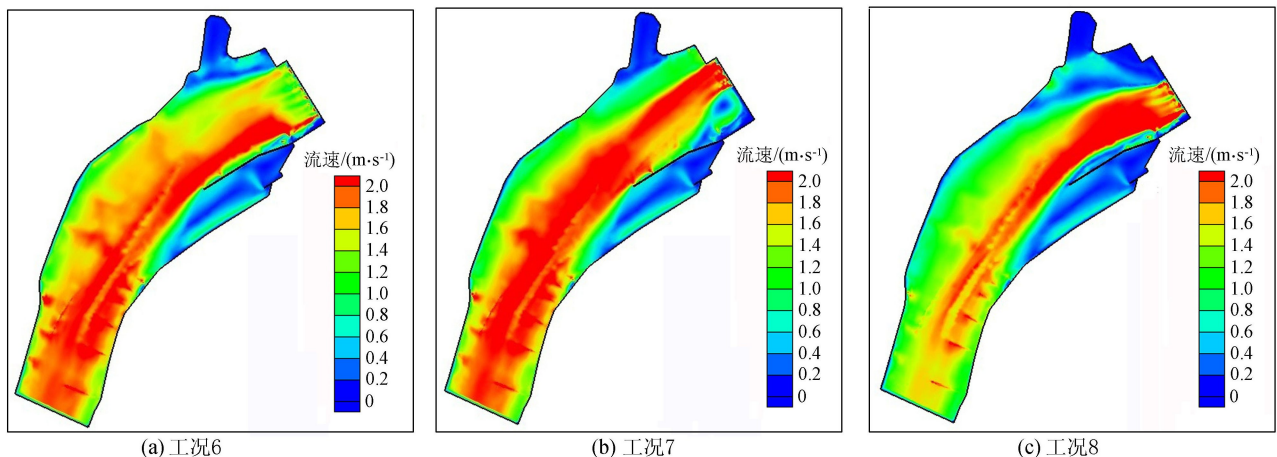


图4 白石窑枢纽下游表层流速分布云图 ($Q=4990\text{ m}^3/\text{s}$)

门开启方式对下游引航道口门区水流条件影响较小。对比工况 1~5 下游流态和口门区流速结果,流量为 $6740\text{ m}^3/\text{s}$ 时,全闸敞泄、单开右岸泄水闸或者集中开启右岸泄水闸并间隔开启左岸泄水闸时,该区域内通航水流条件良好。单开左岸泄水闸或者集中开启左岸泄水闸并间隔开启右岸泄水闸时,下游引航道口门一线船闸航道右侧达不到通航对水流条件的要求。

因而,当流量较大时,不同的闸门开启方式对下游引航道口门区水流条件影响较大,为保证船舶航行安全,建议白石窑枢纽洪水下泄时应尽可能开启右岸泄水闸,或者均匀开启全部泄水闸。

3 结 语

基于不可压缩 RANS 方程,采用三维水流数学模型探讨不同闸门开启方式对枢纽下游引航道口门区通航水流条件的影响。模型平面方向采用三角形非结构化网格,垂向采用 σ 分层坐标,将模型应用于白石窑枢纽下游引航道口门区水流特征研究。通过下游流态和口门区流速对比,得出流量较小时不同的闸门开启方式对下游引航道口门区水流条件影响较小;流量较大时,不同的闸门开启方式对下游引航道口门区水流条件影响较大。单开左岸泄水闸,或者集中开启左岸泄水闸并间隔开启右岸泄水闸时,下游引航道口门一线船闸航道右侧不满足通航水流条件要求。为保证船舶航行安全,建议白石窑枢纽进行洪水下泄时尽可能开启右岸泄水闸或者均匀开启全部泄水闸。该三维数学模型可用于白石窑枢纽引航道水流条件计算分析,也可为今后其他水利枢纽调度方案优化、船舶航行安全分析等提供参考。

参考文献:

[1] 李义天. 引航道水沙运动数值模拟初探[J]. 泥沙研究, 1990(1): 20-29. (LI Yitian. A primary study on mathematical modelling of sediment transport in guiding channel[J]. Journal of Sediment Research, 1990(1): 20-29. (in Chinese))

[2] GB 50139—2014 内河通航标准[S].

[3] 周华兴. 船闸口门外连接段通航水流条件标准的初探[J]. 水运工程, 2004(4): 62-67. (ZHOU Huaxing. An approach to standard of navigable flow condition at the connection reach outside the lock entrance [J]. Port & Waterway Engineering, 2004(4): 62-67. (in Chinese))

[4] 陈作强. 通航建筑物口门区及连接段通航水流条件研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.

[5] 郑宝友. 三峡船闸下游口门区流态及其改善措施的研究[J]. 水道港口, 1990(3): 21-28. (ZHENG Baoyou.

Study on the flow regime at the downstream entrance area of the Three Gorge Lock and its improving measures [J]. Journal of Waterway and Harbor, 1990(3): 21-28. (in Chinese))

[6] 姜楚, 赵建钧, 辜晋德. 青田水利枢纽通航水流条件试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2014(2): 74-80. (JIANG Chu, ZHAO Jianjun, GU Jinde. Experimental studies on flow condition for navigation of Qingtian Hydroproject located at Oujiang River [J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(2): 74-80. (in Chinese))

[7] 黄伦超, 江诗群, 刘诚. 湘江株洲枢纽工程施工期通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2001(11): 31-34. (HUANG Lunchao, JIANG Shiqun, LIU Cheng. Test and study of navigation flow condition during construction period for Zhuzhou Junction Project of Xiangjiang River [J]. Port & Waterway Engineering, 2001(11): 31-34. (in Chinese))

[8] 叶明波, 伍志元, 杨明远, 等. 北江千吨级航道整治研究: III 三维数学模型与船闸口门区水流条件分析[J]. 交通科学与工程, 2014(1): 49-55. (YE Mingbo, WU Zhiyuan, YANG Mingyuan, et al. Study on the Beijiang River 1 000 t waterway regulation; III three-dimensional numerical model development and study of flow conditions on entrance of ship lock [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2014(1): 49-55. (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 Zhixiong, JIANG Yaozu. Numerical simulation and analysis of navigation conditions in a shiplock approach channel [J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(4): 13-18. (in Chinese))

[10] 崔冬, 刘新成, 潘丽红. 一、二维耦合数学模型在水利枢纽通航水流条件研究中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(1): 35-39. (CUI Dong, LIU Xincheng, PAN Lihong. Application of 1D and 2D coupled mathematical model in navigation flow condition of hydro-junction [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(1): 35-39. (in Chinese))

[11] 姚仕明, 王兴奎, 张丙印. 三峡大坝至葛洲坝两坝间河段通航水流条件[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(6): 43-47. (YAO Shiming, WANG Xingkui, ZHANG Bingyin. Navigable flow conditions of river reach between Three Gorges Dam and Gezhouba Dam [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(6): 43-47. (in Chinese))

[12] 叶如意, 王攀. 曹娥江至宁波引水工程平面二维水流数值模拟[J]. 水资源保护, 2010, 26(5): 24-28. (YE Ruyi, WANG Pan. Two-dimensional numerical simulation of flow for water diversion project from Cao'e River to Ningbo [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(5): 24-28. (in Chinese))

(下转第 82 页)

- 发电, 2013, 39 (2): 1-4. (ZHANG Zhiping, REN Chenggong. Entire process summary on the construction of Longkaikou Hydropower Station Project[J]. Water Power, 2013, 39(2): 1-4. (in Chinese))
- [2] 叶建群,熊立刚,陈国良,等. 龙开口水电站坝基深槽处理设计[J]. 水力发电, 2013, 39 (2): 28-31. (YE Jianqun, XIONG Ligang, CHEN Guoliang, et al. Design of deep trench treatment in dam foundation of Longkaikou Hydropower Station[J]. Water Power, 2013, 39 (2): 28-31. (in Chinese))
- [3] 唐欣薇,李鹏辉,张楚汉. 碾压混凝土重力坝温度场与应力场全过程仿真分析[J]. 长江科学院院报, 2007, 24 (3): 50-53. (TANG Xinwei, LI Penghui, ZHANG Chuhan. Entire process simulation of temperature and stress fields for RCC dams [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24 (3): 50-53 (in Chinese))
- [4] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [5] 朱伯芳,许平. 碾压混凝土重力坝的温度应力与温度控制[J]. 水利水电技术, 1996, 27 (4): 18-25. (ZHU Bofang, XU Ping. The temperature stress and temperature control of roller-compacted concrete gravity dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1996, 27 (4): 18-25. (in Chinese))
- [6] 黄淑萍,胡平,岳耀真. 观音阁水库碾压混凝土大坝温度应力仿真计算研究[J]. 水力发电, 1996, 22 (7): 40-44. (HUANG Shuping, HU Ping, YUE Yaozhen. The simulation of temperature stress on Guanyingge RCC Dam [J]. Water Power, 1996, 22 (7): 40-44. (in Chinese))
- [7] WILSON E L. The determination of temperatures within mass concrete structures: a report of an investigation[R]. Berkeley: University of California, 1968.
- [8] 李守义,张金凯,张晓飞. 碾压混凝土坝温度应力仿真计算研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [9] 朱伯芳,许平. 混凝土坝仿真计算的并层算法和分区异步长算法[J]. 水力发电, 1996, 22 (1): 38-43. (ZHU Bofang, XU Ping. Zone-merged algorithm and zoned different-step-length algorithm in the concrete simulation calculation [J]. Water Power, 1996, 22 (1): 38-43 (in Chinese))
- [10] 朱伯芳. 考虑水管冷却效果的混凝土等效热传导方程[J]. 水利学报, 1991, 22 (3): 28-34. (ZHU Bofang. Equivalent equation of heat conduction in mass concrete considering the effect of pipe cooling [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 22 (3): 28-34. (in Chinese))
- [11] 陈尧隆,何劲. 用三维有限元浮动网格法进行碾压混凝土重力坝施工期温度场和温度应力仿真分析[J]. 水利学报, 1998, 29 (增刊1): 1-5. (CHEN Yaolong, HE Jing. Simulation on temperature and thermal stress distribution of RCC gravity dam during construction by using 3-D FEM floating mesh method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29 (Supl): 1-5. (in Chinese))
- [12] 姜冬菊,张子明,王德信. 计算温度应力的广义约束矩阵法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31 (1): 29-32. (JIANG Dongju, ZHANG Ziming, WANG Dexin. Generalized constraint matrix method for calculation of temperature stresses [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2003, 31 (1): 29-32. (in Chinese))
- [13] 刘光廷,胡昱,王恩志,等. 石门子碾压混凝土拱坝温度场实测与仿真计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42 (4): 539-542. (LIU Guangting, HU Yu, WANG Enzhi, et al. Analysis and measurement of the temperature field in the Shimenzi RCC Arch Dam [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42 (4): 539-542. (in Chinese))
- [14] 朱伯芳. 混凝土的弹性模量、徐变度与应力松弛系数[J]. 水利学报, 1985, 16 (9): 54-61. (ZHU Bofang. The elastic modulus, creep degree and stress relaxation coefficients of massive concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 16 (9): 54-61. (in Chinese))
- [15] 杨剑. 基于“数字大坝”的高拱坝真实形态研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
(收稿日期: 2015-05-17 编辑: 郑孝宇)
- +++++
- (上接第 77 页)
- [13] 冯小香,李丹勋,张明. 枢纽船闸引航道口门区三维水流数值模拟应用研究[J]. 水运工程, 2012 (1): 122-126. (FENG Xiaoxiang, LI Danxun, ZHANG Ming. Application research on 3D flow numerical model in entrance area of ship lock approach channel [J]. Port & Waterway Engineering, 2012 (1): 122-126. (in Chinese))
- [14] 卢文蕾,戈龙仔. 枢纽泄水闸开启方式对通航条件的影响[J]. 水运工程, 2011 (4): 126-131. (LU Wenlei, GE Longzai. Influence of opening modes of hydro-junction's release sluice on navigation condition [J]. Port & Waterway Engineering, 2011 (4): 126-131. (in Chinese))
- [15] LI Y S, ZHAN J M. An efficient three-dimensional semi-implicit finite element scheme for simulation of free surface flows [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1993, 16: 187-198.
- [16] SMAGORINSKY J S. General circulation experiments with the primitive equations [J]. Monthly Weather Review, 1963, 91: 99-164.
- [17] BRUFAU P, GARCIA P, VAZQUEZ-CENDON M E. Zero-mass error using unsteady wetting-drying conditions in shallow flow over dry irregular topography [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2004, 45 (10): 1047-1082.
- [18] JAWAHAR P, KAMATH H. A high-resolution procedure for Euler and Navier-Stokes computations on unstructured grids [J]. Journal of Computational Physics, 2000, 164 (1): 165-203.
(收稿日期: 2015-04-08 编辑: 骆超)