



拆除葛洲坝钢板桩纵向围堰 对1号船闸通航安全影响

曾辉¹, 刘振嘉², 喻峰¹, 袁达³, 吴俊东³, 陈小虎³, 王翔³

(1. 中国长江电力股份有限公司, 湖北宜昌 443002; 2. 长江三峡通航管理局, 湖北宜昌 443002;
3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北武汉 430010)

摘要: 葛洲坝下游原钢板桩纵向围堰为临时设施, 现已超期服役。通过研究钢板桩围堰对1号船闸通航安全的影响, 为钢板桩围堰拆除或重建提供依据。建立葛洲坝下游河道二维水动力模型, 对入库流量为1号船闸最大通航流量 35 000 m³/s 时钢板桩围堰拆除和重建工况进行数值模拟计算。结果表明大江、二江分流比小于 0.9 且越小时, 拆除钢板桩围堰对1号船闸下游口门区通航水流条件影响越大。

关键词: 葛洲坝; 钢板桩围堰; 通航水流条件; 二维水动力模型

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0124-08

Influence of demolishing longitudinal cofferdam of steel sheet pile in Gezhouba Dam on navigation safety of ship lock No. 1

ZENG Hui¹, LIU Zhenjia², YU Feng¹, YUAN Da³, WU Jundong³, CHEN Xiaohu³, WANG Xiang³

(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China; 2. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China;
3. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

Abstract: The original steel sheet pile longitudinal cofferdam downstream of Gezhouba is a temporary facility and has now exceeded its service period. This paper studies the impact of steel sheet pile cofferdam on the navigation safety of the ship lock No. 1, providing a basis for the demolition or reconstruction of steel sheet pile cofferdam. A two-dimensional hydrodynamic model is established for the downstream channel of Gezhouba Dam, and numerical simulation calculations are conducted for the demolition and reconstruction of steel sheet pile cofferdams under the maximum navigable flow of 35,000 m³/s at the Ship lock No. 1. The calculation results show that when the diversion ratio of the two rivers is less than 0.9 and the smaller, the demolition of the steel sheet pile cofferdam has a greater impact on the navigation flow conditions in the downstream entrance area of the ship lock No. 1.

Keywords: Gezhouba Dam; steel sheet pile cofferdam; navigation flow condition; two-dimensional hydrodynamic model

1 工程概况

葛洲坝水利枢纽主体建筑物包括泄水闸、冲沙闸、水电站厂房、船闸及两岸挡水坝。枢纽布置格局为“一体两翼”, 即原二江布置二江泄水闸, 两侧为二江和大江电站, 为枢纽工程过流的主要建

筑物; 在大江电站的右侧和三江分别布置大江航线和三江航线。枢纽坝轴线全长 2 606.5 m, 从左向右主要建筑物依次为左岸土石坝, 三江 3 号船闸、6 孔冲沙闸和 2 号船闸, 二江 7 台机组厂房和 27 孔泄水闸, 大江 14 台机组厂房和排沙孔、1 号

收稿日期: 2023-04-12

作者简介: 曾辉 (1976—), 男, 高级工程师, 从事水利工程运行管理工作。

船闸、9 孔泄洪冲沙闸, 右岸混凝土挡水坝段。葛洲坝水利枢纽总过流能力为设计流量 $86\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 、校核流量 $110\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, 通航建筑物设计单向年通过能力 5 000 万 t, 电站总装机容量 2 715 MW, 多年平均发电量为 157 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。葛洲坝水利枢纽总体布置见图 1。



图 1 葛洲坝水利枢纽全貌

葛洲坝水利枢纽大江下游纵向钢板桩围堰位于葛洲坝大江电厂与二江泄水闸之间, 原为保护葛洲坝二期工程主体建筑物干地施工的临时建筑物, 现为大江电厂尾水与二江泄水闸之间的隔流导墙, 采用格式钢板桩结构^[1], 该结构由一根根独立的钢板桩锁口互相扣接而形成一定形状的封闭空间, 钢板桩起防渗和保持结构形状的作用, 内填砂砾石料维持结构稳定^[2]。原钢板桩围堰为临时设施, 现已超期服役。钢板桩与连接弧的底部 $0\sim 4.5\ \text{m}$ 范围内 90% 以上面积锈蚀严重, 钢板桩与连接弧有效截面削弱严重, 锈蚀为体系性病害, 且呈加速扩展趋势, 钢板桩围堰见图 2。

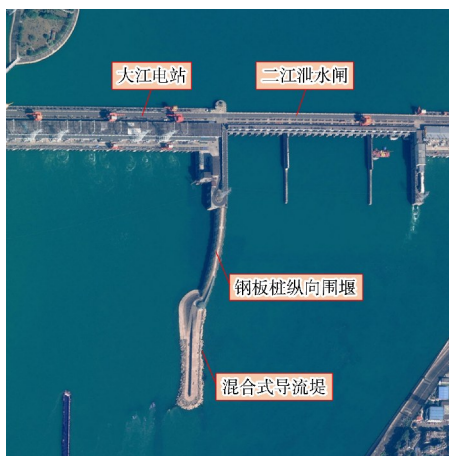


图 2 钢板桩纵向围堰混合式导流堤

为改善引航道水流条件, 目前国内常采取的措施包括: 调整导流堤长度和堤头形式、透空式隔流堤、导流堤外扩开孔、口门区设置导流墩以及改变泄水设施运行方式等。吴惠国等^[3]通过布设不同导流墙, 研究对船闸下游引航道通航水流条件的改善效果; 王建平等^[4]通过改变导流墙长度和导流墩数量, 研究船闸引航道口门区通航水流条件; 祁永升等^[5]通过开启水闸闸门不同运行方式, 研究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; 胡亮亮等^[6]通过隔流堤设置透水孔, 研究对下游引航道口门区通航水流条件的影响。因此, 有必要研究钢板桩围堰对 1 号船闸通航安全影响, 为钢板桩围堰拆除或重建提供依据。

2 模型构建

2.1 模型原理

水动力模型的控制方程为简化 Navier-Stokes 方程组得到的二维平面浅水方程组^[7-10], 包含水流连续方程和水流动量方程。

二维水流的总水深:

$$h = \eta + d \quad (1)$$

二维浅水方程的连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (2)$$

二维浅水方程的动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = & \bar{f}\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h\partial p_a}{\rho_0\partial x} - \frac{gh^2\partial\rho}{2\rho_0\partial x} + \\ & \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial(hT_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + hu_s S \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} = -\bar{f}\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial y} -$$

$$\frac{h\partial p_a}{\rho_0\partial y} - \frac{gh^2\partial\rho}{2\rho_0\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hT_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(hT_{yy})}{\partial y} + hv_s S$$

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad (5)$$

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} \bar{v} dz \quad (6)$$

式中： x 、 y 、 z 为笛卡尔坐标； \bar{u} 、 \bar{v} 为 x 、 y 方向上的平均流速（速度分量 u 、 v 沿着水深方向进行积分再除以水深后的流速）； t 为时间； h 为水深； η 为水位； d 为静水深； g 为重力加速度； ρ 为水的密度； ρ_0 为水的相对密度； p_a 为大气压强； s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yy} 分别为辐射应力分量； S 为源项； u_s 、 v_s 为源项水流在 x 、 y 方向的速度； f 为柯氏力系数， $f=2\omega\sin\varphi$ ， ω 为地球角速度， φ 为当地纬度； T_{ij} 为

水平黏滞应力项，包括黏性力 $T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$ ，紊流应力 $T_{xy} = A \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right)$ 和水平对流应力 $T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$ ； τ_{bx} 、 τ_{by} 为底部应力在 x 、 y 方向上的应力分量； τ_{sx} 、 τ_{sy} 为风应力在 x 、 y 方向上的应力分量。

边界条件包括：1) 闭合边界：垂直方向上的流速均为0，沿着闭合边界方向上的流速为0时，闭合边界为无滑移边界；沿着闭合边界方向不为0时为滑移边界。该模型采用无滑移边界，闭合边界垂向和平行方向的流速均为0。2) 开边界：水动力模型中的开边界可以设定为流量边界、单一水位边界、单一的流速边界、通量边界和水位-流速边界等。3) 干湿动边界：该模型可能在计算区域中存在干湿交替区，为了避免模型干湿交替区单元水深过小，出现高速不稳定流进而发散^[11]，因此设定湿水深 $h_w = 0.05$ m、淹没水深 $h_f = 0.005$ m、干水深 $h_d = 0.001$ m。

2.2 水动力模型建立

2.2.1 模型范围

模型地形数据基于2014年测绘的葛洲坝上下游1:2 000地形图，经过GIS软件处理生成闭合的水陆边界和水深散点数据^[12]。选取葛洲坝水利枢纽下游5 km范围建立水力学模型，见图3。

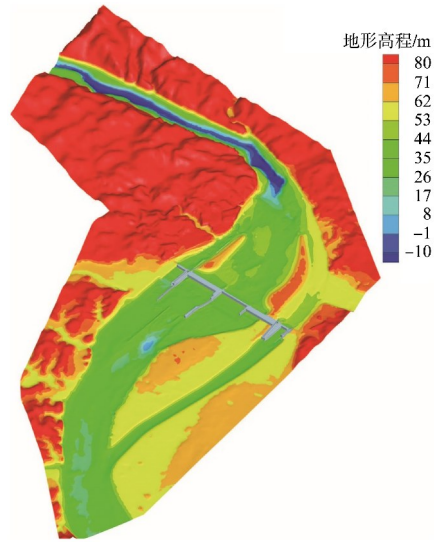


图3 葛洲坝上下游河道水力学模型

2.2.2 网格布置

计算网格采用三角形网格。整个计算区域共布置131 969个网格节点和261 370个计算单元。网格间距为2~40 m。主要研究葛洲坝坝下区域，网格间距为2 m，其他区域采用过渡网格。网格划分见图4。

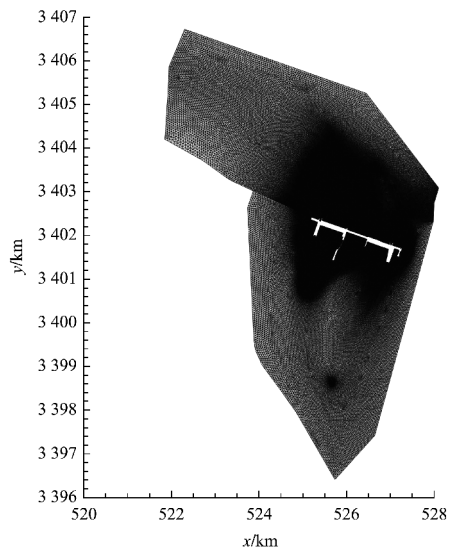


图4 网格划分

2.3 模型验证

2.3.1 模型验证测点

大江、二江机组下游7号站、8号机下游水位计算点(简称8号站)位置见图5。

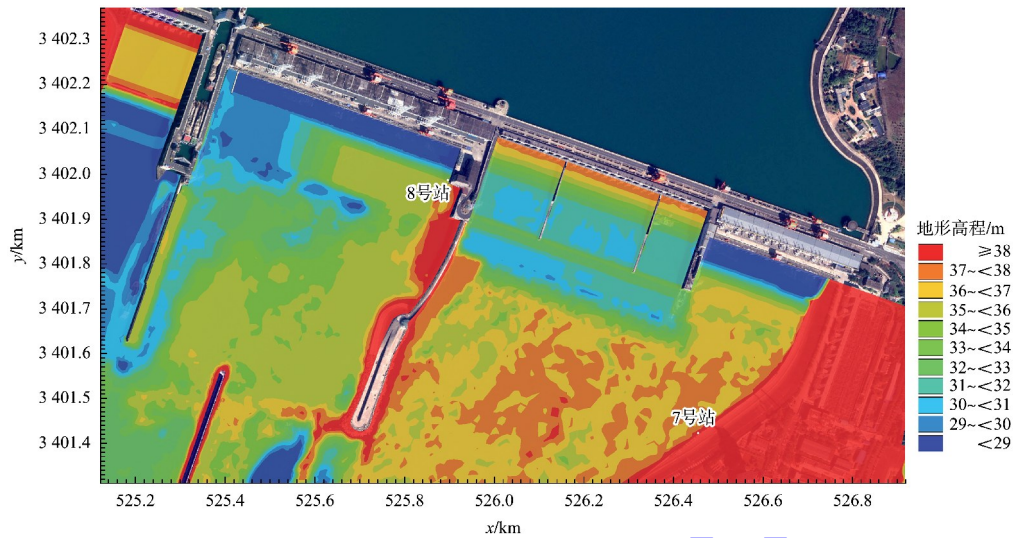


图 5 模型测点及水位站位置

2.3.2 模型验证

数模计算涉及的主要参数有河道糙率、紊动黏性系数等。河道糙率实际是一个综合阻力系数,反映了计算河段的河床河岸阻力、河道形态变化、水流阻力及河道地形概化等因素的综合影响。

选取 2019 年 5 月 30 日葛洲坝水工设施运行资料对模型进行验证^[13]。计算所采用的河道参数取值:开挖渠道及边坡为 0.020,河道高程 65.0 m

以下为 0.027,河滩高程 65.0 m 以上采用 0.033。紊动黏性系数采用 Smagorinsky 公式计算,其中 Smagorinsky 系数取 0.28。

葛洲坝水利枢纽水工设施 2019 年 5 月 30 日运行时下游水位分布计算值见图 6,特征点位置计算值与实测值见表 1。由图表可得:计算和实测水位值基本吻合,其差值绝大多数不大于 0.02 m,满足相关规范。因此该模型满足工程计算的要求。

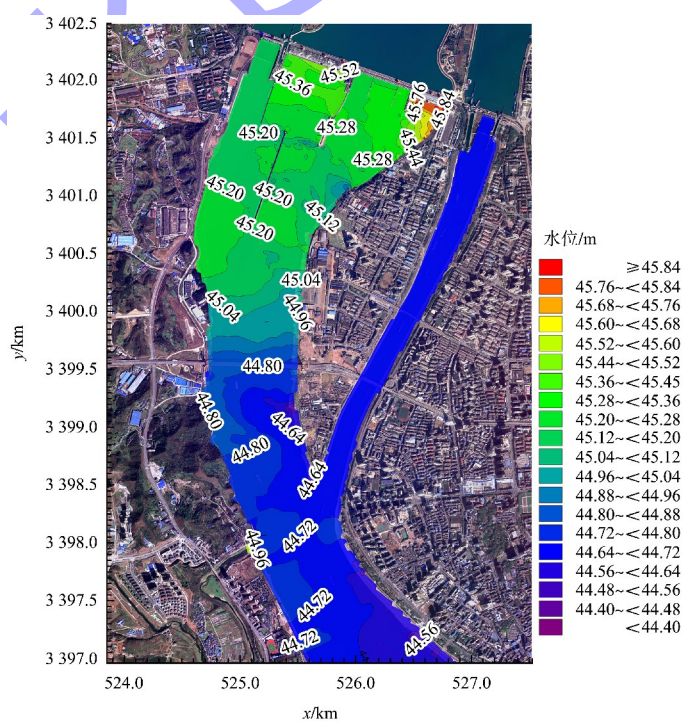


图 6 验证模型

表 1 2019年5月30日葛洲坝水工设施观测结果与计算结果对比

模拟工况	总泄量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	8号站水位		7号站水位	
		观测值/m	计算值/m	观测值/m	计算值/m
大江电站流量 11 014 m^3/s , 二江电站流量 6 533 m^3/s , 二江泄水闸中区下泄流量 2 350 m^3/s	19 897	45.45	45.44	45.43	45.42

3 钢板桩围堰对 1 号船闸通航安全影响

3.1 研究方案

葛洲坝大江航道的最大通航流量为 35 000 m^3/s ^[14], 考虑入库流量达到 35 000 m^3/s 时, 二江泄水闸参与下泄弃水, 拆除钢板桩围堰, 大江、二江将在二江泄水闸下游直接连通, 可能对大江航道通航水流条件产生不利影响。因此考虑对入库流量为 35 000 m^3/s 时葛洲坝泄水设施组合运行, 钢板桩围堰拆除或保留工况坝下流场进行数值模拟计算。

根据葛洲坝水利枢纽泄水设施调度运用程序及相关参数作以下试算: 入库流量达 35 000 m^3/s

时, 库水位为 66.0 m, 尾水位拟合值为 50.14 m, 毛水头为 15.86 m, 平均水头损失为 0.44 m, 净水头为 15.42 m (小于额定水头 18.6 m), 综合出力系数为 8.48, 全机组发电流量为 19 307 m^3/s , 二江泄水闸弃水 15 693 m^3/s 。控制二江泄水闸水跃满足泄水安全要求, 水跃发生在闸墩末端 ($L=0$ m) 时单宽流量 q 为 50 m^3/s , 水跃发生在闸墩末端以下 50 m 处 ($L=50$ m) 时单宽流量 q 为 90 m^3/s , 二江泄水闸可开 15~26 孔。

根据试算, 当入库流量达 35 000 m^3/s 时, 二江泄水闸可以开启右中区 (21 孔)、左右区 (15 孔)、左中区 (18 孔), 具体模拟方案见表 2。

表 2 通航安全性分析模拟方案

工况	入库流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	大江泄水建筑物泄流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)						二江泄水建筑物泄流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)						大江、二江分流比	备注
		冲沙闸	排漂孔	冲沙洞	排沙底孔	电站机组	大江总泄量	二江泄水闸			电站机组	排沙底孔	二江总泄量		
								右区 (9孔)	中区 (12孔)	左区 (6孔)					
1	35 000	-	560	360	5 600	12 725	19 245	-	9 173	-	6 582	-	15 755	1.22	钢板桩围堰保留
2		-	560	360	5 600	12 725	19 245	-	9 173	-	6 582	-	15 755	1.22	钢板桩围堰拆除
3		-	560	360	2 800	12 725	16 445	-	11 973	-	6 582	-	18 555	0.89	钢板桩围堰保留
4		-	560	360	2 800	12 725	16 445	-	11 973	-	6 582	-	18 555	0.89	钢板桩围堰拆除
5		-	560	360	0	12 725	13 645	6 331	8 442	-	6 582	-	21 355	0.64	钢板桩围堰保留
6		-	560	360	0	12 725	13 645	6 331	8 442	-	6 582	-	21 355	0.64	钢板桩围堰拆除

3.2 模拟结果分析

3.2.1 纵向围堰对口门区航道水位的影响

通过控制大江电站排沙底孔下泄流量, 研究大江、二江不同分流比下纵向围堰对口门区航道水位的影响。

葛洲坝下游水位分布见图 7, 其中工况 1 为

钢板桩围堰保留, 大江、二江分流比为 1.22; 工况 2 为钢板桩围堰拆除, 大江、二江分流比为 1.22。两种工况下游引航道及口门区水位均为 49.8~49.9 m。

进一步对工况 3~6 进行模拟计算, 各工况下游引航道及口门区水位均为 49.8~49.9 m。

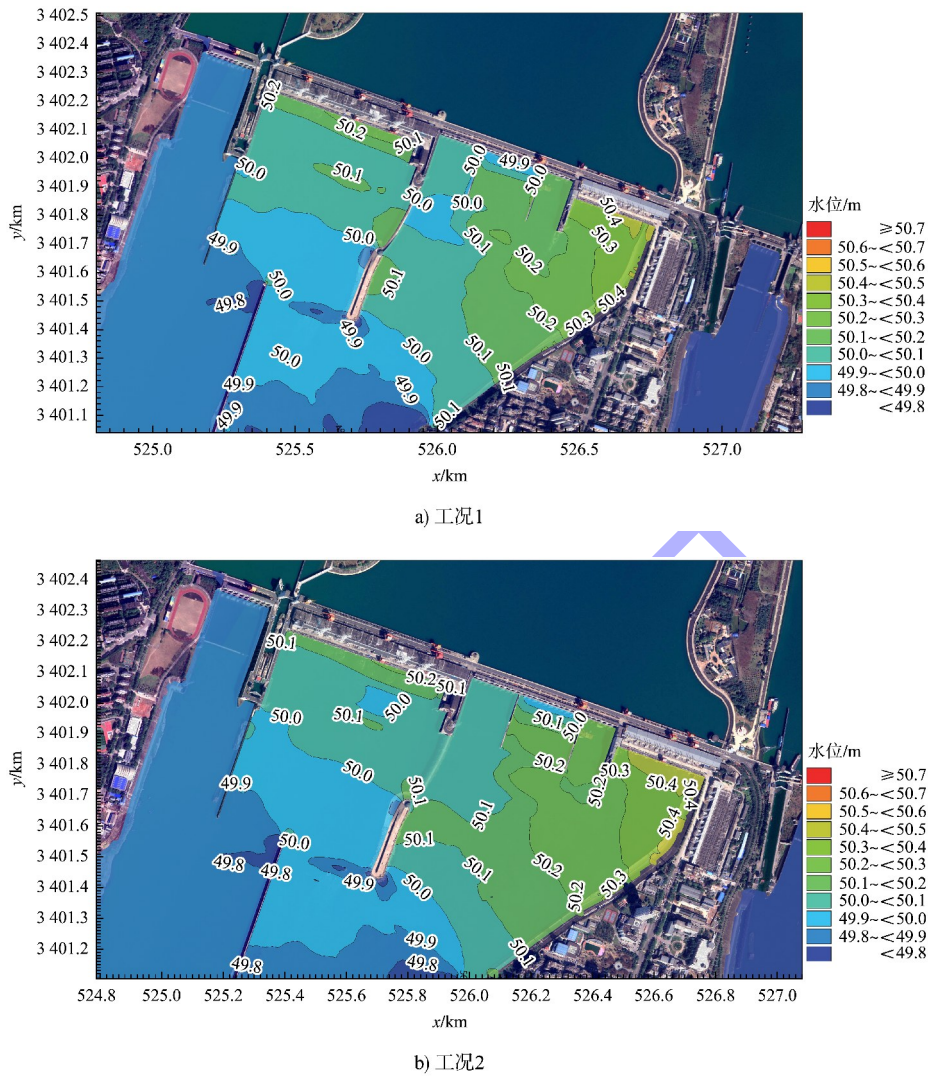


图 7 葛洲坝下游水位分布

3.2.2 纵向围堰对口门区航道水流流速的影响

通过控制大江电站排沙底孔下泄流量, 研究大江、二江不同分流比下纵向围堰对口门区航道水流流速的影响。

葛洲坝下游流速分布见图 8, 工况 1 时 1 号船闸下游引航道及口门区航道纵、横向流速分别见图 9a)、9b)。由于钢板桩围堰的隔流作用, 大江、二江流场在隔流堤范围内互不干扰。下游引航道口门区及江心堤右侧航道段流态较差, 存在回流区, 回流流速 0.25 m/s; 口门区及江心堤右侧航道区域水流沿航道纵向流速为 0.25~2.00 m/s, 沿航道横向流速为 0~0.24 m/s。

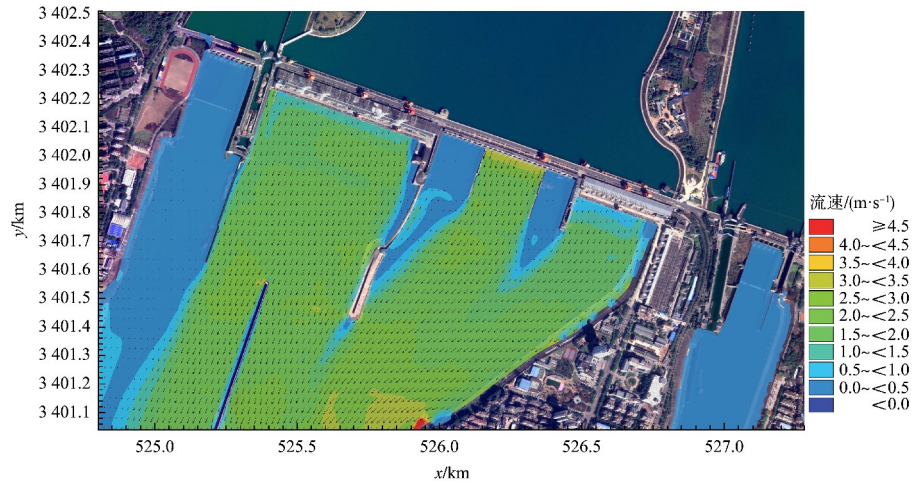
工况 2 时 1 号船闸下游引航道及口门区航道纵、横向流速分别见图 9c)、9d)。相对于工况 1,

拆除了钢板桩围堰, 回流流速 0.25 m/s; 口门区及江心堤右侧航道区域水流沿航道纵向流速为 0.25~2.00 m/s, 沿航道横向流速为 0~0.23 m/s。

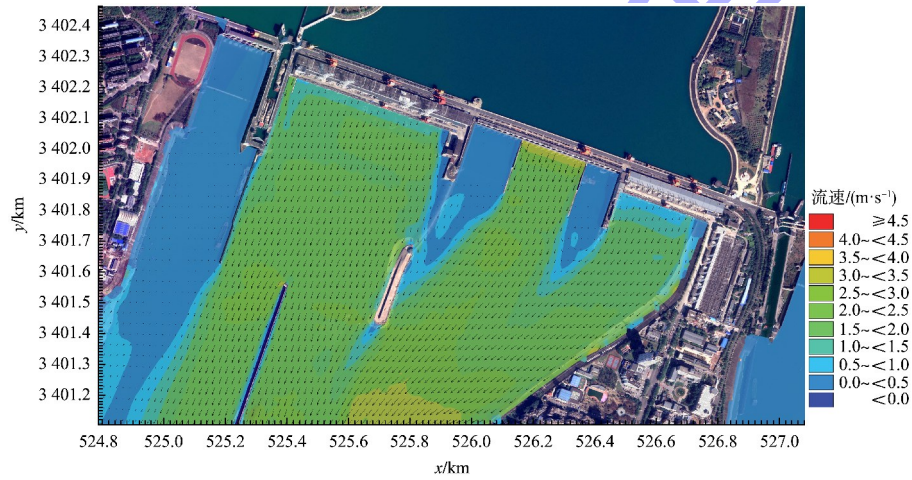
进一步对工况 3~6 进行模拟计算, 得到各工况口门区最大纵向流速、最大横向流速及回流流速见表 3。

表 3 口门区最大纵向、最大横向流速及回流流速

工况	钢板桩围堰保留或拆除	大江二江分流比	最大纵向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大横向流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	回流流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
1	保留	1.22	2.00	0.24	0.25
2	拆除	1.22	2.00	0.23	0.25
3	保留	0.89	1.75	0.22	0.25
4	拆除	0.89	1.75	0.22	0.25
5	保留	0.64	1.25	0.18	0.25
6	拆除	0.64	1.75	0.22	0.25



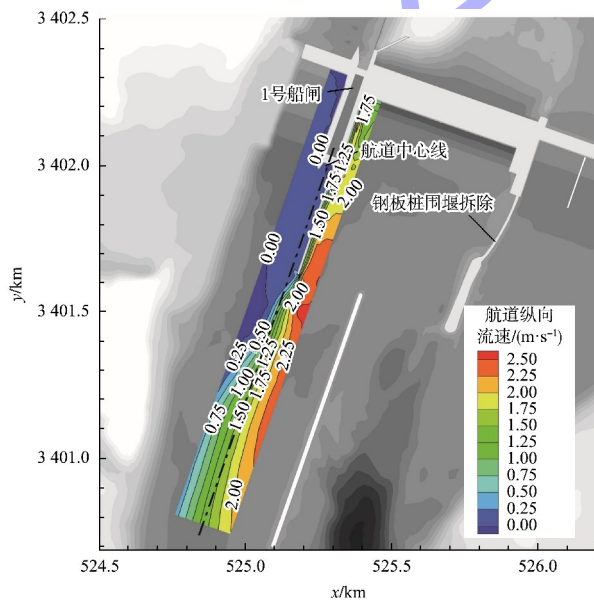
a) 工况1



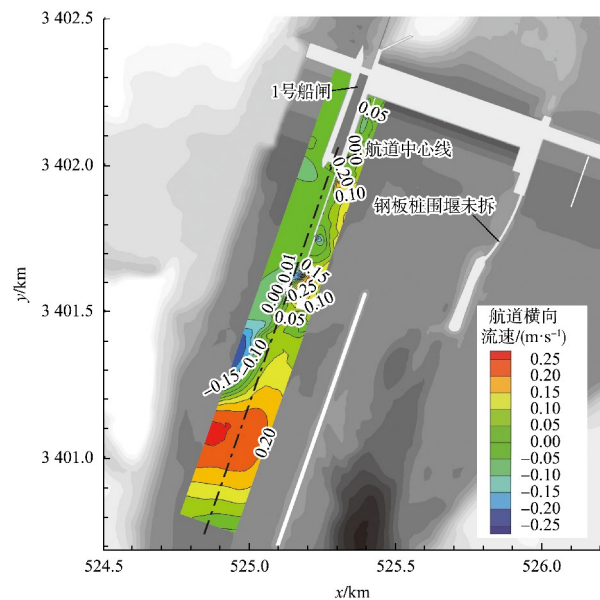
b) 工况2



图8 葛洲坝下游流速分布



a) 工况1纵向



b) 工况1横向

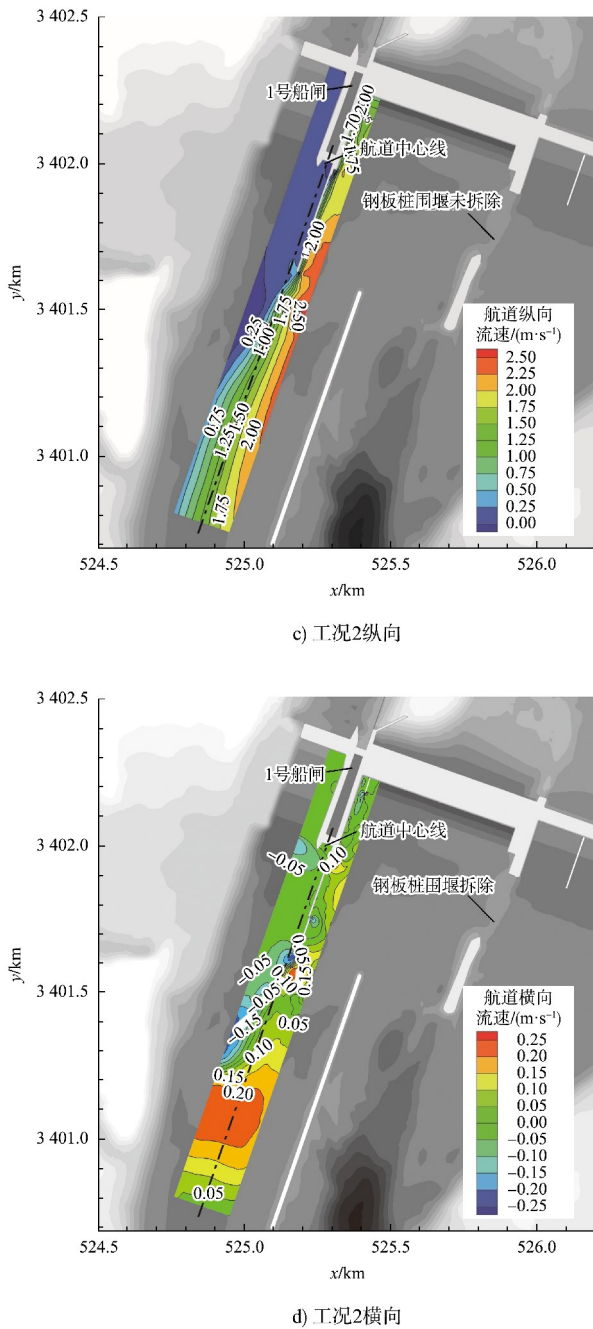


图 9 1 号船闸下游引航道及口门区航道流速分布

钢板桩围堰拆除和保留口门区航道纵向流速与分流比关系见图 10a), 横向流速与分流比关系见图 10b)。钢板桩围堰保留工况下, 大江、二江分流比越大, 1 号船闸口门区纵、横向流速越大。钢板桩围堰拆除工况下, 大江、二江分流比小于 0.9 时, 口门区纵、横向流速几乎无变化; 大江、二江分流比大于 0.9 时, 分流比越大, 1 号船闸口门区纵、横向流速越大。

当分流比大于 0.9 时, 拆除钢板桩围堰对口门区纵向流速几乎无影响, 横向流速增大程度略微减小; 当分流比小于 0.9 且越小时, 拆除钢板桩围堰, 将使口门区纵、横向流速增大。

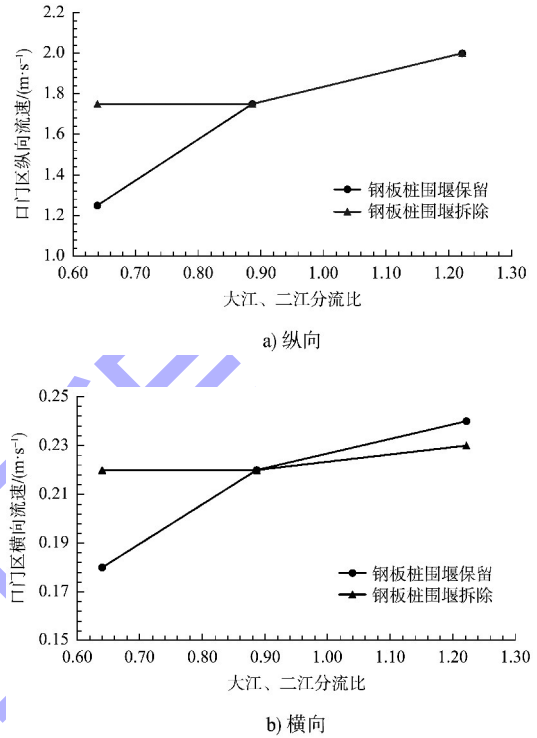


图 10 钢板桩围堰拆除和保留口门区航道流速与分流比关系

4 结论

1) 考虑钢板桩围堰的影响, 拆除钢板桩围堰对口门区水位以及回流流速影响较小; 在大江、二江分流比小于 0.9 时, 拆除钢板桩围堰会使口门区纵向流速与横向流速显著增大, 影响通航安全, 建议保留; 在分流比大于 0.9 时, 拆除钢板桩围堰对口门区纵向流速影响较小, 口门区横向流速随分流比增大而增大, 但增大程度略微减小。

2) 考虑不同组合泄水设施运行方式的影响, 通过开启大江排沙底孔数量可以改变大江、二江分流比, 不同组合泄水设施运行方式对于钢板桩围堰保留时的口门区航道纵横向流速的影响更显著, 且大江、二江分流比越大, 口门区纵、横向流速越大。

(下转第 189 页)