



深水库区急弯段航道通航能力提升方案 *

周彭雨¹, 马 倩^{1,2}, 薛宏程¹, 谢春航^{1,3}, 张绪进^{1,2}, 谢灵运^{1,3}

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400016; 2. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400016;
3. 重庆西科水运工程咨询中心, 重庆 400016)

摘要: 随着三峡和葛洲坝枢纽通航能力的提升, 两坝间航道仍是制约长江干线航运发展的瓶颈, 其中石牌弯段则是主要碍航段之一。针对石牌弯段采用原型观测和三维数值模拟方法, 分别开展隧洞引流和通航隧洞方案的研究。结果表明, 深水库区弯曲航道因分流隧洞进出口水面比降小、流速低, 分流量极其有限, 无法达到预期分流效果和改善急弯段通航条件的目的; 采用隧洞通航方式, 水力指标基本满足规范要求, 可有效提升通航效率。研究成果可为深水库区急弯航道通航能力的提升提供理论支撑和技术参考。

关键词: 深水库区; 石牌; 通航隧洞; 数值模拟; 航道整治

中图分类号: U611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0094-07

Improvement measures for navigation capacity of bend waterway in deep reservoir

ZHOU Pengyu¹, MA Qian^{1,2}, XUE Hongcheng¹, XIE Chunhang^{1,3}, ZHANG Xujin^{1,2}, XIE Lingyun^{1,3}

(1. Hehai College of Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

2. The Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

3. Chongqing Xike Consultation Center for Water Transport, Chongqing 400016, China)

Abstract: With the improvement of the navigation capacity of the Three Gorges and Gezhouba junction, the channel between the two dams is still the bottleneck that restricts the development of the Yangtze River shipping, and the Shipai bend section is one of the main obstructing sections. Aiming at solving the navigational obstruction problem of the Shipai bend, three-dimensional numerical simulation as well as prototype observation are adopted to carry out methods of diversionary and navigational tunnel. The results show that due to the small surface slope and low flow velocity at the entrance and outlet of the diversion tunnel of the bend waterway in a deep reservoir, the drainage capacity is extremely limited, the diversion results and the improvement of navigational conditions can't be achieved as expected. By using the tunnel navigation mode, the hydraulic index basically meets the standard requirements and can effectively improve the navigation efficiency. The research results can provide theoretical support and technical reference for improvement of sharp bends navigability in a deep reservoir.

Keywords: deep reservoir; Shipai; navigation tunnel; numerical simulation; waterway regulation

1 工程概况

三峡—葛洲坝(以下简称“两坝间”)全长 38 km, 地处川江航运的咽喉地段, 是我国长江航道主要

碍航河段之一^[1]。当汛期大流量时, 由于河道狭窄、水流不畅、坡陡流急、流态紊乱, 航行条件险恶, 尤其是水田角、喜滩、大沙坝、偏脑等洪

收稿日期: 2023-06-13

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52109150); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202000716)

作者简介: 周彭雨 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。

通讯作者: 马倩 (1988—), 女, 博士, 高级工程师, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: maggie@cqjtu.edu.cn

水急流险滩和弯度达到 90° 的石牌弯道等险滩情况最为突出, 是川江航道中船舶航行最为困难的区段。尤其是在三峡电站调峰和葛洲坝反调节过程中, 两坝间非恒定流产生的附加流速和比降会增加船舶航行阻力, 加大船舶上行难度^[2-3]。

石牌急弯河段是两坝间四滩一弯中的重点限制性航段, 两岸由石坡、陡岩及陡形石梁组成。南岸的石牌溪切于弯道方向入汇, 溪口下首有山脚潜伸江中, 将深泓折向北岸, 床面形成倒坡。受边岸和河床地形影响, 断面流速分布很不均匀, 中段转弯段右侧受挑流影响, 河面近 $1/3$ 河宽范围表现为回流, 左侧石牌凸岸下游表现为挑流, 成为本航段通航主要制约因素。该段航道汛期大流量时纵、横流速大, 泡漩、剪刀水强度大, 流态复杂, 加上接近 90° 的转弯(弯道转弯半径约780 m)以及三峡和葛洲坝枢纽的调节和反调节造成的非恒定流, 对船舶通航安全造成极大的影响, 从而影响两坝间整个航道的通过效率和通过能力^[4-7]。现状情况下汛期石牌为单向航行, 下行船舶航行时, 上行船舶在下游等待; 上行船舶航行时, 下行船舶在上游等待, 两坝间通航能力受限明显。随着国家长江黄金水道战略的逐步推进, 三峡石牌弯段通航能力需适应新需求^[8]。

近年来, 围绕两坝间航道汛期船舶通航安全、航道通过能力提升等问题开展了相关研究^[9], 由于两坝间河道两岸由石坡、陡岩及陡形石梁组成, 很难采用有效的工程措施解决。常见的河道水流调整的工程措施主要有疏浚、挖深、填补以及修筑丁坝、潜坝等航道整治建筑物^[10-12]。如图1所示, 石牌的整治措施为炸低滩段大片岩盘和水下凸嘴、抛填深槽、调整河床底坡, 以改善底流流态, 减小滩段竖轴回流范围, 削弱泡漩强度, 增大有效航宽。但以上工程措施在两坝间石牌河段实施的可行性较小, 且对通航水流条件的改善效果有限。

除传统航道整治措施外, 隧洞分流和通航隧洞亦逐渐得到应用。引水隧洞通过隧洞分流至下游,

改善航道通航水流条件, 提高船舶通过能力。通航隧洞则是山区狭窄河段开凿的隐蔽式航道, 其横断面布置形式主要有圆形、椭圆形、城门洞形和马蹄形等。英国 Standedge 采用城门洞形隧洞, 长3 595 m、宽6.6 m、水面以上高度2.44 m^[13]。我国构皮滩电站修建了马蹄形通航隧洞, 长424 m、宽16 m、高14 m^[14]。拟建的富春江曲墙式通航隧洞净宽18~22 m、净高7 m、通航水深3.5 m^[15]。可见通航隧洞已逐步应用于航道建设中, 但关于深水库区航道通航隧道尤其是急弯段的研究仍较少见。

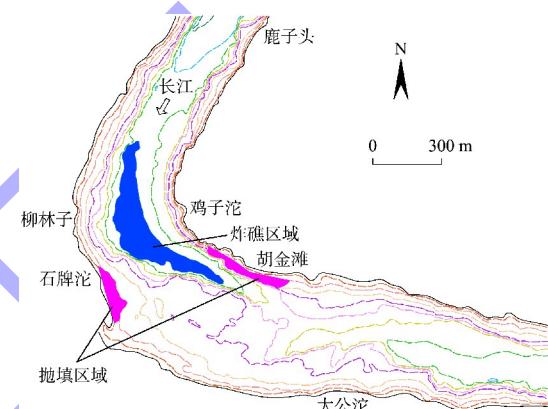


图1 石牌航道常规整治工程方案

本文重点针对两坝间石牌急弯段(图2), 结合通航环境水流基本情况、航行规则、通航尺度以及整体河势流态条件, 采用三维全数值模拟模型^[16], 研究截弯取直思路下隧洞分流及通航隧洞的航道整治改善措施^[17-18], 探索深水库区急弯段通航能力提升方案。

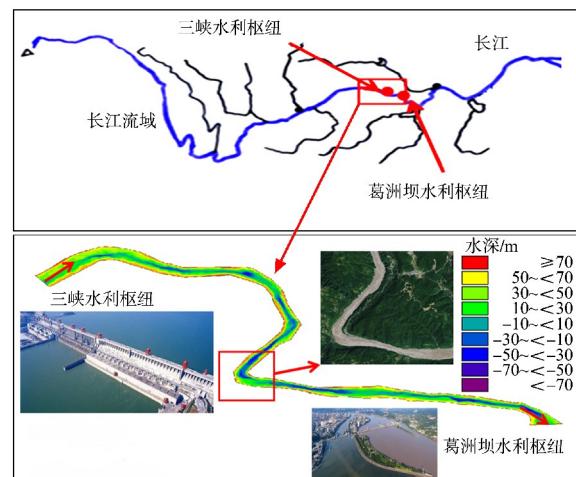


图2 长江流域及研究区域

2 隧洞引流方案

根据石牌弯道左岸地形条件，拟定引水隧洞进水口位于狮子脑滩左岸，出水口位于偏脑浅滩左岸支流上的洪溪汇合处。结合边坡岩土特点和实际经济效益，引水隧洞全长约 4.8 km。引水隧洞过流能力 Q 由下式计算：

$$Q = \frac{1}{\sqrt{1+\lambda}} \frac{l}{d} A \sqrt{2g z_0} \quad (1)$$

式中： λ 为水头损失， d 为隧洞直径， l 和 A 分别为长度和面积， $\Sigma \xi$ 为隧洞计算段中各局部水头损失之和， z_0 为隧洞进出口水头差。

不同洞径条件下隧洞分流能力计算结果见表 1。由计算结果可知，随着引水隧洞直径的增加，尽管隧洞分流能力有所提升，但仍然有限，当直径为 44 m 时，分流能力仅为 1 130 m³/s。原因在于石牌弯道段位于葛洲坝库区，隧洞进出口沿程水头差较小，隧洞过流能力较小。目前，三峡水利枢纽下游最高通航流量为 4.5 万 m³/s，而石牌急弯段通航条件在 $Q \geq 3.5$ 万 m³/s 时急剧恶化，该段分流流量需求最大值约为 1.0 万 m³/s。可见，分流隧洞远远不能满足需求，不足以根本改善石牌段通航水流条件。另一方面，弯道上下游较小的水头差为通航隧洞提供了条件。在满足工程施工及造价的条件下，通过合理设置隧洞线路、进口位置及断面形式，采用通航隧洞方式可解决石牌大流量下单向通航的问题，提高船舶航行效率及安全性。

表 1 不同引水隧洞直径过流能力计算结果

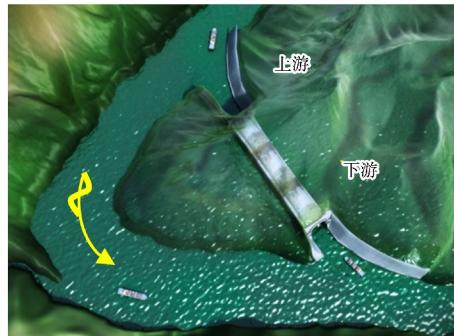
隧洞直径/m	10	20	34	44
过流能力/(m ³ ·s ⁻¹)	224	297	770	1 130

3 通航隧洞方案

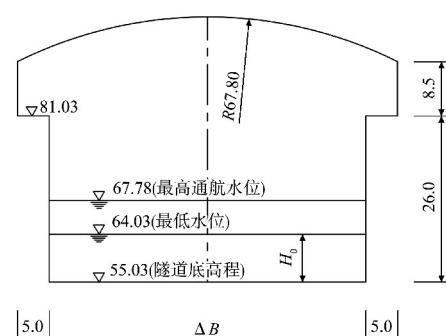
根据 GB 38030.1—2019《内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列第 1 部分：长江水系》，考虑工程河段航道情况和船型发展趋势，两坝间代表船型为 1 万吨级货船，尺寸为 130 m×22 m×5.5 m（长×宽×船舶吃水）。根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[19] 和 JTJ 305—2001《船闸总体设计规

范》^[20] 综合确定隧洞的尺寸参数。通航隧洞宽度可类比引航道宽度，通航隧洞最小水深可类比引航道最小水深。设计代表船舶最长为 130 m，最小弯曲半径为 650 m。通航隧洞进出口与主流夹角较大，应增大弯曲半径并拓宽进出口，因此通航隧洞弯道半径取 800 m；设计代表船舶宽 22 m，由于通航隧洞为限制性航道，按单向通航考虑，不考虑汇船等，通航隧洞宽度 B_0 不应小于 44 m。由于洞宽 44 m 的通航隧洞国内外鲜有工程实例，本研究结合《内河通航标准》，参照船闸宽度，确定本通航隧洞宽度为 34 m，并以 44 m 进行对比。通过计算得到 34 m 隧洞进出口的加宽量 ΔB 分别为 53.32 和 63.72 m；44 m 隧洞进出口的加宽量 ΔB 分别为 65.55 和 72.99 m；设计代表船型最大吃水为 5.5 m，通航隧洞的最小水深应不小于 8.25 m。考虑到富余深度，通航隧洞最小水深 H_0 确定为 9 m。

根据数模计算成果，当 $Q \geq 3.5$ 万 m³/s 时，石牌段最低水位为 64.03 m，因此隧洞底部高程最终定为 55.03 m，研究河段隧道平面及横断面布置见图 3。



a) 平面



b) 横断面

图 3 通航隧洞布置 (单位: m)

4 通航隧洞方案水流特性研究三维水动力数学模型

4.1 控制方程

FLOW3D 模拟采用笛卡尔坐标系, 其主要控制方程包括连续性方程、动量方程、紊动能 k 方程和耗散率 ε 方程。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

紊动能 k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

紊动能耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon}^* G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

其中: $G_k = \mu_t \left(\frac{\mu_i}{x_i} + \frac{\mu_j}{x_j} \right) \frac{\mu_i}{x_j}$ (6)

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{(1+\beta\eta^3)} \quad (7)$$

式中: t 为时间, s; x_i 为坐标分量, m; u_i 为速度分量, m/s; ρ 为密度黏性系数; μ 为分子黏性系数; μ_{eff} 为有效黏性系数; μ_t 为紊流黏性系数, 它的数值由紊动能 k 与紊动能耗散率决定; α_k 和 α_ε 分别为 k 和 ε 所对应的紊流普朗特数; G_k 为紊动能产生项。

4.2 模型建立与验证

建立石牌弯段三维数值模拟模型, 研究河段长 2.9 km, 网格数量为 65 436 个。模型采用原型观测数据进行验证, 观测时间为 2019-11-19T08:00:00, 三峡下泄流量为 4.5 万 m³/s。模型进出口水位由二维水流数学模型数据给出, 自由水面边界为压力边界条件。

图 4 为模型水位验证情况。由图可知, 各级流量下模型计算值与实测值匹配较好, 最大绝对误差为 0.078 m, 计算水面线与实测水面线水位误差控制在 0.10 m 以内, 满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》的要求^[21]。

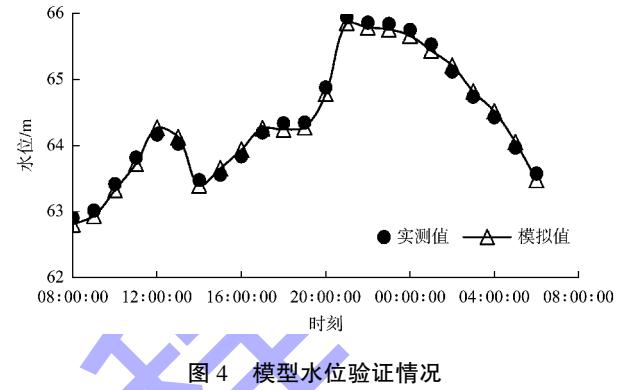


图 4 模型水位验证情况

4.3 工况设定

根据三维数值模拟结果, 在 $Q \geq 4.5$ 万 m³/s (葛洲坝坝前水位 66.0 m) 时, 石牌弯顶凹岸上游侧回流区范围急剧增大, 约占河段宽的 1/2, 在回流区和弯顶石盘的共同作用下, 急剧压缩水流, 加之该弯段曲率半径本就不足, 碍航特征较为明显。因此, 主要针对石牌河段遭遇 $Q \geq 4.5$ 万 m³/s 洪水时的通航条件进行分析。计算拟定工况见表 2。根据三峡出库流量和葛洲坝坝前水位, 采用长河段深度平均二维水力学模型确定石牌段三维模型的进出口水位。

表 2 各工况设定参数

工况	下泄流量/ (万 m ³ ·s ⁻¹)	葛洲坝坝前 水位/m	进口 水位/m	出口 水位/m
1	4.5	63	65.24	64.67
2	4.5	66	67.81	67.32

4.4 水流特性研究

4.4.1 整体流态特征分析

图 5 为工况 1 下 34 和 44 m 通航隧洞方案与天然河道整体流场数值模拟对比结果。通过比较分析, 通航隧洞实施后, 整体流态与天然河道基

本保持一致。但受隧洞分流的影响，介于隧洞进出口的石牌弯段主流流速略有减小。天然情况下，石牌弯道主流流速在 3 m/s 以上，弯顶最大流速约 3.2 m/s。通航隧洞方案实施后，石牌弯道主流流速均下降至 3 m/s 以下，弯顶主流最大流速下降至 2.85 m/s 左右。

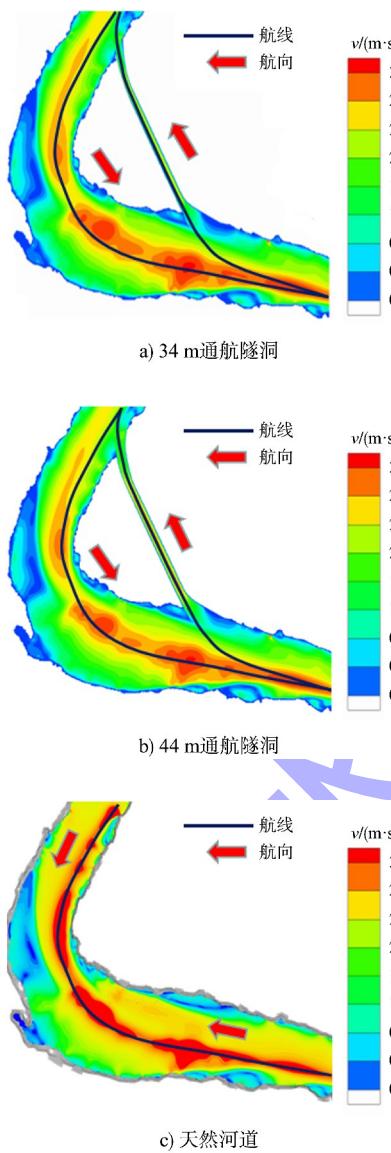


图 5 2 种通航隧洞方案和天然河道流场数值模拟结果对比

图 6 为通航隧洞不同宽度时的流场流速。由图可知，隧洞宽度为 34 m 时，通航隧洞分流流量约 $770 \text{ m}^3/\text{s}$ ，相应单宽流量为 $22.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，最大流速为 2.40 m/s ，断面平均流速为 2.35 m/s ；隧洞宽度为 44 m 时，通航隧洞分流流量约 $1130 \text{ m}^3/\text{s}$ ，相应单宽流量为 $25.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ，最大流速为 2.70 m/s ，

断面平均流速为 2.62 m/s 。

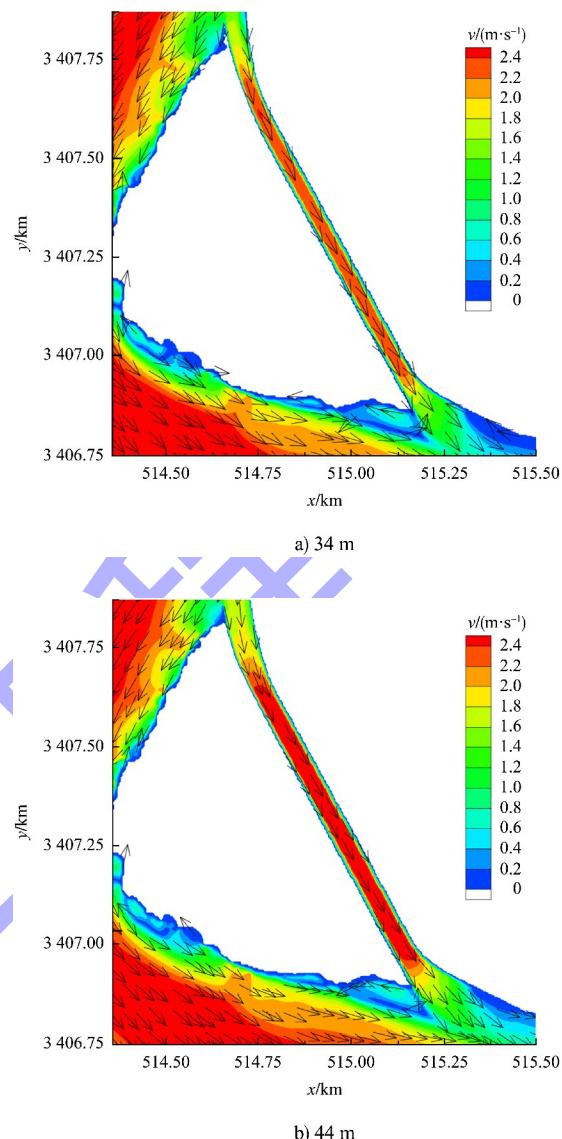


图 6 通航隧洞不同宽度时的流场流速

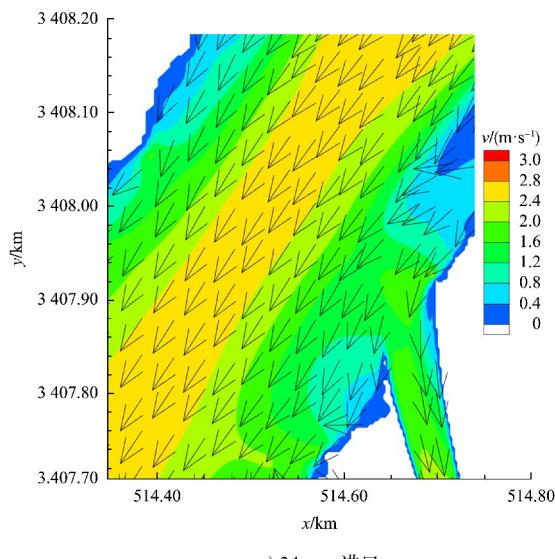
4.4.2 进出口局部水流条件分析

拟定隧洞进口位于大沙坝下游侧，出口位于胡金滩码头下游侧，长约 2 km。根据内河通航标准，引航道口门区纵、垂向流速分别不得超过 2.0 m/s 和 0.3 m/s 。通航隧洞进出口位于岸边，中心延长线位于上游岸线翻转形成的弱回流区与河流干流的过渡区域。隧洞进出口纵向流速小于 2.0 m/s ；隧洞出口中心延长线与河道水流方向夹角较小，对应的最大横向流速小于 0.3 m/s 的限制指标；但其进口中心延长线的夹角较大，对应最大横向流速远大于 0.3 m/s 的限制指标，会影响船舶航行安

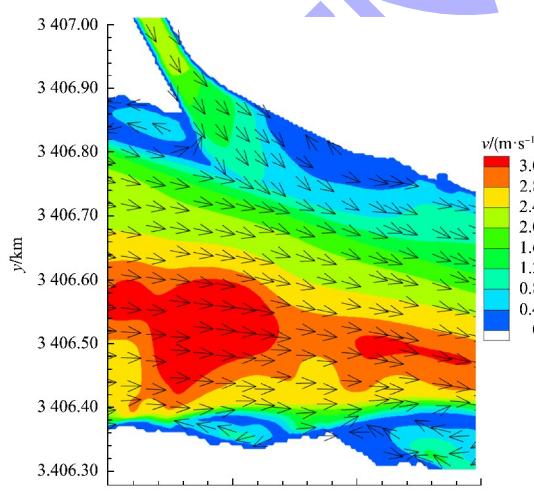
全。现选取 $Q=4.5$ 万 m^3/s 、葛洲坝水位 $H=63\text{ m}$ 工况作为分析对象, 流场参数信息见表3, 流速分布情况见图7。

表3 隧洞进出口水流特征参数

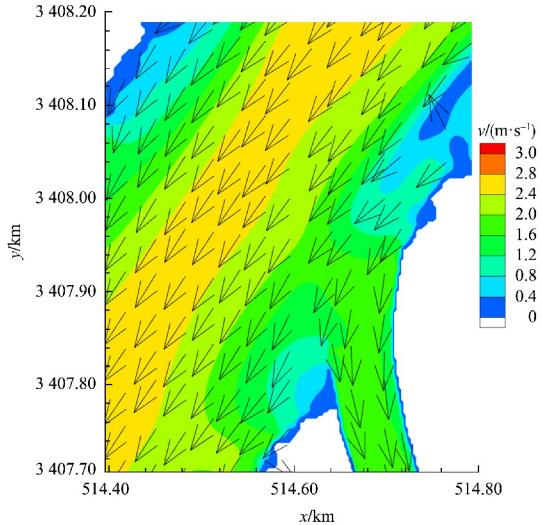
隧洞尺寸/m	位置	流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	回流流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	夹角/ $(^\circ)$	横向流速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
34	入口	1.4~1.7	0.2~1.1	32~50	1.15
	出口	1.0~1.3	0.2~0.7	0~6	0.11
44	入口	1.4~1.8	0.2~1.1	27~43	1.02
	出口	1.0~1.35	0.2~0.8	0~6	0.13



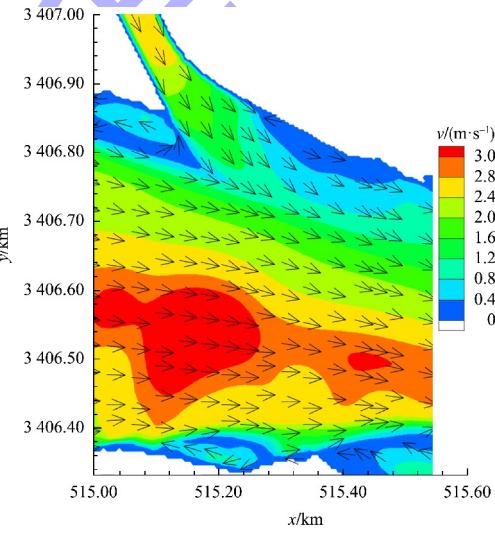
a) 34 m, 进口



b) 34 m, 出口



c) 44 m, 进口



d) 44 m, 出口

图7 通航隧洞进出口附近流速矢量

根据计算通航隧洞引水流量为 $770\text{ m}^3/\text{s}$, 单位宽度流量为 $22.6\text{ m}^3/\text{s}$ 。隧洞内最大流速和平均流速分别为 2.40 和 2.35 m/s 。通航隧洞对主流有一定分流作用, 隧洞进、出口断面主流流速略有下降。自然条件下, 石牌主流流速大于 3 m/s , 顶点处最大流速约为 3.2 m/s 。通航隧洞修建后, 石牌主流流速降低至 3 m/s 以下, 顶点处最大流速降低至 2.85 m/s 左右, 可见通航隧洞的修建一定程度改善了石牌弯段通航条件。

借鉴天然河道船舶上滩水流指标, 参照经验公式对上滩指标进行确定:

$$E = \lambda L J + \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

式中: E 为船舶航行综合阻力系数; λ 为系数, 一般取 1.5~2.0; L 为船型长度; J 为水面比降; v 为流速; g 为重力加速度。根据计算结果(图 8), 34 m 隧洞方案中沿程船舶航行综合阻力系数为 0.24~0.44, 沿隧洞中心线最大 v 和 J 分别为 2.38 m/s 和 0.98‰; 44 m 隧洞方案中沿程船舶航行综合阻力系数为 0.25~0.52, 沿隧洞中心线最大 v 和 J 分别为 2.66 m/s 和 0.96‰, 均小于极限值。

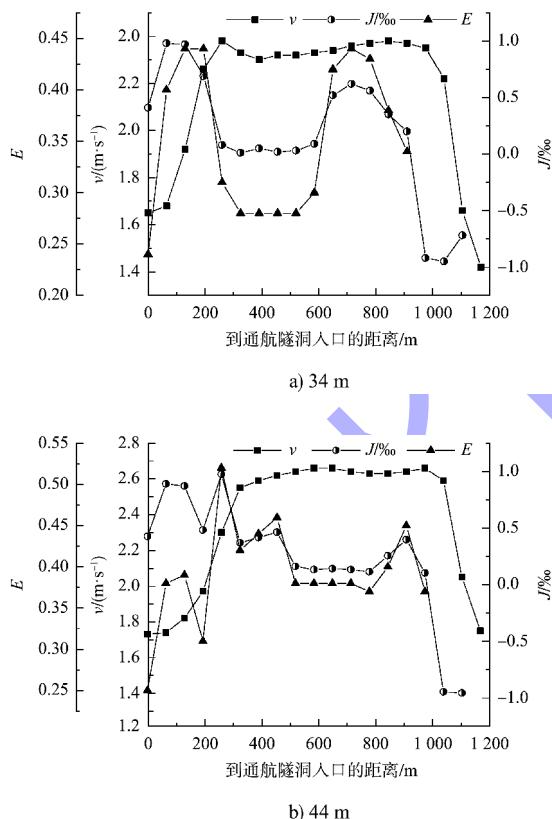


图 8 通航隧洞内综合阻力系数

5 结论

1) 石牌弯道位于葛洲坝库区, 弯道上、下游水位差小, 引水隧洞分流能力有限, 不足以根本性改善石牌段的通航水流条件。

2) 通过修建通航隧洞实现分向航行, 避免船舶汛期从石牌急弯段复杂通航条件下航行至上游, 船舶航行安全得到保障, 且能提高该河段的通过

能力。与现状情况下汛期急弯河段泡漩和剪刀水强度大、范围广等复杂流态相比, 船舶通航条件有显著改善。

3) 现行方案下隧洞进口中心延长线与河道水流方向夹角较大, 最大横向流速大于限制指标 0.3 m/s, 且隧洞进出口上游侧均存在一定范围的回流区, 将影响船舶通航安全。下一阶段将进一步优化隧洞断面尺寸及船舶航行方式, 改善隧洞进出口通航水流条件, 并对通航安全保障措施开展深化研究。

参考文献:

- [1] 钱红露, 尹维清, 程稳, 等. 高山峡谷河段枢纽运行对下游水位变幅影响研究: 以金沙江乌东德水电站为例[J]. 人民长江, 2021, 52(4): 100-106.
- [2] 张绪进, 吴澎, 王召兵, 等. 三峡新通道研究进展及主要技术问题[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(S1): 33-40.
- [3] 齐俊麟, 陈冬元, 李然. 三峡—葛洲坝梯级枢纽通航二十年创新发展与实践[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 155-166.
- [4] 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.
- [5] 王玮. 两坝间喜滩长直窄深型急滩治理方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [6] 冯小香, 李建兵, 樊建超. 三峡两坝间水田角河段航道整治三维水流数学模型应用研究[J]. 水道港口, 2010, 31(6): 577-582.
- [7] 袁涛峰, 曾涛, 马宪浩. 长江三峡两坝间河段航道整治方案[J]. 中国港湾建设, 2012(1): 15-18.
- [8] 钮新强. 长江黄金水道建设关键问题与对策[J]. 中国水运(上半月), 2015(6): 10-12.
- [9] 章日红. 三峡—葛洲坝两坝间乐天溪航道整治工程可行性研究[J]. 中国水运(下半月), 2011, 11(8): 152-153.
- [10] 陈素红, 李学海. 三峡—葛洲坝两坝间航道整治工程方案试验研究[J]. 水运工程, 2010(1): 94-101.
- [11] 邹永胜, 王智, 刘立, 等. 三峡—葛洲坝两坝间航道整治炸礁工程分层爆破关键技术研究[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(8): 82-83.

(下转第 106 页)