



基于船舶安全通航的厢廊急弯段 航道整治研究 *

王斐, 闫涛, 李少希, 乾东岳

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 厢廊急弯段河道河面较窄, 弯顶航道转向角较大, 入弯和出弯段主流流速较大, 因此, 针对船舶在上、下行无法通过厢廊急弯段的问题, 进行急弯段航道整治的研究。采用正态定床物理模型试验的方法, 并结合船模试验, 通过分析沿程水位、航中线流速、航道横向流速及船模航行参数等指标, 得出疏浚和调整航线相结合的较优整治方案。试验结果表明, 采取凹岸和凸岸同时开挖的整治方案, 在最大通航流量 $2\,010 \text{ m}^3/\text{s}$ 内可航水域范围, 航线纵向及横向流速等通航水流条件均有所改善, 船舶过弯航迹带减小, 双向通航船舶可顺利通过厢廊急弯段。本研究可为类似急弯段航道整治研究提供借鉴。

关键词: 安全通航; 急弯段; 航道整治; 凹岸; 凸岸

中图分类号: U 617; U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)04-0146-05

Channel regulation of sharp bend in compartment corridor based on safe navigation of ships

WANG Fei, YAN Tao, LI Shao-xi, QIAN Dong-yue

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Key Laboratory of Engineering Sediment, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: The river channel of the sharp-bend compartment corridor is sharp bend and the river surface is narrow. The turning angle of the channel at the top of the curve is large, and the mainstream flow velocity at the turning section is high. To counter the problem that ships cannot pass the turning section of the corridor, we carry out a study on channel regulation at the sharp bend section. By the method of normal fixed bed physical model test and combining with the ship model test, we obtain the optimal regulation scheme which combines dredging with adjusting course based on the analysis of the indices such as the water level along the course, the velocity of the midcourse, the transverse velocity of the channel and the ship model sailing parameters. The experimental results show that, in the navigable water area with the maximum navigable flow of $2\,010 \text{ m}^3/\text{s}$, the navigable flow conditions, such as longitudinal and transverse velocity, are improved, the ship's curved track zone is reduced, and the two-way navigable ships can pass through the sharp bend section of the corridor smoothly. This study can provide reference for the regulation of waterway in similar sharp curve sections.

Keywords: safe navigation; sharp bend; channel regulation; concave bank; convex bank

山区河流广泛分布于我国西南、中南部地区, 其航运开发对腹地经济的发展起着积极的推动作用。“十三五”国家内河高等级航道网建设规划包含了川、渝、湘、黔等地的嘉陵江、岷

江、乌江、湘江、沅水、南盘江以及两广地区的红水河、柳江、黔江、北江等众多山区河流。因山区河流具有河道狭窄、弯曲, 枯水流量小、历时长, 而洪水流量陡增, 洪、枯水位变幅大等特

收稿日期: 2021-06-28

*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(TKS20200303)

作者简介: 王斐(1987—), 女, 硕士, 工程师, 从事航道规划设计工作。

通讯作者: 闫涛(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 从事航道规划设计工作。Email: yantao198807@126.com

点,山区河流航道建设常面临弯、急、浅、险等碍航问题,特别是急弯河段航道,不仅自然弯曲而且非常狭窄,限制了航行船舶过弯尺度,增加了船舶操作难度^[1-5]。本文以厢廊急弯段为研究对象,采用物理模型与船模试验相结合的研究手段,分析研究水位变化、航道流速及航线布置等对船舶航行的影响,以期为类似工程整治提供参考。

1 厢廊急弯段概况

厢廊急弯段位于珠江水系北江干流上源的武江段,是弯曲型的山区河流(图1)。武江厢廊弯道急弯且河面较窄,弯顶航道转向角较大,入弯和出弯段主流流速较大,船舶在上下行通过弯顶时也均需占用对向航道,在流量较大时上下行船舶无法通过厢廊急弯段。现阶段该航道维护等级为VI级,通航100吨级船舶,航道维护尺度为 $1.0\text{ m} \times 30\text{ m} \times 180\text{ m}$ (航深×航宽×弯曲半径),保证率为90%。航道整治目标按内河Ⅲ级、设计航道尺度 $2.5\text{ m} \times 60\text{ m} \times 270\text{ m}$ 、通航1 000吨级船舶标准建设。其中整治流量 $192\text{ m}^3/\text{s}$,整治水位 62.9 m ,整治线宽度 $150\sim200\text{ m}$ 。



图1 武江厢廊急弯河段平面河势

2 试验设计

本试验采用1:100正态模型,模拟河段长度5 km(图2),通过水面线、流速和流态的验证试验,模型与原体的水流运动达到了相似要求。选用的1 000吨级单船尺度为 $80\text{ m} \times 10.8\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ (长×宽×满载吃水)。船模几何比尺同为1:100。试验典型流量级见表1。

表1 试验典型流量级

流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	流量特征	备注
151	-	-
605	-	-
1 200	-	现阶段航道最大通航流量
2 010	2 a一遇	现阶段塘头枢纽最大通航流量
3 140	5 a一遇	-
3 920	10 a一遇	-

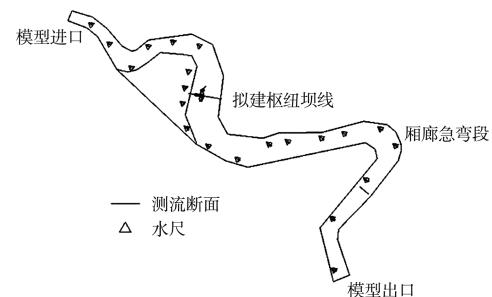


图2 模型模拟河段范围

3 整治方案研究

3.1 凹岸开挖

3.1.1 方案布置

岸坡切除区域底高程58 m,坡度1:2.5,为防止岸坡冲刷,采取护岸工程措施提高岸坡的整体稳定性。入弯口航宽由60 m扩展至90 m,向下游直线段连接弯曲半径为338 m,弧长为1.1 km的圆弧段,出弯段与直线航道衔接,出弯段原开挖区附近航宽60 m(图3)。

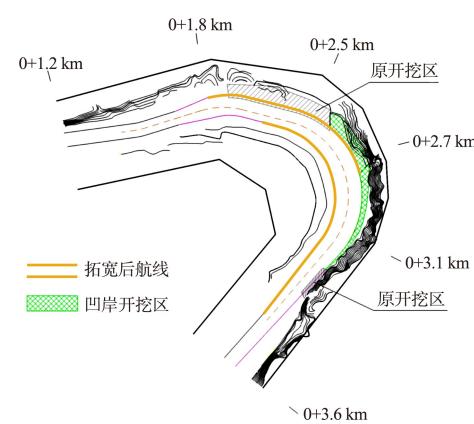


图3 凹岸开挖方案布置

3.1.2 整治效果

试验结果表明:以桥址下游3 km处为分界,上半段出现了明显的水位降落,且桥址处的降幅为最大。在中、枯水流量下,水流基本归于航槽,出现大幅度水位降落,当流量为 $605\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水

位最大降幅达 1.2 m, $1\ 200\text{ m}^3/\text{s}$ 时为 0.98 m; $2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 时为 0.95 m, 沿程比降最大 0.86‰。随着流量的增大, 归槽水流流量占比下降, 因而水位降幅也逐渐减小, 至 $3\ 920\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时, 水位降幅为 0.8 m。桥下 3 km 下游, 水位与天然情况基本一致。航中线最大纵向流速位于入弯段, 最大横向流速位于在距桥址约 3.1 km 处。随着流量的增加, 航中线纵向、横向流速逐渐增加, $Q < 2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 整个航段 v_y 均在 3 m/s 内, v_x 均在 0.8 m/s 内; $Q = 2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, $v_{y\max}$ 为 3.3 m/s, $v_{x\max} > 1\text{ m/s}$; $Q = 3\ 920\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 入弯段 v_y 达 4 m/s。在流量 $2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 下, 桥下 3.1 km 处航道内 $v_{x\max} > 1\text{ m/s}$ 。

当流量 $Q \leq 1\ 200\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 代表船型上、下行均能够通过弯道段, 且均可沿各自的设计航线航行, 会船时航迹带距离满足安全航行要求; 流量 $Q = 2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 船舶航行通过弯道段时漂角最大为 -18.41° , 航迹带宽度最大约为 31.94 m, 通过该段航道时船舶最大对岸航速为 6.69 m/s, 操控风险较大。

3.2 凸岸开挖

3.2.1 方案布置

切除区域底高程取 58 m, 坡度 1:2.5。本河段来沙量不大, 冲淤变幅有限, 若凸岸开挖后发生累积性淤积, 可通过维护性疏浚保证整治效果。入弯口上行航线以半径 480 m, 弧长为 300 m 的圆弧逐渐与原航线分离, 下接 150 m 直线段, 与半径 300 m, 弧长 610 m 的圆弧段连接, 出弯段与原航线直线段衔接(图 4)。

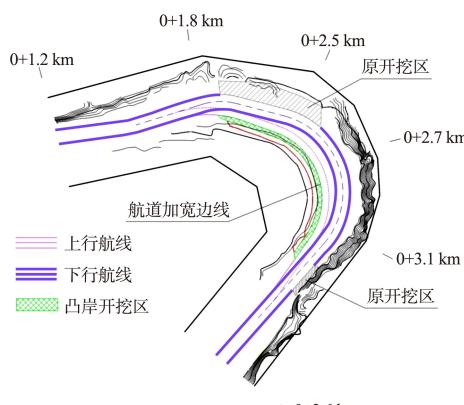


图 4 凸岸开挖方案布置

3.2.2 整治效果

方案实施后, 当流量为 $605\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 水位最大降幅达 1.2 m, 随着流量的增大, 水位降幅基本保持在 1 m 左右, 如 $1\ 200\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时水位最大降幅为 1.01 m; $2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时水位最大降幅为 1.05 m; 至 $3\ 920\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时, 水位降幅为 0.85 m。在 $2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 及以上流量时, 桥址下游 3 km 内河段出现了 5~10 cm 的水位降幅, 沿程比降最大 0.81‰。

下行航中线的纵、横向流速较上行航线大, 与天然情况相比, 上、下行航线的通航水流条件明显改善。1) 上行航中线, $Q < 2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, v_y 均在 3 m/s 内, v_x 基本在 0.6 m/s 内; 在 $Q = 2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, v_y 均在 3 m/s 内, v_x 在 0.9 m/s 内; 在 $3\ 920\text{ m}^3/\text{s}$ 下, 仅在入弯段流速超 3 m/s, 其余航段 v_y 均小于 3 m/s。2) 下行航中线, $Q < 2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, v_y 均在 3 m/s 内, v_x 均在 1.0 m/s 内; $Q = 2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, v_y 大部分在 3 m/s 内; 在 $3\ 920\text{ m}^3/\text{s}$ 下, $v_{y\max}$ 接近 4 m/s, $v_{x\max}$ 超过 1.5 m/s; 而桥下 3.1 km 处 $v_{x\max}$ 超过 1 m/s; 在 $2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下, 距桥下 2.7~3.2 km 范围航道内 v_x 超 0.7 m/s。

当流量 $Q \leq 1\ 200\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 代表船型上、下行均能够通过厢廊弯道段, 且均可沿各自设计航线航行, 会船时距离满足安全航行要求; 流量 $Q = 2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 当船舶以 4.0 m/s 航速下行时, 航行漂角最大为 -18.81° , 航迹带宽度最大时约为 30.42 m。同时, 由于船舶静水航速较大, 致使船舶航行于厢廊弯道段时对岸航速较大, 最大时为 6.54 m/s, 船舶虽能顺利通过厢廊弯道, 但对岸航速过快将加大船舶操控难度, 存在安全隐患; 流量 $Q = 2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 厢廊弯道入弯段(桥下约 1.8 km 处)由于水流流速较大, 使得船舶上行通过此航道时急流区段船舶无法上行, 须寻找缓流区通过, 对岸航速最小时为 0.46 m/s。

3.3 凹岸与凸岸开挖相结合

单侧开挖方案在 $Q = 2\ 010\text{ m}^3/\text{s}$ 下, 船舶航行于弯道段时存在操控风险, 随后开展研究凹岸与凸岸开挖相结合的方案。通过对方案实施后急弯

段的水位变化和航道水流条件进行研究, 得到满足通航要求的布置方案。

3.3.1 方案布置

将单侧开挖方案相叠加, 凸岸回填原方案开挖量的 $1/2$ 。凹岸开挖方案的航道左边线为本方案航道左边线, 航道右边线沿凸岸开挖坡底线, 向河内移动 10 m 。航宽由入弯段 60 m 逐渐加大至 150 m , 弯曲半径 382 m , 随后在出弯段缓慢过渡至 60 m , 并且将出弯段左侧岸线进一步平顺(图5)。

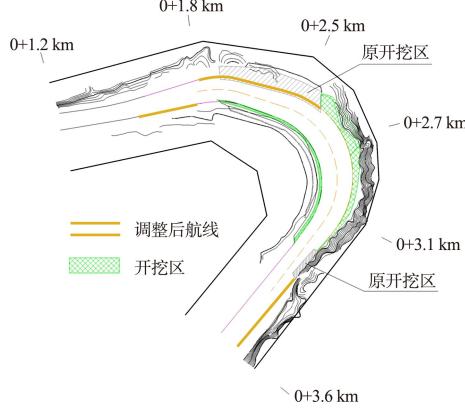


图5 凹岸与凸岸结合开挖方案布置

3.3.2 整治效果

1) 当流量为 $1200\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $2010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 在桥址下游 $0\sim 2\text{ km}$ 范围内均出现水位下降, 降幅在 $0.15\sim 0.35\text{ m}$, 沿程局部比降最大达 0.57% ; 而在桥址下游 $2\sim 5.5\text{ km}$ 河段, 凹岸与凸岸结合开挖方案的沿程水位与前述几组方案趋于一致。

2) 上行航中线流速变化。船舶靠右抱凸岸上行。在 $2010\text{ m}^3/\text{s}$ 流量以下, v_y 均在 3 m/s 内, v_x 基本在 0.5 m/s 内。当流量不超过 $2010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 急弯段航中线 v_y 基本在 3 m/s 以内; 遇 5 a 一遇洪水 $3140\text{ m}^3/\text{s}$ 及 10 a 一遇洪水 $3920\text{ m}^3/\text{s}$ 流量, 弯道上半段(桥下 2.5 km 航道)流速超过 3 m/s , 其余航段航中线 v_y 均小于 3 m/s 。横向流速方面, 当流量不超过 $2010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 急弯段航中线 v_x 基本在 0.8 m/s 以内。与单侧开挖方案横向流速($>0.9\text{ m/s}$)相比, 上行航线的通航水流条件改善明显。

3) 下行航中线流速变化。下行航线更靠近凹岸, 在 $2010\text{ m}^3/\text{s}$ 流量以下, v_y 均在 2 m/s 内, v_x 基本在 1 m/s 内。当流量为 $2010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 航中线 v_y 值均小

于 3 m/s ; 当流量增大至 5 a 一遇洪水流量 $3140\text{ m}^3/\text{s}$ 和 10 a 一遇洪水流量 $3920\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 急弯段航中线 $v_{y\max}$ 接近 4 m/s 。从横向流速变化看, $1200\text{ m}^3/\text{s}$ 流量以内, 急弯段航道航中线流速均小于 1 m/s , 随着流量的增大, $2010\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下 $v_{x\max}$ 为 1.1 m/s , $3920\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下航中线 $v_{x\max}$ 1.57 m/s 。较单侧开挖方案下行航线的通航水流条件有所改善。

4) 航道横向流速分布。当流量在 $2010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 桥下 $2.5\sim 3.1\text{ km}$ 航段出现大范围横向流速超过 0.7 m/s 的情况, 桥下 3.1 km 处 $v_{x\max}$ 超过 1 m/s 。

5) 船模试验。船模航行试验参数漂角、航迹带宽度及最大对岸航速均有改善。当流量 $Q \leq 1200\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 代表船型上、下行均能够通过厢廊弯道段航道, 且均可沿各自设计航线航行, 会船时距离满足安全航行要求; 当流量 $Q = 2010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 船舶航行通过弯道段航道时漂角最大为 -18.74° , 航迹带宽度最大时约为 29.08 m 。船舶下行通过弯道段航道时船舶最大对岸航速为 5.87 m/s 。

4 方案对比

4.1 沿程水位

凹岸开挖方案中, 由于开挖区位于弯顶偏下, 范围有限且基本处于下游溢洲枢纽的回水淹没范围, 故引起的水位变化有限。凸岸开挖方案的水位在 $2010\text{ m}^3/\text{s}$ 及以上的洪水流量下, 略低于凹岸开挖方案, 幅度在 $5\sim 8\text{ cm}$ 。以桥址下游 3 km 处为分界, 各方案下上半段出现明显的水位降落, 且桥址处降幅最大。当流量为 $2010\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 在桥址下游 $0\sim 2\text{ km}$ 航段内, 凹岸与凸岸结合开挖方案的沿程水位较单侧开挖方案降落有所增大, 最大降幅达 0.29 m 。同样, 在桥址下游 $2\sim 5.5\text{ km}$ 河段内, 几组方案的水面线趋于一致(图6)。

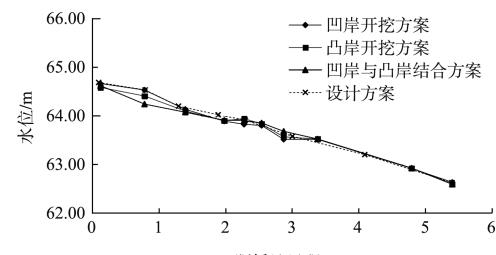


图6 各方案 $Q=2010\text{ m}^3/\text{s}$ 下沿程水位

4.2 航中线流速

航中线最大纵向流速位于入弯段，最大横向流速位于在距桥址约 3.1 km 处。随着流量的增加，航中线纵、横向流速逐渐增加。凹岸开挖下 $Q=2\,010 \text{ m}^3/\text{s}$ 时， $v_y \max$ 为 3.3 m/s， $v_x \max$ 超过 1 m/s；在流量 $2\,010 \text{ m}^3/\text{s}$ 下，桥下 3.1 km 处航道内 $v_x \max$ 超过 1 m/s。

凸岸开挖方案下，下行航中线的纵、横向流速均较上行航线大。上行航中线，在流量 $2\,010 \text{ m}^3/\text{s}$ 时， v_y 均在 3 m/s 内， v_x 在 0.9 m/s 内；下行航中线，在流量 $2\,010 \text{ m}^3/\text{s}$ 时， v_y 大部分在 3 m/s 内，而桥下 3.1 km 处 $v_x \max$ 超过 1 m/s，

凹岸与凸岸开挖相结合方案下，船舶靠右抱凸岸上行。当流量不超过 $2\,010 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，急弯段航中线 v_y 基本在 3 m/s 以内， v_x 基本在 0.8 m/s 以内。与单侧开挖方案横向流速即超过 0.9 m/s 相比，上行航线的通航水流条件改善明显。下行航线更靠近凹岸，当流量为 $2\,010 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，航中线 v_y 值均小于 3 m/s， v_x 最大 1.1 m/s，较单侧开挖方案下行航线的通航水流条件有所改善。各方案 $Q=2\,010 \text{ m}^3/\text{s}$ 下航中线流速见图 7。

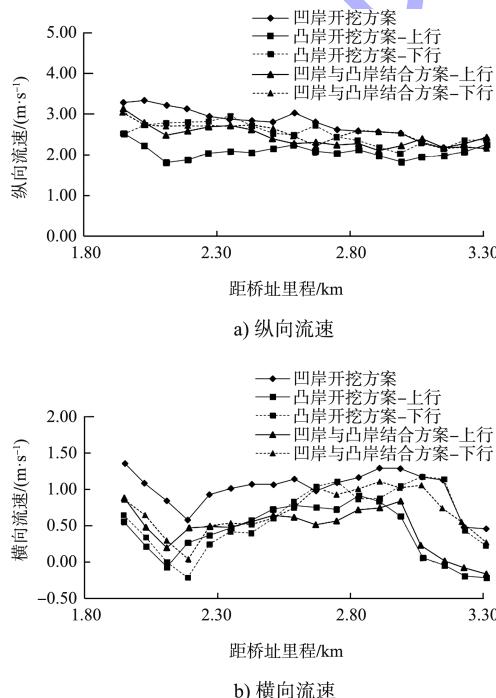


图 7 各方案 $Q=2\,010 \text{ m}^3/\text{s}$ 下航中线流速

4.3 最大航宽

凹岸开挖方案的入弯口航宽由 60 m 扩展至

90 m，出弯段航宽逐步收窄至 60 m；凸岸开挖方案的入弯口上行航线分离，双向最大航宽 120 m，出弯段收窄至 60 m；凹岸与凸岸结合开挖方案的入弯段航宽由 60 m 扩展至 150 m，出弯段航宽逐步收窄至 60 m。

5 结论

1) 针对厢廊急弯段的双向通航问题，采用物理模型试验结合船模试验的研究手段，提出单侧开挖方案及两岸同时开挖方案的整治思路，形成 3 组能够满足厢廊急弯段双向通航的布置方案，最大通航流量均可以达到 $1\,200 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2) 从弯道可航水域范围、下行航线纵向流速及下行时对岸航速大小，选定在凹岸与凸岸开挖相结合的基础上，凸岸回填 $1/2$ 做为厢廊急弯段航道整治的推荐方案。该方案实施后，可航水面范围最大航宽达 150 m，较凹岸开挖方案 90 m 航宽有较大增幅；下行航线纵向流速最大为 1.74 m/s，较凹岸开挖方案减小 0.36 m/s；在流量 $Q=2\,010 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，船舶通过弯道段航道时漂角、航迹带宽度等都有所降低。推荐凹岸和凸岸相结合的开挖方案。

3) 本文提出的整治措施对环境影响较小，且施工工艺较为简便，可为类似急弯段航道整治工程提供参考。

参考文献：

- [1] 李顺超, 张有林, 何熙, 等. 岷江下段航道典型滩险整治技术[J]. 水运工程, 2020(4): 84-91.
- [2] 郭红民, 覃闪, 蔡黎明, 等. 急弯段闸孔出流的弯道水流特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2015(3): 24-30.
- [3] 解中柱. 神背嘴滩整治方案与治理效果分析[J]. 水道港口, 2010, 31(5): 468-472.
- [4] 王常红, 何文辉, 程小兵, 等. 急弯河段通航水流条件与航道宽度关系研究[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 353-357.
- [5] 颜志庆, 赵建钧, 姜晋德, 等. “S”形急弯河段通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2021(6): 128-134.