



# 黄河多泥沙桥区河段航道整治技术

张国瑞, 李顺超, 刘泓江, 晏建奇

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

**摘要:** 黄河银川段为典型的游荡性平原河流, 河床质为细沙, 易冲易淤。涉水设施易引起沙质河床泥沙运动规律改变、河床地形发生不可预测的冲淤演变, 水流流态紊乱, 不利于船舶通过桥区河段, 碍航滩险增多, 整治难度加大。通过河床演变分析, 借助数值模拟技术分析各代表流量下多泥沙桥区河段的水流流态和夹角、涉水建筑阻水率等参数, 研究桥区河段的航道整治技术, 兼顾对行洪影响, 固化航槽, 寻求航道整治和行洪等的平衡。结果表明, 该航道整治技术使航道整治、行洪与桥梁建设相结合, 既可以满足航道通航条件, 也可以满足行洪要求, 有利于船舶通航和桥梁建设。

**关键词:** 沙质河床; 桥区河段; 航道整治

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0095-06

## Channel regulation technology of river reach in sediment-laden bridge area of the Yellow River

ZHANG Guo-rui, LI Shun-chao, LIU Hong-jiang, YAN Jian-qi

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

**Abstract:** The Yinchuan reach of the Yellow River is a typical wandering plain river. Its bed material is fine sand, which is easy to be washed and silt. The wading facilities are prone to change the sediment movement law of the sandy riverbed, cause unpredictable scouring and silting evolution of the riverbed terrain, and result in the turbulence of the water flow pattern, which is not conducive to ships passing through the reach in the bridge area. As a result, it increases the risk of navigation obstacles and the difficulty of regulation. Based on the analysis of riverbed evolution, this paper uses numerical simulation technology to analyze the water flow pattern and included angle of the reach in the sediment-laden bridge area under representative flows, the water blocking rate of wading buildings, and other parameters. In addition, the paper studies the channel regulation technology of the reach in the bridge area, which considers not only its impact on flood discharge and channel solidification but also navigation channel regulation and flood discharge. The results show that this channel regulation technology has combined navigation channel regulation, flood discharge, and bridge construction, and it can not only satisfy the navigation conditions of the channel but also meet the flood discharge requirements, which is conducive to ship navigation and bridge construction.

**Keywords:** sandy riverbed; reach in bridge area; channel regulation

黄河是中华文明最主要的发源地, 是我们的“母亲河”。黄河为世界上含沙量最多的河流, 每年都会挟带大量的泥沙, 其中四分之三的泥沙流入大海, 剩下四分之一的泥沙长年留在黄河下游,

形成冲积平原。黄河宁夏银川段属于黄河上游下河沿—河口镇段, 比降平缓, 两岸有大面积的引黄灌区和待开发的干旱高地。

近年来, 银川市贯彻自治区铁路“842”发展

战略、围绕国家高速扩容改造、县际高速互连互通、普通国省干线提质扩容和城市过境段改造等，铁路、公路工程建设得到了快速发展，跨黄河桥梁的建设也由此产生，但涉水桥墩的存在会引起桥区河段水沙条件的变化，进而影响通航。

本文结合黄河多泥沙桥区河段的航道整治工程，综合分析受桥梁布置影响下的航道整治方案设计，并提出切实可行的综合整治措施和原则，为今后类似桥区河段整治提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 河段滩险概况

大桥所在河段河势微弯，河道平面宽窄相间，呈藕节状；河床宽浅，洲滩密布，汊道丛生，洲滩密布，水流散乱；年际主流摆动剧烈，横向变形大，岸边顶冲点多变。枯水河道形态弯曲多变，边界条件较复杂。枯水期水流归槽，比降平缓，但右汊左槽局部航深不足，通航条件较差。中水期水位有所抬升，受岸边矶头、凸嘴影响，局部存在不良流态，横向流较大，影响船舶通航。洪水期江心洲自洲头逐渐被淹没，水流漫滩，流速流态良好；大洪水时，河面展宽，水流漫滩，流速流态良好。主要是枯水期碍航。

滩险左侧边滩处于持续发育状态，河道变化较为频繁，尤其是边滩稳定性差，岸线不稳定，年际间航槽变化较大，航道条件受边滩变化影响较大。

### 1.2 大桥概况

某大桥主桥采用预应力钢筋混凝土连续梁桥，桥跨布置为3联×6跨×80 m，桥长1 440 m，下部结构采用矩形墩及柱式墩、桩基础，肋板台桩基础。

设计最低通航水位时，有3个桥墩涉水，桥墩截面尺寸为3.4 m×6 m(宽×长)，承台截面尺寸为8.4 m×30 m，测量时水中桥墩承台出露于原地面线以上。

## 2 水文和泥沙条件

### 2.1 水文

黄河宁夏银川段多年平均降水量为179 mm，多年平均水面蒸发量为1 170 mm；平均相对湿度

为56%；多年平均气温8.5 °C，气候日变差大，属于典型的中温带大陆性气候。洪水主要由降雨形成，一般在6—10月，大洪水一般发生在7、9月，尤以9月居多，洪峰不高，涨落也比较平缓，一次洪水延续时间一般为1个月左右。青铜峡实测最大洪峰流量为6 230 m<sup>3</sup>/s。

### 2.2 泥沙

泥沙主要来源为兰州以下干流及兰州—青铜峡区间支流。青铜峡水库修建前年平均输沙量达2.469亿t。青铜峡水库自蓄水以后，输沙量大幅减少。根据资料统计，青铜峡站多年平均含沙量、输沙模数和输沙量分别为4.99 kg/m<sup>3</sup>、322 t/km<sup>2</sup>和0.822亿t；石嘴山站输沙模数和输沙量分别为267 t/km<sup>2</sup>和0.825亿t，较青铜峡建库前大为减少。这是因为：1)黄河干流先后修建了刘家峡、盐锅峡和八盘峡水库，因水库拦沙作用，干流来沙显著减少；2)支流清水河流域也相继修建了一些拦沙水库，相当一部分泥沙被拦截，再加上青铜峡水库自身的拦沙作用，使出库泥沙又小于入库沙量。

## 3 桥区河段河床演变

根据桥区河段浅滩分布(图1)，2013年时大桥尚未建设，该滩有两处较大浅滩出露，左侧江心洲较狭长，右侧心滩相对较小；2014年时大桥开始建设，该滩左侧江心洲发育，并向河心和下游发展，右侧心滩萎缩；2015年该滩江心洲整体并靠左岸，尾部冲蚀，左侧边滩向河心发育，心滩消失，左侧深槽向下游右岸发展，右侧边滩继续向河心发育。整体来看，滩险左侧边滩处于持续发育状态。

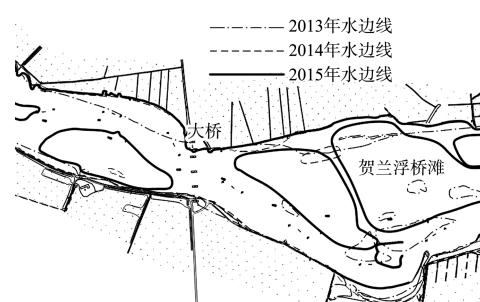


图1 浅滩分布

设计最低通航水位时, 大桥有 3 个涉水桥墩, 受其影响河段水沙条件发生变化, 导致上游河段逐渐弯曲, 左岸岸线逐渐后移成凹岸, 主河槽弯曲, 水流流速降低, 右岸泥沙淤积。大桥上游河段向航道不利方向发展。

2013—2015 年深泓线平面位置摆动情况见图 2。可以看出, 深泓线上游局部位置平面摆动幅度较大, 下游深泓线平面摆动幅度较小。

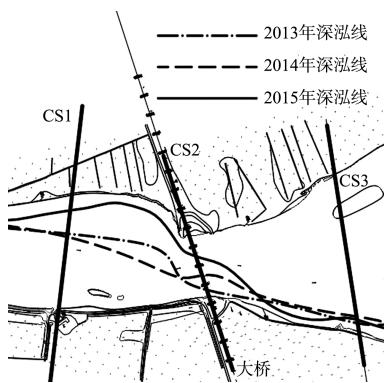


图 2 深泓平面变化

比较 2013 与 2014 年深泓线可知, 大桥上游 1 km 范围内深泓变化相对较小, 局部位置深泓线右移, 在桥位处再次左移然后逐渐过渡至左岸, 但总体来说深泓线位置相对较为稳定, 此时大桥尚未开工建设, 河段水流条件变化较小, 岸线、边滩相对较为稳定, 河道条件较好。

比较 2014 与 2015 年深泓线可知, 大桥上游河段深泓线变化较大, 左岸岸线后退, 桥位处受施工影响, 岸线稳定, 上游左岸呈凹形, 深泓线由河心移至左岸, 最大偏移距离为 200 m, 说明大桥修建时上游河形河势和水沙条件变化较大, 右岸江心洲边滩发育, 主流调整至左岸, 水流与大桥轴线夹角变大。过大桥后, 深泓线逐渐过渡至右岸, 基本与原深泓线一致, 说明下段河形河势、水流条件等变化较小, 下游边滩相对较为稳定, 下游河道条件相对较好。

各断面横向河岸变化对比见图 3。可以看出: 1)由图 3a) 可知, 2013—2014 年左岸侧崩岸特征明显, 最大崩岸宽度约 100 m, 河床深槽也随之向左侧移动, 深槽宽度及深度从总体上看变化不大,

河床形态有向宽浅发展的趋势。2015 与 2014 年地形相比, 河岸基本稳定, 深槽左移, 右岸边滩发育。2)由图 3b) 可知, 2013—2014 年变化表现为河槽窄深, 右岸局部有一定程度的崩岸, 深槽稍微右移, 但变化相对较小河形基本相似。2014—2015 年间河槽冲刷变深, 左右岸局部有轻微崩岸。3)由图 3c) 可知, 岸线位置变化不大, 2013—2014 年左侧边滩局部冲刷。2014—2015 年间左侧边滩局部淤高, 右汊深槽冲深发育。

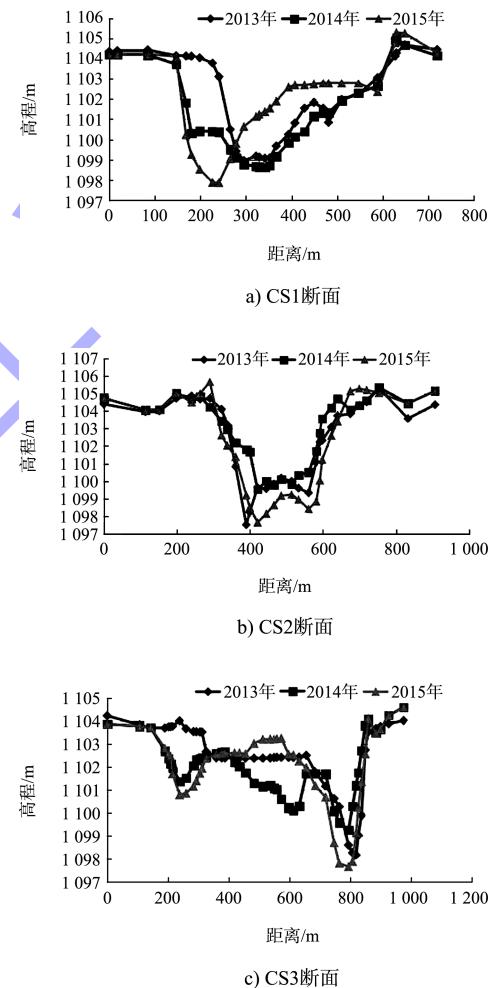


图 3 CS1~CS3 断面横向河岸变化对比

#### 4 建设标准

按照内河 V-(3) 级标准<sup>[1]</sup> 进行建设, 航道尺度为  $1.3 \text{ m} \times 22 \text{ m} \times 270 \text{ m}$  (水深  $\times$  航道宽度  $\times$  弯曲半径)。代表船型为 300 吨级机动驳, 船型尺度  $44.5 \text{ m} \times 8.4 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$  (总长  $\times$  型宽  $\times$  设计吃水)。航道设计最低通航水位采用天然情况下多年历时保证率 95% 的水位。

## 5 航道整治方案

为便于分析工程河段存在的问题,结合河段河床演变、河段实测地形资料,结合大桥桥墩布置,利用二维数值模拟技术<sup>[2]</sup>分析河段的水流条件,进而判断河段的航道通航条件。

### 5.1 整治前工程河段水流条件

#### 5.1.1 二维数值模拟

计算河段总长约 2.1 km,计算进口距桥位约 1.5 km,通航孔为涉水桥墩之间的通航孔,采取分孔通航<sup>[3]</sup>,河段地形如图 1 所示。

设计算区域的上下游边界不变,两侧边界则根据水位情况做调整。计算区域采用三角形网格离散,桥墩边界经概化后加密网格予以描述,桥墩在计算时做不过水处理。

#### 5.1.2 天然情况下水流条件

1)设计流量  $Q=240 \text{ m}^3/\text{s}$  时,工程河段水流平顺,流态良好,最大流速在 2 m/s 左右。大桥下游河道分为左右汊,右汊为主流,流量主要通过右汊,水流流速较大,右汊左、右槽在江心洲尾部合流处,因水流交汇,水流夹角较大,且受狭长江心洲凸嘴挑流影响,该位置处流态较为紊乱,航行条件相对较差。该工况下,大桥位置处河宽约为 250 m,有 3 个桥墩涉水,大桥桥墩轴线与水流流向夹角较大,涉水桥墩的阻水率为 11.7%。

2) $Q=650 \text{ m}^3/\text{s}$ (设计水位+1.0 m)时,上游河道水流流速为 1.33 m/s,桥区上游横向流速较大,为 0.76 m/s,桥梁跨度不满足通航要求;下游左侧狭长江心洲中部部分被淹没过流,流速较小;右汊心滩基本已被淹没。右汊左槽 1.6 m 等深线尚未贯通,最大流速在 1.4 m/s 左右,滩尾江心洲凸嘴挑流作用减弱,洲尾汇流处流态明显改善。该工况下,大桥桥墩轴线与水流流向夹角变小,涉水桥墩的阻水率为 10.5%。

3)整治流量  $Q=780 \text{ m}^3/\text{s}$  时,上游河道水流流速为 1.55 m/s,桥区上游横向流速较大,为 0.89 m/s (>0.8 m/s),根据《内河通航标准》,桥梁需要一孔跨过通航水域,该大桥桥墩布置不满足其要求。下游仅剩左侧江心洲尾部出露水面。河段整体无明显不良流态,右汊 1.6 m 等深线全部贯通,水

深条件良好,最大流速在 1.5 m/s 左右。该工况下,涉水桥墩的阻水率为 7.9%。

4)中洪水流量  $Q=2200 \text{ m}^3/\text{s}$  时,桥区上游横向流速>0.8 m/s,河面逐渐增宽,洲滩相继淹没,航槽流速多在 1.0~2.0 m/s,整体流态良好。水流流向与桥墩轴线夹角进一步变小,阻水率进一步变小为 6.2%。

通过以上分析可知,受河段地形条件影响,工程河段碍航情况主要发生在整治流量  $Q=780 \text{ m}^3/\text{s}$  以下,主要原因为右汊右槽较窄,水流相对集中,水流流速较大,流速最大可达 2.2 m/s,且滩段内 1.6 m 等深线不贯通,河段碍航特点表现为浅和急<sup>[4]</sup>。随着流量的增加碍航情况逐渐减弱,水流条件逐渐变好。同时随着流量的逐步增加,水流流向与桥墩轴线的夹角逐步减小,阻水率也相应地逐渐变小。

#### 5.1.3 航道通航问题

根据工程河段 2015 年测量资料可知,大桥上游主河道弯曲,右岸边滩发育,主流与桥墩轴线夹角约为 60°,夹角大、水流横向流速大,下行船舶有较高的撞击桥墩的风险,不利于船舶安全航行并通过桥区河段。

大桥桥墩涉水,桥区河段水沙条件发生变化,上游水位壅高,流速减小,局部河段泥沙淤积,右岸形成边滩,同时左岸主要为沙质土,稳定性差,随着水流的淘刷,底部冲刷,上部失稳,岸线后移,桥位处两岸受围堰影响,形成矾头,河道更加弯曲。桥轴线处受桥墩束水影响,水流流速增加,泥沙冲刷,河道河床逐渐冲刷变低,桥墩承台外露,若冲刷严重会进一步影响桥墩稳定、大桥安全。

大桥上游主河道弯曲,主流与桥墩轴线夹角大。在桥轴线位置处、流量  $Q=2200 \text{ m}^3/\text{s}$  时,该大桥桥墩投影占用水流过水面积较大,阻水率达 17%以上,汛期过水能力会有一定的影响。

### 5.2 整治后工程河段水流条件

#### 5.2.1 整治原则

1)综合利用,统筹兼顾。综合考虑航道、行洪及工程建设。

2) 调整水流, 固滩稳槽。尽量减小航道轴线方向与水流流向的夹角, 采取工程措施调整水流, 稳定航槽。

### 5.2.2 航道整治方案

为了使船舶能够安全通过桥区河段, 同时增加河段的汛期行洪能力, 减小桥墩位置处的冲刷, 须采取工程措施调整水流流向和流速分布, 尽量减小航道轴线方向与水流流向的夹角等, 满足各通航流量下的船舶航行要求。同时调顺河道、调整水流流向<sup>[5]</sup>后, 水流与桥墩轴线夹角变小, 涉水桥墩在河道横断面上的阻水投影面积减小, 进而汛期桥墩阻水影响减小。

为了统筹考虑桥区河段通航、行洪等要求, 按照上述整治原则, 在桥区河段结合船舶通航和行洪的要求, 布置了航道整治方案(图 4), 即在大桥上游河段修建 2 条护滩带用以恢复原左岸岸线, 新开右侧边滩为主航槽, 调整水流、航线, 减小水流流向与桥轴线法线方向的夹角, 增加航槽过水断面面积。满足船舶上下行安全航行的前提下, 不小于大桥修建前河段原过水断面面积为宜, 便于船舶通过桥区河段。

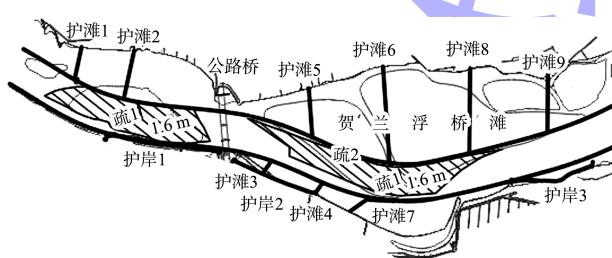


图 4 桥区河段航道整治平面布置

护滩带顶高程以原岸线及边滩滩顶高程控制, 以不高于原岸线及边滩顶高程为宜, 新开航槽根据船舶吃水情况可挖至设计水位下 1.6 m。

为了分析河段的航道整治方案的效果, 在实测河段地形资料的基础上进行了  $Q$  为  $240\sim2\,200\text{ m}^3/\text{s}$  多级流量下的模型计算<sup>[6]</sup>。通过计算可知, 研究河段沿程水位基本随着流量的增大而增加, 各级流量平均比降相差不大。本河段沿程总体水面平缓, 比降较小, 除河道平面突然放宽造成局部比降相对较大外, 各级流量下的全河段右岸平均比

降为  $0.18\%$ , 左岸平均比降为  $0.2\%$ , 左岸平均比降略大于右岸。

### 5.2.3 航道整治下水流条件

航道整治工程主要在枯水期进行, 结合河段的碍航情况主要计算分析  $Q$  为  $240\text{、}780\text{ m}^3/\text{s}$  流量下的水位、流速流场等。在  $Q=2\,200\text{ m}^3/\text{s}$  中洪水流量下, 整治工程已经淹没。

1) 水位、阻水率分析。工程河段沿程水位变化很小,  $Q=240\text{ m}^3/\text{s}$  工况下, 工程河段壅高值相对工程前最大壅高  $0.20\text{ m}$ ;  $Q=780\text{ m}^3/\text{s}$  工况下, 工程河段壅高值相对工程前最大壅高  $0.15\text{ m}$ 。随流量的增大, 大桥河段以上水位壅高值逐渐减小。但壅高值范围有限, 主要集中在布置有整治建筑物及略靠其上游位置处, 一定范围外的影响较小, 随着距离整治建筑物越远, 影响逐渐减小直至消失。

该整治方案下, 因为调整了工程河段的水流方向及条件, 水流流向与大桥桥墩轴线夹角相对较小, 航行条件较好, 阻水率也较小, 对行洪影响不大。 $Q=240\text{ m}^3/\text{s}$  工况下, 大桥上游横向流速约为  $0.30\text{ m/s}$ , 阻水率为  $8.2\%$ ;  $Q=780\text{ m}^3/\text{s}$  工况下, 大桥上游横向流速为  $0.35\text{ m/s}$ , 阻水率为  $5.8\%$ ;  $Q=2\,200\text{ m}^3/\text{s}$  中洪水流量下, 整治工程已被淹没, 大桥上游横向流速为  $0.50\text{ m/s}$ , 阻水率为  $3.6\%$ 。随着流量的增大, 大桥上游横向流速逐步增大, 但均能够满足相关标准要求。阻水率逐步变小, 对行洪的影响逐渐消失。

2) 流速、流场分析。 $Q=240\text{ m}^3/\text{s}$  时, 大桥上游开挖区最大流速在  $1.0\text{ m/s}$ 。该滩险中部(大桥下游位置处)航槽疏浚区水流总体分布均匀, 流态较好,  $8^{\#}$  护滩带处受开挖形状影响产生的斜流消失。疏 2 开挖区最大流速在  $0.8\text{ m/s}$ 。主航槽河段最大流速在  $1.2\text{ m/s}$ , 主要位于疏 2 开挖区中段, 最小流速为  $0.50\text{ m/s}$ 。

随着流量的增加, 水位逐渐升高, 流速逐渐增加。 $Q=780\text{ m}^3/\text{s}$  时, 受水位抬高影响, 断面过水面积增大。大桥上游开挖区最大流速约  $1.3\text{ m/s}$ , 滩中部疏 2 开挖区水流流速不超过  $1.6\text{ m/s}$ , 水流流态较好、航槽水流平顺。整治流量下边滩过流,

航槽流速变化幅度较设计流量下小, 航槽最大流速为 1.70 m/s。

各级流量下, 大桥通航孔附近水流流态较好, 水流流向与通航孔基本平行, 水流流向与桥墩轴线夹角较小, 阻水率相对较小, 对行洪影响不大。

### 5.3 小结

随着流量的增加, 工程河段水位逐步升高, 流速随着流量的增加逐渐增大。随着水位升高, 边滩逐渐淹没, 河段水流条件逐渐变好, 碍航情况逐渐消失, 碍航主要集中在整治流量及其以下。

采取上述整治方案后, 大桥河段主航槽水流流向与大桥桥墩轴线夹角变小, 水流平顺, 流态较好, 碍航情况得到很大改善, 原有碍航情况基本消失, 同时河段阻水率比工程前小, 对水利行洪有较大改善, 也利于船舶航行于桥区河段。

因此, 针对桥区河段可采取固滩、筑坝等工程措施调整水流、稳定航槽、归顺通航孔水流流向, 尽量减小航道轴线方向与水流主流向的夹角, 达到桥区河段水流流向整治的目的。但也要注意, 沙质河床粒径较小, 起动流速较小, 整治措施对桥位附近, 尤其是桥墩位置, 水流流速不应增加过大, 避免引起桥墩冲刷, 不利于大桥稳定。

## 6 结论

1) 平原沙质河床易冲易淤易变, 年际变化较为频繁, 尤其是当有涉河建筑物, 如桥梁等, 受其影响, 年际年内变形更为频繁, 河段滩险情况复杂, 航道整治措施的成功与否直接关系到桥区河段

## · 消 息 ·

### 江西万安枢纽二线船闸通过交工验收

近日, 由水规院勘察设计、四航局承建的江西万安枢纽二线船闸通过交工验收。

二线船闸位于江西省吉安市万安县, 是江西省“十三五”重点交通建设项目, 也是赣江高等级航道建设的重要组成部分。船闸设计最大工作水头 32.5 m, 船闸等级为Ⅲ级, 设计年单向通过能力为 988 万 t。

万安二线船闸闸墙修建高度为江西省之最, 是千里赣江第一闸, 项目建成后, 将有效弥补现有一线船闸通过能力不足的问题, 满足赣江航运和船舶大型化发展的需求, 促进当地经济社会可持续发展。

的水流条件, 进而影响船舶航行安全和行洪安全。

2) 结合河段河床演变规律, 采取工程措施稳定河段有利的河形河势、护滩固洲。

3) 调整并稳定水流, 减小水流流向与桥梁轴线法线方向、航道轴线方向的夹角, 尽量减小涉河建筑物的阻水率利于行洪, 同时可保证船舶安全通过桥区河段。

4) 决策实施过程中, 大桥建设、设计单位应与水利、航道、海事机构等密切配合, 提前沟通、介入, 统一协调, 寻求合适的桥梁布置方案和航道整治方案, 既满足于船舶航行安全要求, 也能满足水利行洪要求, 同时满足桥梁结构安全经济性。

### 参考文献:

- [1] 长江航道局.内河通航标准: GB 50139—2014 [S].北京: 中国计划出版社, 2014.
- [2] 交通运输部天津工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [3] 长江航道规划设计研究院、中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 航道工程设计规范: JTS 181—2016[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
- [4] 长江航道局. 航道工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [5] 王建军, 张明进. 长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程口岸直河段选槽数学模型[J]. 水运工程, 2013(12): 1-7.
- [6] 李焱, 汤小霞. 长洲水利枢纽四线船闸引航道通航水流条件数值模拟[J]. 水道港口, 2014, 35(1): 66-72.

(本文编辑 王璁)