



跨山区航道桥梁改建工程水沙条件影响研究*

王 畅¹, 赵 鹏², 李 焱²

(1. 丽水市直属公路港航管理中心, 浙江 丽水 323000; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 山区航道通航尺度小、比降大、流速快、枯丰变化明显、水文情况复杂。丽水莲都碧湖大桥改建工程位于瓯江干流中游, 其所跨河段现状航道和规划航道线路不同, 桥梁建设需同时满足现状航道通航和预留规划航道发展空间两项要求, 因此对桥墩的布置提出了更高的要求。通过对桥梁通航净空尺度的计算分析表明, 规划航道布置在主桥主跨内满足通航要求, 而现状航道布置在主桥左侧桥跨内时, 左侧主墩位于现状航道边缘, 将对现状船舶通航安全构成影响。采用平面二维水流泥沙数学模型, 研究桥梁改建对现状航道和规划航道水流条件和泥沙冲淤的影响, 并提出将现状航道向左侧疏浚拓宽 4 m, 以满足通航要求的改善措施, 可为跨山区航道的桥梁改建工程解决方案提供借鉴。

关键词: 山区航道; 桥梁; 通航净空尺寸; 碍航紊流

中图分类号: U65; O383.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0113-07

Influence of water and sediment conditions on reconstruction project of cross mountain canal bridges

WANG Chang¹, ZHAO Peng², LI Yan²

(1. Lishui Highway and Navigation Management Center, Lishui 323000, China;

2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

Abstract: The navigation scale of mountain canal is small, with large gradient, fast flow velocity, obvious changes in dry and wet seasons, and complex hydrological conditions. The reconstruction project of Lishui Liandu Bihu Bridge is located in the middle reaches of the Oujiang River mainstream. The current and planned canal routes of the river section it crosses are different, and the bridge construction needs to meet both the requirements of current canal navigation and reserved planned canal development space. Therefore, higher requirements are put forward for the layout of bridge piers. Through calculation and analysis of the navigation clearance scale of the bridge, it is shown that the planned canal layout meets the navigation requirements within the main span of the main bridge, while the current canal layout is within the left span of the main bridge, and the left main pier is located at the edge of the current canal, which will have an impact on the navigation safety of the current ship. Using a planar two-dimensional flow and sediment mathematical model, the impact of bridge reconstruction on the current and planned canal flow conditions and sediment erosion and deposition is studied. Improvement measures are proposed to widen the current canal to the left by 4 meters to meet navigation requirements, which can provide reference for bridge reconstruction projects across mountainous areas.

Keywords: mountain canal; bridge; navigation clearance dimension; navigable turbulence

浙江丽水碧湖大桥改扩建工程位于瓯江干流中游河段(大港头—白岩大桥段), 现状航道等级

为内河Ⅶ级单线航道, 早期规划为天然Ⅳ级航道。根据近期的《浙江省内河航道与港口布局规划

收稿日期: 2023-05-06

*基金项目: 中央级公益性科研院所科研创新基金项目(TKS20230515); 天津市交通运输科技发展计划项目(2021-12)

作者简介: 王畅(1982—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程技术管理工作。

(2021—2035)》^[1]和浙江省地方标准 DB33/T 2037—2017《内河限制性准Ⅲ级和准Ⅳ级航道通航标准》^[2],该河段规划航道等级为内河限制性准Ⅲ-b级航道。由于当前航道提升工程尚未实施,新建桥梁需同时满足航道现状通航条件和远景航道规划两项要求,难度较大。

目前的相关研究通常在建成桥梁或在桥梁选型的基础上开展分析,徐建昌^[3]利用软件建立模型对航道通航条件进行分析,得出航道内横向流速过大,进而提出工程改造相关建议;赵红红等^[4]通过建立桥梁选址段二维水沙模型,分析水动力变化对河床冲淤演变的影响;李靓亮^[5]根据实测数据说明桥梁基础施工对航道演变有较大影响,提出建设前期分析优化桥跨和桥墩布置方案。张国瑞等^[6]指出桥梁桥墩布置和桥梁跨度的选择会对主航槽演变、通航条件造成影响,利用数值模拟技术可为合理的桥梁方案选择提供技术支持。

碧湖大桥所跨现状航道等级不高,根据新建桥梁建设方案,原Ⅶ级航道位于改建桥梁第1跨,分析发现第1跨桥墩可能对现状航道造成影响,因此需开展水流泥沙数学模型试验研究,通过分析水流流场、泥沙冲淤情况,提出跨山区航道桥梁改建工程涉通航条件影响评价的相关建议;而航道远景规划等级较高,现状航道第1跨无法满足通航要求,需设计改建桥梁主跨(第2跨)满足。

1 自然条件

1.1 河道概况

瓯江流域雨水充沛,但年季、年内空间分配极不平衡,年总降水量70%集中在4—9月,丰枯季节降水悬殊。桥址河段(大港头—白岩大桥段)总长度为24.2 km,河道弯曲,河面宽度为100~300 m,比降0.77‰,上游有松荫溪汇入,两岸植被覆盖率较高,表土流失少,河床主要由卵石组成,滩潭相间,滩长潭深,枯水期浅滩水深不足0.2 m,深潭水深则约6.0 m,除个别滩险外,河床较为稳定;桥位上游河道存在1个较大河心岛(洲),将河道一分为二,右侧河道为主河道,水

面较为开阔;桥位下游约1.3 km河段较为顺直,然后接110°左右的弯道(图1)。桥址处为浅滩,中枯水时,水流主要从左侧主河槽通过;洪水时,水流漫滩,浅滩中部河槽过流明显,桥址处滩槽情况见图2。



图1 工程位置及河势情况



图2 桥址处滩槽情况

1.2 水文情况

1.2.1 水位

根据防洪评价报告,工程河道属于山溪河流,水利计算范围内河道坡降较大,洪峰流量相应较大,水力计算采用山区性河道恒定非均匀流法,模型上边界为碧湖大桥断面上游2.3 km,下游下边界为碧湖大桥断面下游2 km,计算河段长4.3 km,计算得到碧湖大桥桥位处各频率洪水位见表1。

表1 碧湖大桥桥位处各频率最高洪水位

频率	100 a一遇	50 a一遇	20 a一遇	10 a一遇	5 a一遇
水位/m	67.61	66.50	65.54	65.01	64.22

1.2.2 径流与洪水

据均溪水文站径流资料分析,多年平均年径流深1 017.7 mm,最丰年1 652.8 mm(1954年),

最枯年 484.0 mm(1971 年), 径流多年平均年内分配呈单峰形, 主要由梅雨和春雨形成。自 3—7 月径流量占年总量的 78.5%。枯水期通常在 10—2 月之间, 占全年的 15.1%。

流域内洪涝灾害频繁, 5—6 月梅雨频率大, 7—9 月以台风暴雨为主。其洪水具有峰高量大、水量集中、涨落较快等特点。洪水过程的主要时段一般集中在 3 d 左右。

1.2.3 泥沙

本流域河流泥沙主要来源于流域降水对地表的侵蚀和冲刷。均溪、靖居口、上显滩、黄渡等水文站多年平均悬移质输沙率、含沙量情况见表 2, 紧水—开潭河段多年平均输沙量见表 3。桥址附近河床沉积物上部为厚 2~4 m 粉质黏土及粉土, 局部夹粉、细砂透镜体, 下部为砂卵砾。

表 2 多年平均悬移质输沙率、含沙量统计					
站名	集水面积/km ²	多年平均输沙率/(kg·s ⁻¹)	多年平均含沙量/(kg·m ⁻³)	多年平均输沙量/万 t	输沙模数/(t·km ⁻²)
均溪	3 407	15.90	0.147	50.14	147
靖居口	1 857	7.21	0.132	22.74	123
上显滩	806	5.17	0.223	16.30	202
黄渡	1 270	7.96	0.230	25.10	198

表 3 紧水—开潭段多年平均输沙量			
集水面积/km ²	多年平均输沙率/(kg·s ⁻¹)	多年平均含沙量/(kg·m ⁻³)	多年平均输沙量/万 t
5 783	49.40	0.164	97.20

2 桥梁工程概况

碧湖大桥现状桥梁宽度为 12 m, 其中两侧人行道各 1.5 m, 车行道 9.0 m。桥梁全长 421 m, 跨径为 3×25 m+7×35 m+4×25 m, 桥梁上部结构中跨为 35 m 预制 T 梁, 边跨为 25 m 预制 T 梁, 下部结构为桩柱式桥墩接盖梁。

碧湖大桥现状桥宽 12 m 已经不能满足两岸交通增长需求。桥梁总体方案比选中, 提出扩建拼宽与拆除改建 2 个方案。其中扩建拼宽方案经论证无法满足远期准Ⅲ-b 级航道双向通航净空尺寸等问题, 因此推荐拆除改建方案。

改建方案桥梁宽度 36 m, 设计时速为 50 km/h。

主桥结构采用 3 跨双塔矮塔斜拉桥, 跨径为 82 m+140 m+82 m, 引桥结构为 2×35 m 预应力钢筋混凝土简支小箱梁。主桥桥墩为保证与索塔的景观协调采用 Y 形墩, 单墩墩顶尺寸: 8.0 m(顺桥向)×4.5 m(横桥向), 墩底尺寸: 4.5 m(顺桥向)×4.5 m(横桥向), 承台为矩形截面, 纵、横桥向尺寸为 10.0 m×28.5 m, 承台厚 4.5 m, 桩基础采用 10 根 φ2.5 m 钻孔灌注桩。引桥桥墩设计为桩柱式桥墩接盖梁形式, 盖梁断面尺寸为 1.7 m×2.2 m, 立柱直径为 φ1.4 m, 桩基直径为 φ1.5 m, 单个桥墩设置 6 根桩基。

桥梁墩台布置与现状航道位置关系见图 3, 其中现状航道在主桥左侧桥跨内, 但主桥西侧主墩在航道边缘现状航道, 将对现状船舶通航安全造成影响; 规划航道将布置在主桥主跨(中间跨)内, 跨径为 140 m。



图 3 碧湖大桥与现状航道位置关系

3 规划准Ⅲ-b 级航道通航设计

3.1 规划航道通航要求

该河段规划航道等级为内河限制性准Ⅲ-b 级航道, 通航 1 000 吨级货船或装载 2 层的集装箱船, 其航道及水上过河建筑物通航净空尺度的规范要求见表 4, 其中双向通航宽度 40 m, 通航水深 3.2 m, 通航净高 5.5 m, 双向通航净宽 60 m。表 4 还列出了原规划天然Ⅳ级航道和现状Ⅶ级单线航道的通航尺度要求, 其中现状Ⅶ级单线航道宽度 14 m, 水深 0.8 m, 通航净高 4.5 m, 单向通航净宽 20 m。

表 4 航道及建筑物相关尺度规范要求

航道等级	航道 宽度/m	弯曲 半径/m	水深/ m	通航 净高/m	通航 净宽/m
规划内河限制性准Ⅲ-b级航道	40(双向)	220	3.2	5.5	60(双向)
原规划天然Ⅳ级航道	30(双向)	180	1.0~1.2	6	40(双向)
现状Ⅶ级单线航道	14(单线)	130	0.8	4.5	20(单向)

对于航道水深,河床为卵石、岩石质时,水深值应增加 0.1~0.2 m。根据工程区域地质勘察报告,工程河段河床底质以卵石为主,通航水深为 3.4 m。另外,由于在早期的航道规划中,本河段规划为天然Ⅳ级航道,桥梁通航净高不小于 6.0 m,工程附近新建桥梁通航净高均不小于 6.0 m,因此本次桥梁跨规划航道相关尺度要求取大值,见表 5。

表 5 规划航道通航尺度要求

航道等级	航道宽度/ m	航道弯曲半径/ m	航道通航水深/ m	水上过河建筑物通航净高/m	水上过河建筑物通航净宽/m
内河限制性准Ⅲ-b级航道	40	220	3.4	6.0	60

3.2 设计规划航道通航尺度

由于改建桥梁方案主桥两侧桥跨梁底高程最低点为 68.72 m, 最高点 69.43 m, 通航净空高度

无法满足规划航道通航尺度要求,因此选择主跨(中间跨)为规划航道通航孔。根据 DB33/T 2037—2017《内河限制性准Ⅲ级和准Ⅳ级航道通航标准》中 7.1.2 条规定:平原河网地区或者洪水历时很短的限制性准Ⅲ级和准Ⅳ级航道的设计最高通航水位洪水重现期通过论证可取 3~5 a 一遇。根据 GB 50139—2014《内河通航标准》中 6.2.1 条规定Ⅵ级航道的设计最高通航水位洪水重现期采用 5 a 一遇,因此,本航道不论是规划为限制性准Ⅲ级还是原规划为Ⅵ级航道,设计最高通航水位采用 5 a 一遇洪水水位为 64.22 m。现状河底高程为 57.4~58.9 m,根据相关水利规划河底高程疏浚至 56.3 m。依据表 5,航道船舶通航水深为 3.4 m,因此桥梁设计最低通航水位为 59.7 m。

改建碧湖大桥主跨梁底高程为 68.5~71.9 m, 设计最高通航水位 64.22 m, 整跨净空高度 4.28~7.68 m, 方案净高 ≥ 6.0 m 的宽度为 100.4 m。

桥梁轴线法线与航道中心线夹角约 9° ，桥宽 36.0 m，新桥通航净空宽度取 93.5 m。

因此，主跨通航净空尺度满足规划准Ⅲ-b通航要求，见图4。

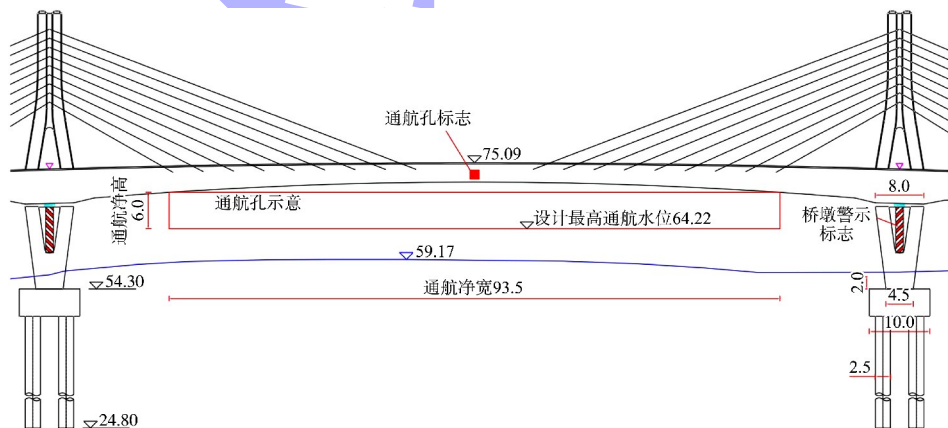


图 4 改建桥梁方案主桥主跨通航净空尺度 (单位: m)

4 现状Ⅶ级航道通航设计

4.1 水流泥沙数学模型

4.1.1 基本方程

针对所在河道形状及水流特征, 选用平面二维水流泥沙数学模型, 使用 MIKE21 软件包

中 HDFM 模块和非黏性泥沙 ST 模块, 其中水流控制方程组为沿垂向积分平均的浅水流动质量和动量连续方程^[7], 泥沙连续方程采用恩格隆-汉森公式, 河床变形方程采用泥沙通量散度计算式^[8]。

4.1.2 计算域及网格划分

水流泥沙数学模型计算域包括从大港头—白岩大桥段, 总长约 24 km, 见图 5。河道地形主要使用莲都区瓯江(大港头—白岩大桥)2021 年 9 月测图数据, 河岸边线结合丽水市瓯江干流划界测图和卫星遥感图片确定。为了提高计算效率, 同时又保证工程海域有足够的分辨率, 采用局部加密的非结构三角形网格对计算域进行划分。桥墩附近空间步长较小, 约为 0.7~1.6 m; 其它区域空间步长较大, 约为 20~50 m。计算域共计生成计算节点 14 267 个, 网格 27 607 个, 工程河道局部网格划分见图 6。

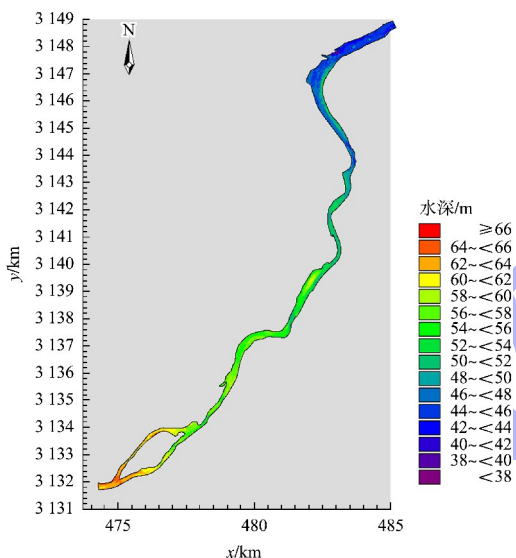


图 5 模型计算范围

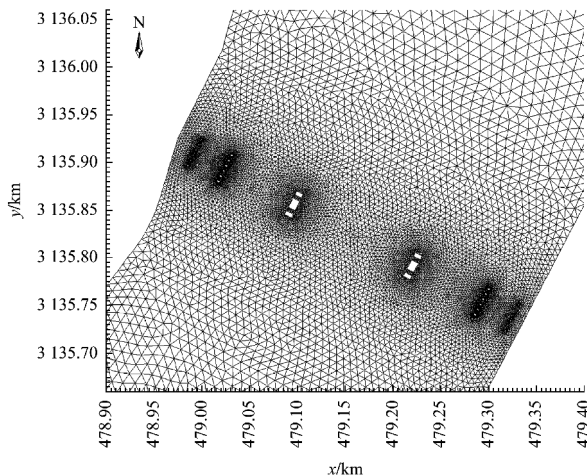


图 6 桥墩附近水域网格布置

4.1.3 模型率定及验证

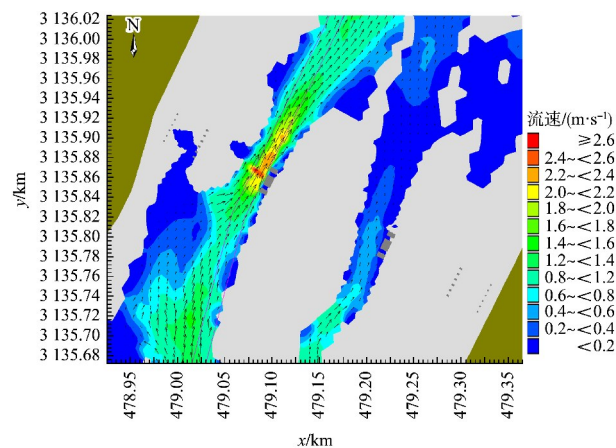
使用恒定流量下的实测水位线作为验证资料, 研究河段共设有 61 把临时水尺和 2 个断面的流速实测值。在上游给定流量开边界, 流量取值为 $75 \text{ m}^3/\text{s}$, 下游给定水位开边界, 取值 47.45 m。计算时间步长取 0.01~36.00 s。使用干湿判别法对水陆交界进行处理。需要率定的参数主要为 Smagorinsky 公式涡黏系数 C_s 和反映河床糙率的谢才系数。实测水位和计算水位的验证结果差值在 $\pm 0.1 \text{ m}$ 以内, 流速和流量分别与实测值基本一致, 满足《水运工程模拟试验技术规范》规定的精度要求。

4.2 水流泥沙计算结果及分析

4.2.1 工程实施后流场分布

方案实施后, 不同流量工况下大桥附近流场见图 7。受地形和岸线的影响, 水流基本顺岸或沿等深线方向流动, 在桥墩附近, 桥墩迎水侧水流受桥墩顶托水流流向桥墩两侧略有偏转, 在绕过桥墩两侧时发生边界层分离, 并于桥墩后方形成尾涡。

不同工况中, 当 $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$ 时桥墩附近主槽区域流速最大为 2.61 m/s; 当 $Q=163 \text{ m}^3/\text{s}$ 时(设计水位 58 m)桥墩附近主槽区域流速最大为 2.95 m/s; 当 $Q=250 \text{ m}^3/\text{s}$ 时桥墩附近主槽区域流速最大为 2.74 m/s; 当 $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$ 时(设计水位 58 m)桥墩附近主槽区域流速最大为 2.46 m/s。



a) $Q=60 \text{ m}^3/\text{s}$

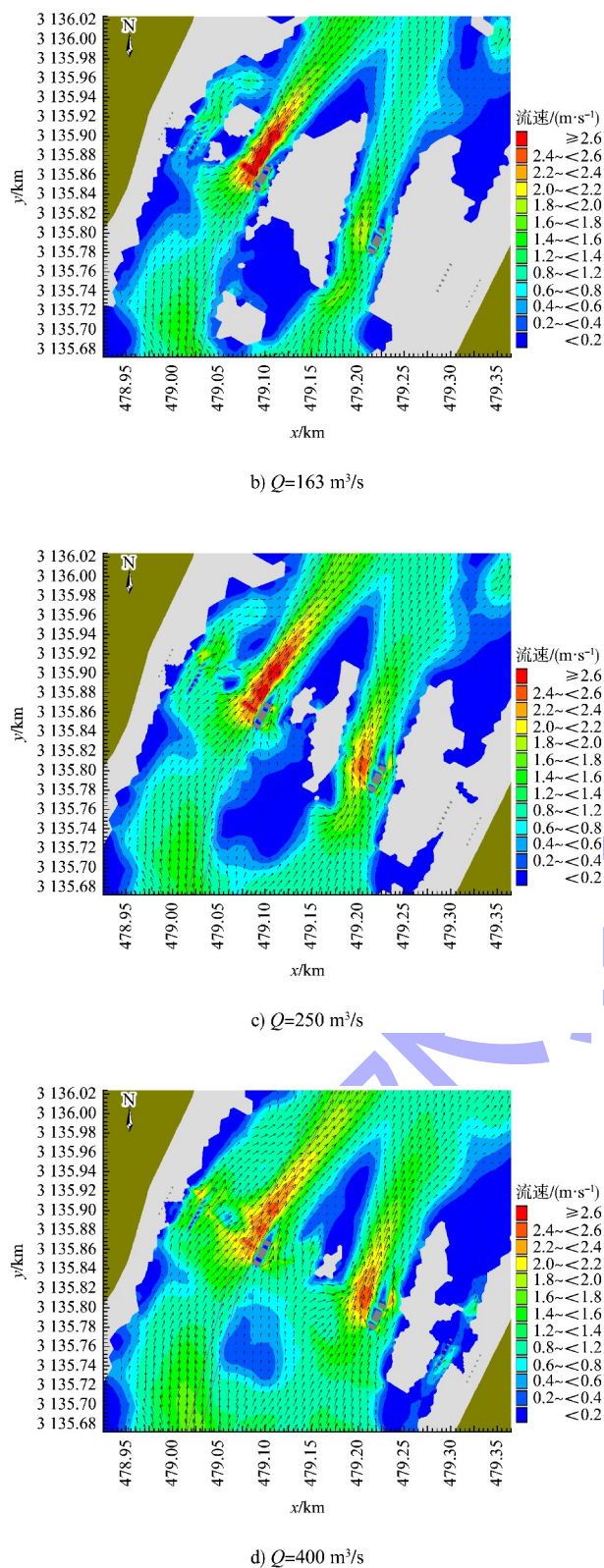
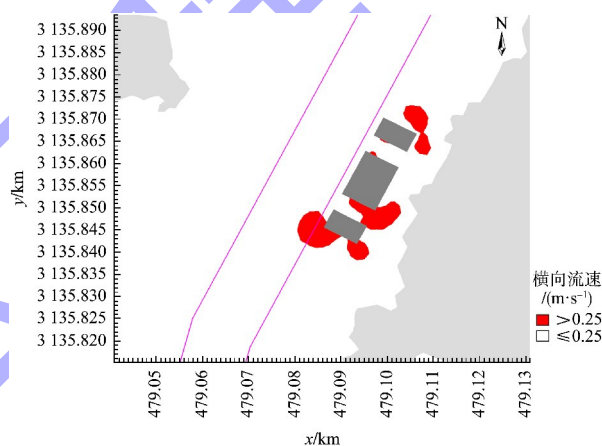


图7 方案实施后桥址水域流场

现状航道位于桥梁主桥左侧桥跨内。根据 DG/TJ 08-2116—2012《内河航道工程设计规范》，对于水中设墩的Ⅶ级航道，桥墩周围横向流速超过 0.25 m/s 时，将对船舶航行安全产生不利影响，可认为横向流速超过 0.25 m/s 的水域属于碍航紊流影响范围。

新碧湖大桥现状航道通航区域位于主桥西侧中墩与边墩之间。在 $Q=163 \text{ m}^3/\text{s}$ (设计水位 58 m) 时，桥墩附近主槽区域流速最大，此时横向流速大小分布见图8，主桥西侧主墩紊流宽度为 5.1 m ，在现状航道内紊流宽度为 3.7 m 。因此现状Ⅶ航道处于碍航紊流影响范围内。

图8 设计水位时主桥西侧中墩横向流速大于 0.25 m/s 分布

4.2.2 泥沙冲淤

由河道概况可知，工程流域降水集中在3—9月，其中3—4月为春雨期，5—6月为梅雨期。泥沙模型计算中，上游边界参考桥址上游 50 m 水文站2014年12月—2015年5月水位资料；含沙量参考均溪和靖居口水文站多年平均含沙量资料，取值 0.14 kg/m^3 ；模拟时间为 1 a 。计算得到碧湖大桥建成后其周围河床的年均冲淤变化见图9，不同桥墩周围河床以条带状分布的冲刷为主，其中主桥西侧中墩附近河床最大冲刷深度为 2.7 m ，不会引起现状航道的明显淤积。

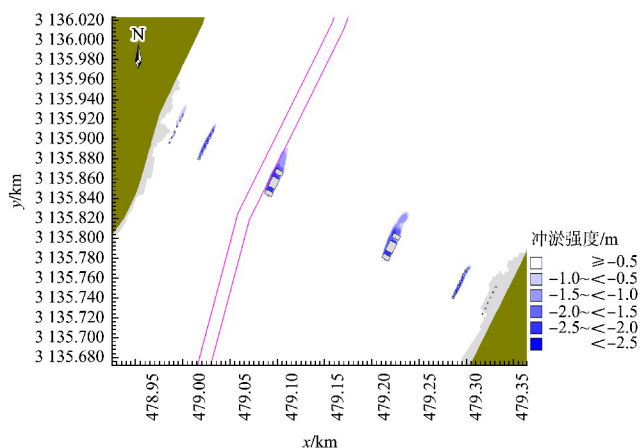


图9 新建大桥后周围河床的年均冲淤变化

4.3 现状Ⅶ级航道调整

由于现状航道所在的河汊被新碧湖大桥西侧主墩占用了一部分水域,造成现状航道约有3.7 m宽水域的横向流速超出DG/TJ 08-2116—2012《内河航道工程设计规范》水中设墩Ⅶ级航道的要求。建议将河汊西侧疏浚后,把现状航道向西侧即边墩方向至少调整4 m,见图10,以保证现状航道正常通航。

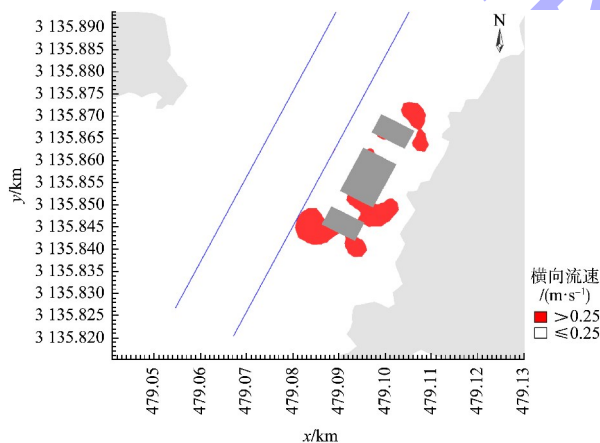


图10 现状航道调整

考虑上游来水量较小,为保证现状航道水深,采取西挖东填方式,按原航道设计尺度设计航道过水断面,以保证现状航道正常通航,调整后航道宽度仍为14.0 m,航道水深0.8 m。现状通航孔调整疏浚工程应与新碧湖大桥西侧桥墩建设同步实施。

5 结语

1) 现状Ⅶ级航道等级低,通航船只为渔船,

由于现状航道与改建桥梁在交通网络中的相比重要性较低,在桥型方案设计中,现状航道需要有一定的“让位”,本案设计桥梁桥墩造成部分原航道处于碍航紊流影响范围,最终通过调整现状航道位置解决。

2) 山区性航道通常丰枯水量变化明显,本航道比降大、流速快,需要充分分析新建桥梁的紊流、泥沙冲淤等碍航特性,经分析本案不会引起现状航道的明显淤积,但仍需做好洪水后的航道排查养护工作。

3) 根据水运事业的发展需求,内河航道与港口布局规划及当地航道规划发展,改建桥梁应为规划航道预留发展空间。本案采用现状航道通航孔于新碧湖大桥左侧跨,规划通航孔为中间跨,同时满足了改建桥梁现状航道通航及规划航道发展空间。

参考文献:

- [1] 浙江数智交院科技股份有限公司. 浙江省内河航道与港口布局规划(2021—2035) [R]. 杭州: 浙江数智交院科技股份有限公司, 2022.
- [2] 浙江省港航管理局, 浙江省交通规划设计研究院. 内河限制性准Ⅲ级和准Ⅳ级航道通航标准: DB33/T 2037—2017[S]. 杭州: 浙江省质量技术监督局, 2017.
- [3] 徐建昌. 污水处理厂排水口改造对施桥船闸下游引航道通航条件的影响[J]. 水运工程, 2019(10): 148-153.
- [4] 赵红红, 陈振华, 赵忠伟. 跨河桥梁建设对山区航道河床演变的影响分析[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(6): 119-120.
- [5] 李靓亮. 桥梁桩基础施工对航道演变影响分析[J]. 水运工程, 2020(4): 162-168.
- [6] 张国瑞, 陈婷婷. 数值模拟技术在桥梁桥墩布置及跨度选择中的应用[J]. 水运工程, 2022(8): 100-106.
- [7] DHI. MIKE 21 & 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation [R]. Copenhagen: DHI Water & Environment, 2009.
- [8] DHI. MIKE 21 & 3 Flow Model FM, Sand Transport Module, Scientific Documentation [R]. Copenhagen: DHI Water & Environment, 2009.

(本文编辑 赵娟)