



五台梁清礁工程整治效果分析

胡鹏飞¹, 李梁喜²

(1. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147; 2. 云南省港航投资建设有限责任公司, 云南 昆明 650051)

摘要: 在三峡水库消落期和汛期河道恢复至天然状态时, 五台梁礁石突出碍航, 制约航道发展, 亟需实施清礁整治。考虑近期航道建设和远期扩能提升需求, 拟定了一次性整体切除清礁方案, 并采用数值模拟方法对方案整治效果进行预测分析。结果显示: 1) 工程实施后, 清礁区水深增大, 过流能力增加。2) 局部水流流态明显改善, 水流趋于平顺, 航道侧横流减至 0.25 m/s 以下。3) 4.5 m 水深航道宽度在 300 m 以上, 达到了预期整治目标, 证明方案合理、整治效果符合预期。

关键词: 孤礁; 清礁; 数学模型; 效果分析

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0129-06

Effect analysis of Wutailiang reef removal project

HU Peng-fei¹, LI Liang-xi²

(1. Changjiang Chongqing Harbor Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China;

2. Yunnan Port and Channel Investment Construction Co., Ltd., Kunming 650051, China)

Abstract: When the river channel recovers to its natural state during the falling stage and flood period of the Three Gorges Reservoir, the reef hinders navigation in Wutailiang and restricts the development of the waterway. Therefore, reef removal is urgently needed. According to requirements for short-term waterway construction and long-term capacity expansion, a one-time reef removal scheme was drawn up. Numerical simulation methods were used to predict and analyze the implementation effect. The results are as follows: 1) After the implementation of the project, the water depth and the flow capacity in the reef removal area increase. 2) The flow regime of the local water area is significantly improved and the flow tends to be smooth. The transverse flow of the channel is reduced to less than 0.25 m/s. 3) The water channel with a depth of 4.5 m is above 300 m wide, which has achieved the expected regulation goal. It proves that the scheme is reasonable and meets expectations.

Keywords: isolated reef; reef removal; mathematical model; effect analysis

我国山区河流航道中, 江中孤礁碍航问题较为普遍。如长江上游大、小炉子梁位于航槽正中间及规划航宽 150 m 的船舶航行航线上, 成为影响船舶安全航行的江心暗礁, 过往船舶均不敢靠近, 需对其避让^[1]; 长江上游砖灶子孤礁将中、枯水河槽分为左右两槽, 致使航宽不足且两槽流态恶劣, 左槽河槽弯曲难以通航, 右槽通航但存在航道窄、坡降陡、横流强、泡漩汹等碍航问题^[2]; 嘉陵江石门大桥^[3]、澜沧江那官、小白塔、

大漩水、一溜子^[4]等滩段内均存在江中孤礁碍航。该类滩险碍航特征主要表现为礁石处水浅、航宽不足, 并伴有横流、泡漩水等不良流态, 船舶航经此处极易发生触礁、搁浅及翻沉等水上交通事故, 严重威胁船舶航行安全, 同时航道维护和海事监管难度较大。许多学者对碍航孤礁整治问题进行了研究, 许光祥等运用河工模型试验开展了断头孤礁险滩整治方法的试验研究, 提出了炸礁结合潜鱼嘴连接坝的整治措施; 李文杰等^[5]通过

数学模型和概化试验等手段对孤礁浅水效应进行了研究,合理确定了炸礁水深;张秀芳等^[6]通过试验和理论分析,找出了深沱孤礁地形泡漩水形成的原因和条件,分析了影响泡水强度的主要因素,并提出计算泡水高度的经验公式。

五台梁为一纵卧江心的碍航孤礁,本文根据工程河段航道、航运现状及规划,分析确定了清礁设计参数和方案,并通过建立工程河段二维水流数学模型,模拟计算了清礁前后水位、比降、流速、流场分布等水文要素变化情况,进而对整治方案效果及合理性进行预测和分析。

1 工程概况

拟建太洪长江大桥是重庆南川至两江新区高速公路跨越长江的控制性节点工程,推荐桥位位于五台梁处。大桥主桥采用主跨 808 m 悬索桥,跨径布置为 $10\text{ m} + 4 \times 40\text{ m} + 808\text{ m} + 2 \times 120\text{ m} + 7 \times 30\text{ m} + 12\text{ m} = 1440\text{ m}$ (由右岸至左岸),设置通航孔 1 个、跨度 808 m。

大桥所在五台梁河段位于长江上游重庆至涪陵段,属三峡水库变动回水区。近年来,随着重庆长江上游航运中心的建设,工程河段水运量日益增加,船舶大型化趋势明显,5 000 吨级干散货船、325 TEU 以上集装箱船、800 车位商品汽车滚装船已发展成为主力船型。为满足航运发展需求,改善现有航道尺度不足、消落期和汛期恢复至天然状态时部分河段仍显现出明显碍航特性等不利局面;为确保航道安全畅通,工程所在朝天门至涪陵河段已批准实施航道整治工程,按航道等级为 I 级、航道尺度为 $4.5\text{ m} \times 150\text{ m} \times 1 000\text{ m}$ (水深×航宽×弯曲半径)、通航保证率 98% 的标准进行建设,实现 5 000 吨级内河船可全年直达重庆。根据航道条件核查,五台梁处不满足航道建设标准,拟列为整治对象。同时,由于五台梁礁石位于拟建大桥正下方,桥位与滩险间距不满足 GB 50139—2014《内河通航标准》中关于水上过河建筑物选址的要求,且根据《公路安全保护条例》中型以上公路桥梁周围 200 m 范围内禁止爆破作业等危及公路桥梁安全的活动,大桥建成后将形

成大桥保护区,保护区内再实施清礁工程将受到严格限制、实施难度加大。因此,根据内河和长江干线通航标准的相关规定,交通主管部门要求桥梁建设单位在建桥前按规划航道标准先行清除该礁石,以改善本河段通航水流条件和通航环境、保障大桥施工期和建成运行后船舶通航安全。

五台梁河段河道顺直、河面宽阔,左岸上游约 510 m 有支流太洪江汇入,其下岸线规则顺直,五台梁礁石纵卧江中偏左,其左侧深槽为主航槽,右岸肖家店一侧为砂卵石边滩、宽阔低平。工程河段河势见图 1。五台梁为一道纵卧江中偏左的长条形孤礁,纵向长约 175 m,横向最宽处约 40 m,其顶部最高点高程为 164.55 m,低水位时出露部分高达 10 m。三峡水库 175 m 试验性蓄水后,蓄水期五台梁河段受水库蓄水影响,水位抬升,水深富余,流速平缓,航道条件较好,五台梁淹没于水下,对船舶通航影响较小;消落期水位开始下降,礁石逐渐显露,尤其在消落末期或汛初,水位降至最低,礁石完全出露阻挑水流;汛期,三峡水库按 145 m 汛限水位控制运行,此时河道基本不受坝前水位影响,表现为天然河道特征,礁石随上游来流变化时隐时现,受其阻流影响,附近水流条件较差、流态紊乱,对顺航道行驶的下行船舶安全航行构成一定威胁。

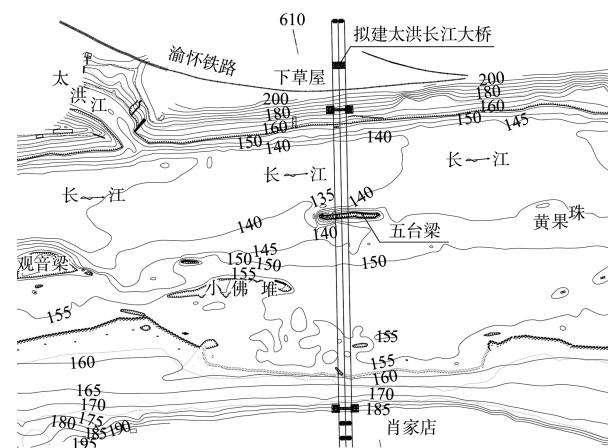


图 1 五台梁河段河势(单位: m)

2 碍航特性

1)从航道尺度来看。五台梁河段现状航道技术等级为 II 级,最小航道维护尺度为 $3.5\text{ m} \times 100\text{ m} \times 800\text{ m}$,五台梁左侧为主航道水域,床面高程在

137 m 以上, 槽内水深富余。受三峡蓄水影响, 蓄水期水流平缓, 航道条件较好, 主航道最小航宽约 200 m; 消落期河道水位下降, 航宽逐渐减小; 汛期河道已基本不受蓄水影响、恢复至天然河流状态, 此时主航道最小航宽仅约 149 m, 位于五台梁附近。然而, 长江上游朝天门至涪陵河段在“十四五”期间计划实施航道整治工程, 航道建设标准为 4.5 m×150 m×1 000 m, 同时, 考虑远期航道进一步扩能提升需求, 按《内河通航标准》中 I-(2) 航道标准考虑, 选用 9×3 000 吨级 3 排 3 列船队、5 000 吨级货船作为代表船队、船型, 采用规定的航道宽度计算方法得到单线航宽为 104 m、双线航宽为 208 m。可见, 工程河段虽满足现状航道维护尺度要求, 但受制于江中五台梁礁石, 航道拓宽受限, 现状航宽已不能满足航道建设和发展的需求。

2) 从通航水流条件来看。五台梁河段属于三峡水库变动回水区, 水库状态与天然河流状态交替出现, 当水库消落末期和汛期河道恢复到天然状态时, 五台梁受上游来流量增减变化, 或潜藏水下或露出水面, 此时河道水流流速较大, 水流被纵立江中的礁石所阻, 迫使改向分由其两侧绕过, 礁石上方水域产生较大横流。数模计算显示, 礁石上方航道侧最大横向流速达 0.28~0.53 m/s, 可见, 礁石头部斜向挑流作用较明显。礁石尾后两股水流交汇处局部形成回流、夹堰、漩水等, 水流流态紊乱。

3) 从船舶通航来看。由于五台梁纵卧于江心偏左侧, 紧邻主航道, 在消落末期和汛期, 礁石的阻流作用影响局部通航水流条件, 本河段下行船舶靠五台梁一侧循主流下行, 至礁石水域横流会推压船舶产生回转力矩, 使船舶偏离正常航向, 若对水势流态估计不足、操作不当, 易发生偏向触礁等事故, 对船舶航行安全构成一定威胁。此外, 在拟建大桥施工阶段, 该水域船舶交通流增加, 施工船、运梁(料)船和交通船将在工程水域内往来频繁穿梭, 而江中五台梁礁石的突出阻碍势必增加船舶操作难度、增大施工水域船舶安全通航风险、恶化通航环境。

3 清礁方案

为充分发挥长江黄金水道优势, 适应三峡库区航运快速发展的需求, 五台梁清礁工程采用航道等级为 I 级, 5 000 吨级货船作为代表船舶, 满足朝天门至涪陵段航道整治 4.5 m×150 m×1 000 m 的航道尺度建设要求, 并考虑远期航道进一步扩能提升、航道尺度增加、大桥建成后形成保护区难以再实施整治的影响, 拟对五台梁礁石实施一次性整体切除的治理方案。

根据三峡库区 175 m 蓄水期设计最低通航水位计算成果^[7], 经复核分析五台梁处设计最低通航水位取 153.59 m。鉴于五台梁为江中孤礁, 且礁石水域为船舶通航水域, 计算清礁水深时, 富余水深应主要考虑船舶浅水航行的下沉量、礁石引起的水位跌落值、船舶触底安全富余量以及石质河床富余水深增加值共 4 项因素。文献[1]分析船舶航行下沉量 4 个半理论和经验公式, 得出: 考虑到孤礁顶部水深较浅易导致船舶触底、危害较大, 建议计算 5 000 吨级船舶下沉量时按照孤礁上水深 5.5 m 考虑, 取下沉量的平均值 0.85 m; 并通过概化水槽试验分析, 礁石顶部水深对于水面跌落的影响较大, 水深较浅时跌落值较大, 随着顶部水深的增加水位跌落值逐渐减小, 当水深超过 5 m 后, 水位跌落值小于 0.1 m, 礁石引起的水位跌落值取 0.1 m。根据长江干线船舶航行富余水深管理规定, 李渡长江大桥以上船舶触底安全富余水深不小于 0.3 m, 取 0.3 m。石质河床富余水深增加值按规范取 0.2 m。综上, 设计采用 5 000 吨级货船, 吃水按 4.3 m 计, 清礁水深计算值为 5.75 m, 同时为适应船舶大型化发展需要、保障船舶航行安全, 参照三峡水库变动回水区类似江中孤礁整治经验, 综合考虑五台梁清礁水深取 6.0 m, 相应的清礁设计底高程为 147.59 m。

由于五台梁长度不大, 设计底坡采用平坡, 拟将整座礁石清除至设计底高, 无边坡。根据 JTS 204—2008《水运工程爆破技术规范》, 礁石水下钻孔爆破超深可取 0.4 m, 经计算清礁工程量为 4.35 万 m³。

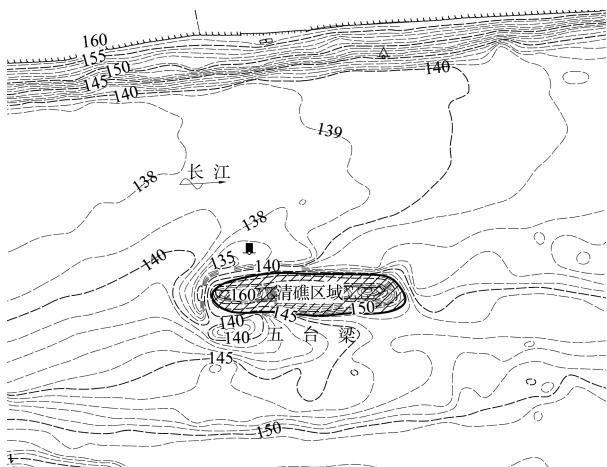


图 2 五台梁清礁工程平面布置 (单位: m)

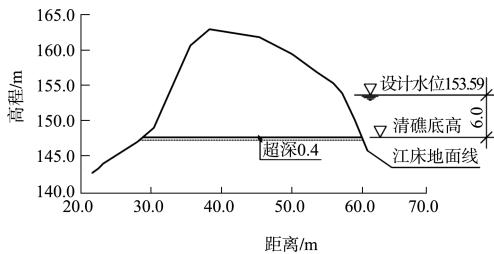


图 3 五台梁清礁工程典型断面

4 工程实施后效果分析

为预测五台梁礁石清除方案实施后的整治效果,建立平面二维水流数学模型^[8-9]计算分析礁石清除方案实施前后通航水流条件变化,并对清礁方案合理性作出分析和评价。

三峡工程蓄水期,受水库回水影响,工程河段河宽、水深、流速平缓,通航水流条件良好;而在消落期和汛期,河道逐渐恢复为天然状态,本河段开始显现碍航特征。因此,重点分析碍航时段内枯、中、洪3种水位条件下河道水流条件变化情况,计算工况见表1,其中枯水选用最低通航水位时的来流工况。

表 1 五台梁清礁工程数学模型计算工况

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	工程处水位/m	坝前水位/m	备注
4 500	153.59	145.00	枯水
9 820	156.41	145.44	中水
45 000	170.53	145.00	洪水

4.1 水位和比降变化

受清礁影响,礁石区水位增减变化明显,枯中水期礁石区已完全淹于水下,洪水工况水位较

工程前总体有所增加,平均增幅约7.5 cm,而礁石区上游水位呈下降趋势,各工况下最大降幅约8.5 cm,尾部下游局部水位略有增加,各工况下最大增幅约3.7 cm。表2为计算工况下礁石区左侧航槽内水位变化情况,清礁方案实施后,礁石区上游附近航槽内水位均有不同程度下降,水位降幅在0.7~3.7 cm;而礁石区域及下游附近航槽内水位有所增加,水位增幅在0.0~2.3 cm;距离工程区域越近水位变幅越明显,且以中水流量时航槽内水位变幅最大,最大水位变幅为-3.7~1.1 cm。图4为各工况临礁石区左侧下行航线上沿程水面比降变化情况,清礁实施后附近航槽内水面比降总体变化不大,以减缓趋势为主,平均减幅为0.08‰。具体表现为清礁区及上游约250 m航槽内水面比降有不同程度下降,最大降幅为0.23‰;而清礁区下游约200 m航槽内水面比降略有增加,最大增幅为0.07‰。总的来看,工程实施后受清礁影响礁石区局部水位变化较为明显,而左侧航槽内水位变化相对较小,呈上减下增态势;水位落差减小,水面比降总体呈减缓趋势。

表 2 工程实施后航槽内水位变化

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	水位增幅/cm	水位降幅/cm
4 500	0.0~0.8	0.9~2.0
9 820	0.0~1.1	1.9~3.7
45 000	0.0~2.3	0.7~2.3

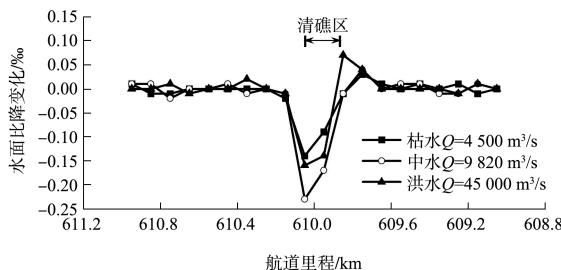
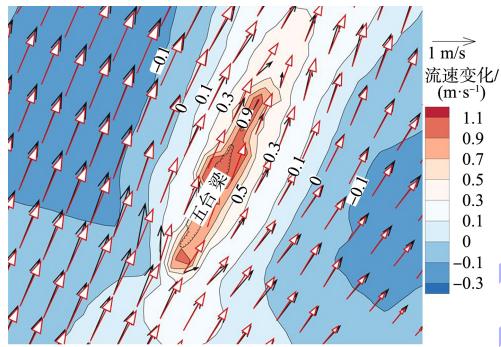
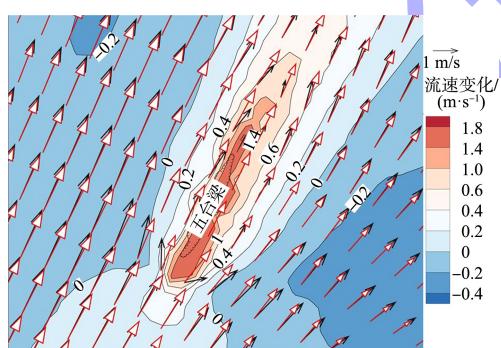
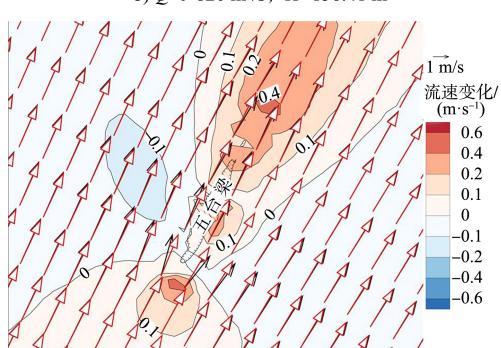


图 4 工程实施后下行航线沿程水面比降变化分布

4.2 流速和流态变化

从图5清礁工程实施前后局部流速变化分布可以看出,受五台梁礁石清除影响,礁石区附近河道流速有一定变化,表现为礁石上下游沿河道纵向的带状区域内流速呈不同程度增加,而礁石左侧主槽和右侧边滩水域流速基本呈微降态势,河道流速增减变化以距礁石20~60 m为界,距礁

石区越近流速变幅越明显。从五台梁处河道断面流速分布的变化(图6)也可以看出, 清礁实施前后河道断面流速分布总体较稳定, 礁石附近流速普遍有所增加, 左右河槽内断面流速略有减小, 最大降幅出现在中水工况, 且随着来流量增加, 断面流速变幅逐渐减小。表3为各工况河道分区流速变化值, 清礁区流速变幅为 $-0.10\sim1.84\text{ m/s}$, 左侧主槽流速变幅为 $-0.20\sim0.20\text{ m/s}$, 右侧边滩流速变幅为 $-0.26\sim0.20\text{ m/s}$ 。综上, 清礁工程实施后, 各工况下清礁区全面过流, 局部水深和流速有所增大, 过流能力增强, 而左右两侧主槽和边滩水域流速呈减缓态势, 流速总体变幅不大。

a) $Q=4500\text{ m}^3/\text{s}$, $H=153.59\text{ m}$ b) $Q=9820\text{ m}^3/\text{s}$, $H=156.41\text{ m}$ c) $Q=45000\text{ m}^3/\text{s}$, $H=170.53\text{ m}$

注: 普通箭头为清礁前流场, 空心箭头为清礁后流场。

图5 工程实施前后流速变化和局部流场比较

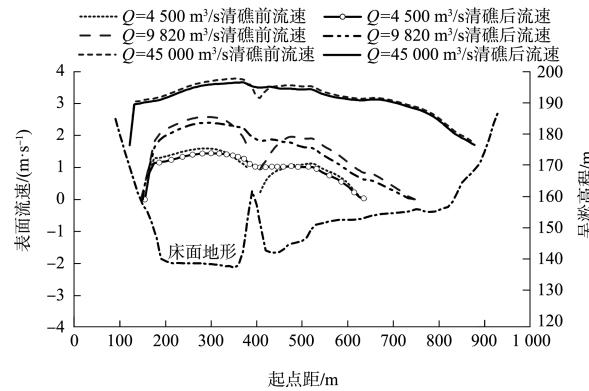


图6 工程实施前后断面流速分布

表3 工程实施后流速变化

流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	流速变幅/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		
	清礁区	主槽	边滩
4 500	0.13~1.13	-0.16~0.20	-0.14~0.20
9 820	0.25~1.84	-0.20~0.20	-0.26~0.20
45 000	-0.10~0.59	-0.12~0.20	-0.09~0.20

从清礁方案实施前后流场分布和流迹线比较来看(图5、7), 方案实施前礁石区域绕流明显, 礁石头部存在挤向两侧较大横流, 局部水流流态不好; 清礁方案实施后, 礁石区域水深和流速增加, 水流流线趋于平顺, 流态明显改善。

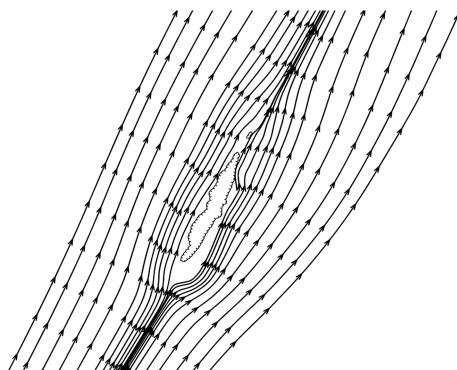
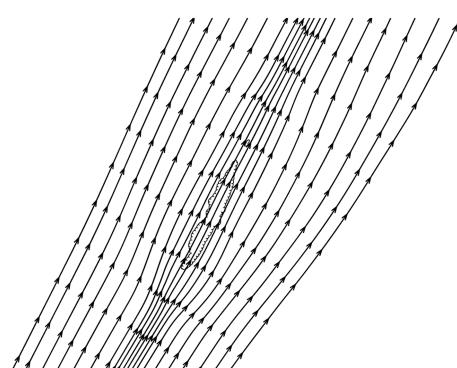
a) 清礁前, $Q=9820\text{ m}^3/\text{s}$ b) 清礁后, $Q=9820\text{ m}^3/\text{s}$

图7 工程实施前后局部流迹线比较

5 整治方案合理性预测分析

在航道尺度方面,清礁工程实施后五台梁处水深增加,满足4.5 m水深的主槽宽度由现状不足200 m拓宽至340~350 m,局部段4.5 m水深宽度基本在300 m以上,航道尺度达到且超过了近期朝涪段航道整治的目标要求,并能满足远期三峡库区航道进一步扩能提升的需求。在通航水流条件方面,工程实施后,清礁区附近航槽内水位落差减小,水面比降有所减缓,对船舶航行有利;各工况下礁石区淹没于水下全面过流,可满足船舶航行要求,主槽内流速减幅不大,流速分布形态保持稳定;流向上,礁石区局部绕流消失,水流流迹趋于平顺规则,礁石头部航道内横流明显减小,统计显示各工况航道侧横流均减至0.25 m/s以下,有效改善了五台梁附近水流流态。在船舶通航方面,工程实施后,各水位期五台梁水域水深和航宽均明显增加,水流变得平顺,原礁石区周围的斜流、回流等不良流态消失,从而使工程河段有效航宽展宽、航路选择余地增大、通航条件得以改善、船舶行驶更加安全。综上,清礁方案整治效果较好,碍航问题得到有效解决,方案是合理的。

6 结语

1)五台梁纵卧江心偏左约束航道,现状航道尺度已不能满足航道建设发展需求;在三峡水库消落期和汛期河道恢复至天然状态时,礁石出露或潜于水下,附近水流条件较差,影响船舶航行安全;且拟建太洪长江大桥桥位恰位于礁石处,建桥后实施航道提升将受到严格限制,故亟需开展五台梁礁石清除工程。

2)根据航道规划和航运发展需求,拟定了对五台梁实施整体切除的治理方案,并建立二维数学模型对整治效果进行了预测分析。结果表明:

清礁实施后,礁石区水深、流速增大,过流能力增加,附近横流减小,航道侧横流减至0.25 m/s以下,水流趋向平顺,流态明显改善;工程段有效航道尺度提高,满足4.5 m水深航道宽度基本在300 m以上,礁石附近航槽内水面比降有所减缓,平均减幅为0.08‰,流速分布形态稳定,流速变幅不大,在0.2 m/s以内。

3)总的来看,按拟定的清礁方案实施,不仅有效解决了现状礁石突出碍航问题,改善通航水流条件和通航环境,并能适应未来航运和航道发展需求,可取得较好整治效果。

参考文献:

- [1] 陈建.长江三峡库区炉子梁孤礁炸礁水深的确定及整治效果分析[J].水运工程,2017(1):125-130.
- [2] 许光祥,刘辛渝,刘天云.断头孤礁险滩整治方法研究[J].水运工程,2015(6):147-151.
- [3] 重庆市交通规划勘察设计院.嘉陵江航道整治三期工程井口至河口段施工图设计说明书[R].重庆:重庆市交通规划勘察设计院,2011.
- [4] 长江重庆航运工程勘察设计院.澜沧江244界碑至临沧港四级航道建设工程初步设计说明书[R].重庆:长江重庆航运工程勘察设计院,2016.
- [5] 李文杰,王志平,付旭辉,等.碍航孤礁的浅水效应研究[J].人民珠江,2016,37(11):41-45.
- [6] 张秀芳,彭凯,尹崇清.深沱孤礁泡漩水形成特性试验研究[J].水利水运工程学报,2011(2):26-31.
- [7] 长江重庆航运工程勘察设计院,重庆交通大学.三峡库区(175 m运用初期)设计最低通航水位计算与分析[R].重庆:长江重庆航运工程勘察设计院,2011.
- [8] 张华庆,张明进,康苏海.河流水流泥沙运动数值模拟技术[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [9] 张帅帅,刘勇,王涛,等.三峡水库外梁河段航道整治数学模型研究[J].水运工程,2014(7):93-98.