



三峡水库外梁河段航道整治数学模型研究*

张帅帅, 刘勇, 王涛, 解中柱

(长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

摘要: 为整治库尾河段内危害大型船队安全航行的礁石碍航河段, 以外梁为例, 分析河段碍航特性, 并研究河段整治方案的数学模型, 对比不同方案实施后的整治效果, 推荐最优方案, 以期为该河段整治方案的确定提供支持。

关键词: 三峡水库; 外梁; 航道整治; 数学模型

中图分类号: U 617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)07-0093-06

Study on channel regulation for Wailiang reach of the Three Gorges Reservoir based on mathematical model

ZHANG Shuai-shuai, LIU Yong, WANG Tao, XIE Zhong-zhu

(Changjiang Chongqing Harbour and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China)

Abstract: In order to solve the problem of navigation-obstruction of large ships sailing in the reservoir's tail reach, we analyze the navigation characteristics in Wailiang reach, and study the regulation scheme of Wailiang reach with the mathematical model by taking Wailiang reach for example. Comparing the regulation effects of different schemes, we recommend the optimal scheme to provide a support for the regulation scheme of the reach.

Key words: the Three Gorges Reservoir; Wailiang; channel regulation; mathematical model

在三峡工程按 175 m 蓄水位方案运行后, 万吨级船队将到达重庆九龙坡港区, 按照规划要求三峡至重庆河段的航道尺度标准应达到 $3.5 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 1\,000 \text{ m}$ 。但是, 三峡水库 175 m 试验性蓄水以后, 通过多次现场踏勘及分析研究近年来库区实测水位、流速和地形资料, 得出如下结论: 该河段航道尺度标准要达到 $3.5 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 1\,000 \text{ m}$ 目标, 在涪陵至重庆朝天门之间有多处碍航礁石需要炸除或者炸深。为实现长江干线航道规划目标, 提高三峡水库的航运效益, 本文拟对重庆主城区外梁河段进行整治方案的数学模型进行研究, 以期为该河段整治方案的确定提供支持^[1-2]。

1 滩险概况

外梁位于重庆主城区长江、嘉陵江汇合口下游约 1.5 km 处, 是由长江左岸斜向下游伸入江中的高大石梁, 梁长约 700 m, 最宽处 130 m, 顶高程 168 ~ 172 m, 与对岸弹子石、银鞘峡等石嘴相对峙。外梁将长江主槽与梁内沱区 (即梁沱) 分开, 左侧梁沱宽度平均约 200 m, 天然情况下梁沱为重庆港区的良好锚地。外梁根部有一缺口 (罐口), 水位 160 m 以上过流, 过去曾对罐口进行封堵, 结果梁沱发生严重淤积, 后又将其开通, 梁沱一直保持 10 m 以上水深。外梁河段河势见图 1。

收稿日期: 2013-11-30

*基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目 (2012BAB05B00)

作者简介: 张帅帅 (1987—), 男, 助理工程师, 研究方向为航道整治及数值模拟。

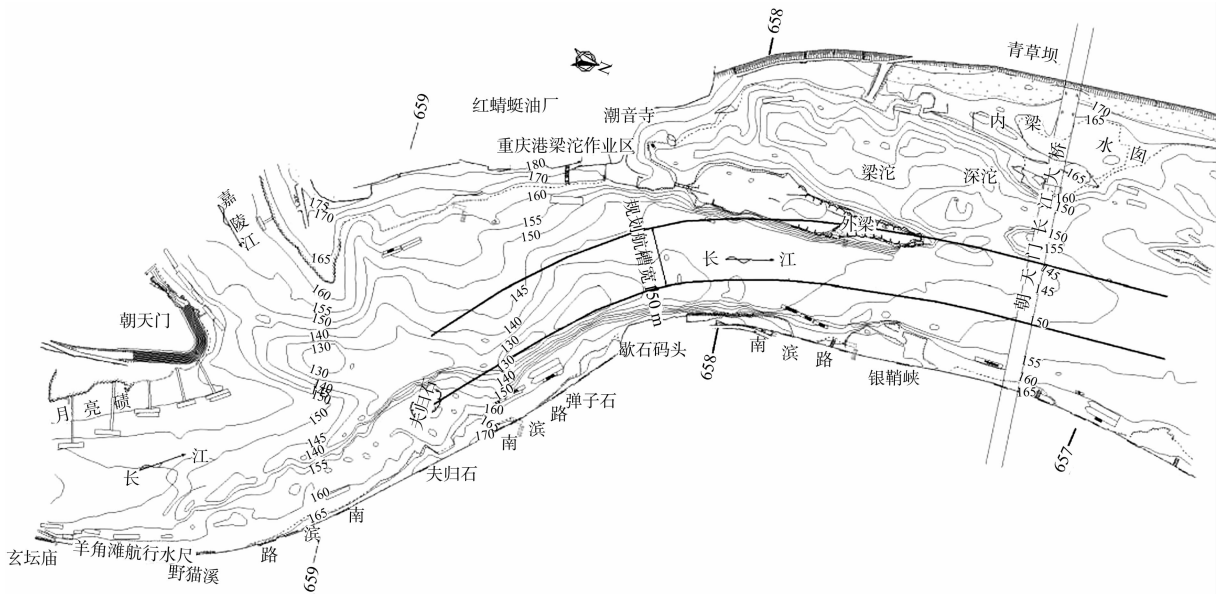


图1 外梁河段河势

175 m 蓄水后，枯水期河段内水位最大抬升约 15 m，流速降低，航道条件较好；在水库消落期和汛期，当外梁露出水面时，主流仍然直冲外梁腰部，并被其挑向右岸；当外梁淹没不能过船时产生滑梁水，并伴随有泡水等不良流态，不能满足万吨级船队安全航行的需要。梁沱内部，由于外梁的阻水，成为缓流区，流速大部分在 1 m/s 以下，有关模型试验表明，水库运行一定时期后，梁沱将被淤废，从而失去深水锚地的作用。

2 碍航特性分析

从本河段河势图可见，外梁所在河段右岸有弹子石码头位于弯道凸岸，左岸则是外梁，二者共同作用缩窄了外梁河段河槽，在中枯水期外梁不能过流时河槽最窄处仅有 210 m 宽。

在枯、中水期航槽内水流平缓、无不良流态。但在中洪水期，随水位上涨，因外梁高大限制了河道有效过水面积的扩大，航槽内侧形成急流，当外梁淹没以后，此时流量已经较大，形成大范围强劲的滑梁水，水势内拖力强（即向岸边推力强）；而同时，右岸弹子石码头因伸入河槽挑流严重，水势向外挤压，形成大范围的漩涡、跌水等不良流态，也缩窄了航槽的有效宽度，致使船舶经过外

梁河段时航线只能靠右岸弹子石码头一侧航行。

因此，目前在外梁及弹子石码头的共同作用下，该河段河槽狭窄，引起的滑梁水、跌水、漩涡、急流等不良流态导致有效航宽减小、船舶上行困难。外梁河段存在的问题有两个：一是航道宽度不足，二是不良流态碍航。

3 二维水流数学模型

3.1 二维水流数学模型

采用沿水深平均的封闭浅水方程组描述二维水流运动：

1) 水流连续方程。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0 \tag{1}$$

2) X 方向动量方程。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a}{\partial x} \right) - fv - \frac{\varepsilon_{xx} \partial^2 u}{\rho \partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy} \partial^2 u}{\rho \partial y^2} + \frac{u \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} = 0 \tag{2}$$

3) Y 方向动量方程。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a}{\partial y} \right) - uv - \frac{\varepsilon_{xy} \partial^2 v}{\rho \partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy} \partial^2 v}{\rho \partial y^2} + \frac{v \sqrt{u^2 + v^2} n^2 g}{h^{4/3}} = 0 \tag{3}$$

式中: t 为时间; u, v 分别为沿 X, Y 方向的流速; h 为水深; η 为床面高程; g 是重力加速度。

$\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$ 是紊动黏性系数, 取为 $\alpha u_* h$, u_* 为摩阻流速, $\alpha=3 \sim 5$; n 为糙率系数。

浅水方程的离散包括时间离散和空间离散, 时间的离散采用差分法; 空间的离散采用有限单元法: 运用伽辽金加权余量法把浅水方程离散成非线性代数方程, 然后采用 Newton-Raphson 方法求解。

3.2 二维数学模型的建立与验证

外梁河段处于嘉陵江与长江汇合口附近, 因此二维数学模型需要模拟两江交汇的情况, 其中长江模拟范围上起猪儿碛灶门子, 下至寸滩水文站, 航道里程 653 ~ 661 km, 长约 8 km; 嘉陵江上起曾家岩, 下至朝天门, 长约 3.5 km。

建模地形为 2012 年实测 1:2 000 地形图, 工程河段地形用 1:500 地形图加密。网格由无结构三角形网格单元构成。在该河段内共计布置 81 063 个网格节点, 网格间距约为 50 ~ 0 m。其中对外梁礁石周围采区域进行网格加密, 网格间距约为 3 m^[3-6]。

用工程河段实测水文资料对数学模型进行验证, 验证资料为 2012 年 5 月 10 日实测的 $Q = 4\ 870\ \text{m}^3/\text{s}$ 瞬时水面线及流速、流向, 模型水位和流速验证断面布置见图 2; 经验证水位计算值与实测值误差在 $\pm 10\ \text{cm}$ 。断面流向基本一致, 各测点流速的计算值与实测值之间的差值大多在 $\pm 0.1\ \text{m/s}$ 内, 极个别误差较大的也不超过 $\pm 0.20\ \text{m/s}$, 偏差均在 $\pm 10\%$ 以内。模型水位和流速验证结果见图 3, 4。

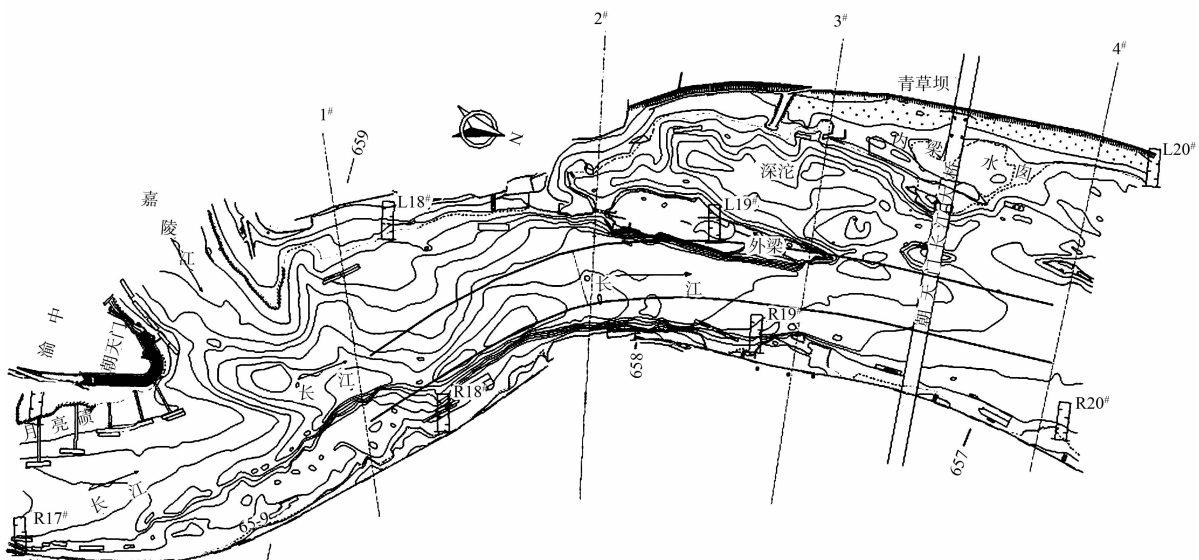


图 2 水位和流速验证位置

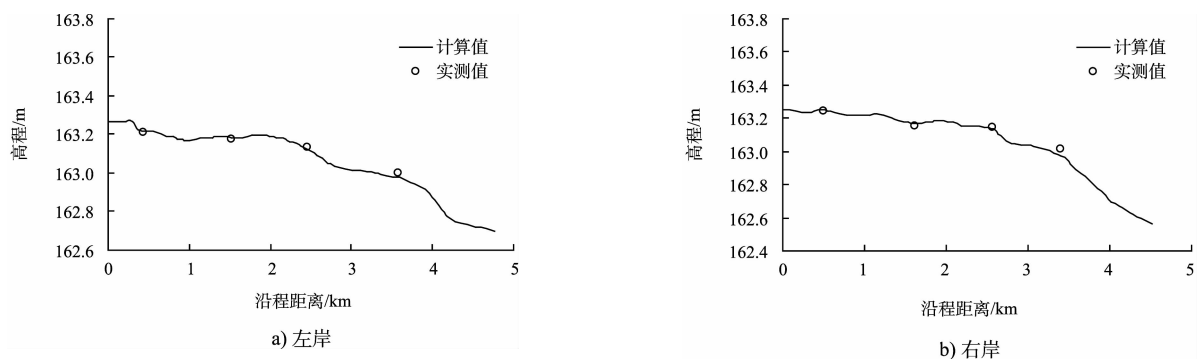


图 3 模型水位验证

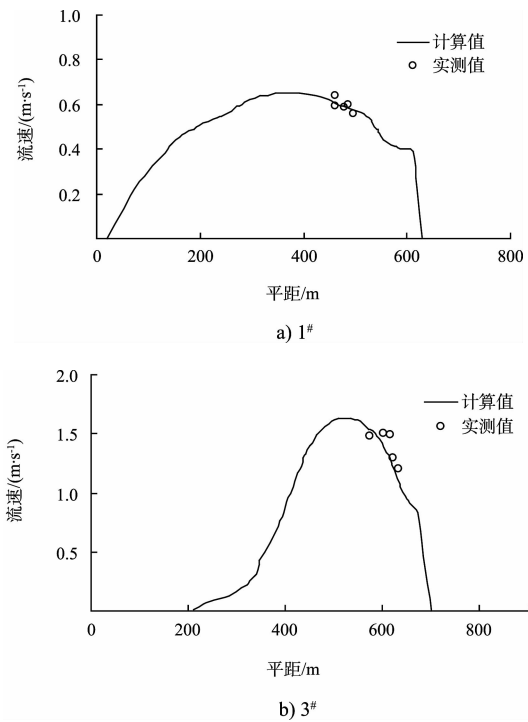


图4 模型流速验证(部分结果)

4 航道整治工程计算及效果分析

4.1 计算条件

计算条件见表1。

表1 外梁河段二维数学模型计算条件

| 水位/m | 流量/(m ³ ·s ⁻¹) | 说明 |
|------------|---------------------------------------|----------|
| 160.34(外梁) | 2 900 | 最低通航水位 |
| 174.12(寸滩) | 27 200 | 梁顶水深3 m |
| 169.59(寸滩) | 20 200 | 外梁下半部分过流 |
| 166.06(寸滩) | 13 100 | 外梁基本上不过流 |

4.2 整治方案

外梁河段滩情复杂,碍航主要是因为中枯水期航道有效尺度不够,同时中、洪水期航槽流急并伴有滑梁水危害船舶安全航行,因此应采取措施,拓宽右槽,增加航宽,加大中、洪水期过水面积(特别是中水期),降低主槽流速,同时尽量降低滑梁水危害。从该角度考虑提出采用原物理模型推荐的整治方案1。由于方案1对外梁航道内滑梁水等不良流态问题无法彻底解决,且炸礁基线同航线走势不一致,因而提出工程量更大的方案2作为比较方案,希望通过整治彻底解决航道内的不良流态。2个方案的炸礁基线布置见图5。

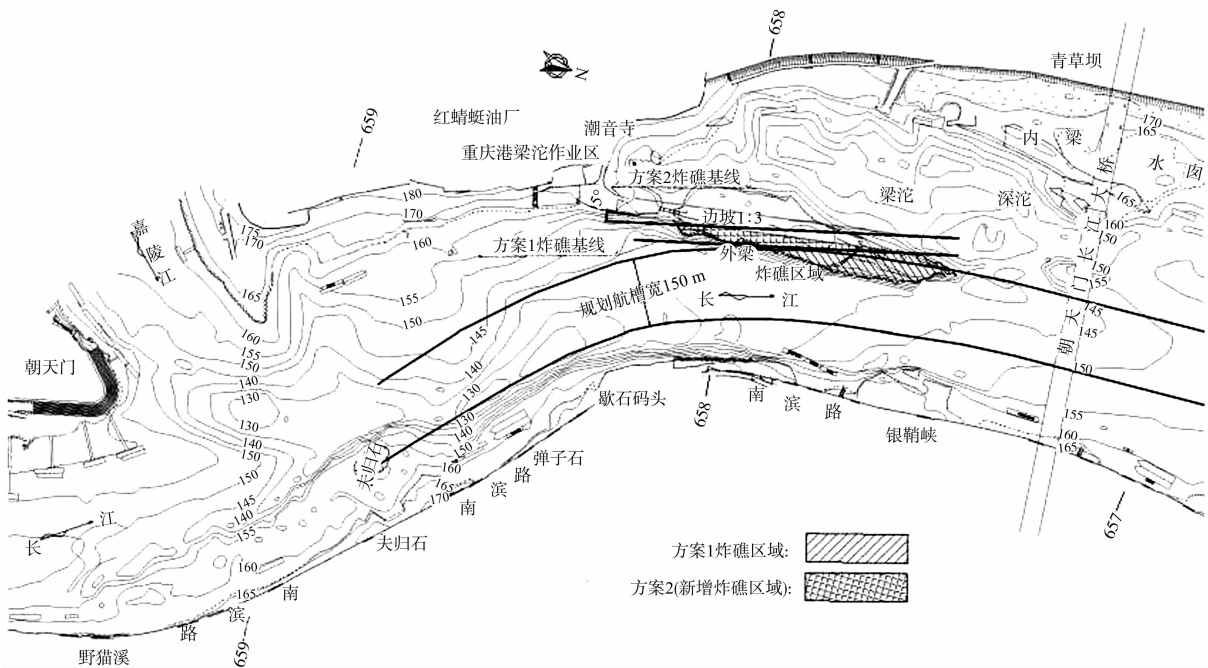


图5 外梁炸礁方案1和方案2基线布置对比

4.2.1 整治方案1

方案1为物理模型多方案优化后的研究结果,即炸礁基线为规划150 m航槽左边线,其右侧航

槽按设计最低通航水位(160.34 m)以下4.0 m航深炸除,即炸礁底部高程156.34 m;炸礁基线左侧按1:3放坡,以减弱滑梁水强度。总计炸礁量

约为 204 700 m³。礁石处理区位于后方右岸梁沱至桥区 800 m 深沱,厚度约 2 m,与河床面平顺连接,抛石顶部高程控制在设计最低通航水位 15 m 以下。

4.2.2 整治方案 2

考虑方案 1 由于炸礁后在外梁头部留下一个突嘴,影响水流流态,并且炸礁基线与航道走势、主流走势夹角偏大。因此,在方案 1 的基础上扩大炸礁范围,将起点上延至外梁头部,为了使炸礁后的河心一侧基线与上游河岸平顺衔接,且与主流和航道的走势一致,将炸礁基线头部一侧向外偏转 5°。基线内侧仍然按照水下 4 m 炸礁,并布置 1:3 的炸礁边坡。

4.3 整治效果分析

表 2 统计了 2 个炸礁方案实施后航槽内距离规划航道边界左右各 20 m 处沿程水位、流速以及比降的变化值。

表 2 外梁炸礁方案实施后炸礁侧航槽水位变化

| 位置 | 流量/ (m ³ ·s ⁻¹) | 水位变幅/m | |
|---------------------------|---|----------------|----------------|
| | | 方案 1 | 方案 2 |
| 航槽左侧 (距航道左 边界 20 m) | 2 900 | 0.103 ~ -0.036 | 0.127 ~ -0.042 |
| | 13 100 | -0.132 ~ 0.024 | -0.060 ~ 0.040 |
| | 20 200 | -0.213 ~ 0.013 | -0.195 ~ 0.032 |
| | 27 200 | -0.176 ~ 0.060 | -0.168 ~ 0.059 |
| 航槽右侧 (距航道右 边界 20 m) | 2 900 | 0.062 ~ -0.013 | 0.060 ~ -0.006 |
| | 13 100 | -0.035 ~ 0.026 | -0.047 ~ 0.045 |
| | 20 200 | -0.053 ~ 0.008 | -0.077 ~ 0.024 |
| | 27 200 | -0.052 ~ 0.001 | -0.073 ~ 0.013 |

表 3 炸礁方案实施后外梁航槽内流速变化

| 位置 | 流量/(m ³ ·s ⁻¹) | 流速/(m·s ⁻¹) | | |
|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| | | 方案前范围 | 方案 1 变幅 | 方案 2 变幅 |
| 航槽左侧 (距航道左边界 20 m) | 2 900 | 0.308 ~ 0.770 | -0.080 ~ 0.429 | -0.059 ~ 0.429 |
| | 13 100 | 0.781 ~ 2.023 | -0.013 ~ 0.667 | -0.026 ~ 0.979 |
| | 20 200 | 1.148 ~ 2.256 | -0.006 ~ 0.615 | -0.032 ~ 0.615 |
| | 27 200 | 1.459 ~ 2.883 | -0.065 ~ 0.585 | -0.093 ~ 0.586 |
| 航槽右侧 (距航道右边界 20 m) | 2 900 | 0.472 ~ 0.931 | -0.166 ~ -0.008 | -0.118 ~ -0.008 |
| | 13 100 | 2.025 ~ 2.954 | -0.189 ~ -0.008 | -0.289 ~ -0.047 |
| | 20 200 | 2.120 ~ 2.941 | -0.168 ~ -0.010 | -0.294 ~ -0.010 |
| | 27 200 | 2.648 ~ 3.089 | -0.128 ~ 0.024 | -0.288 ~ 0.055 |

表 4 炸礁方案实施后外梁航槽内比降变化统计

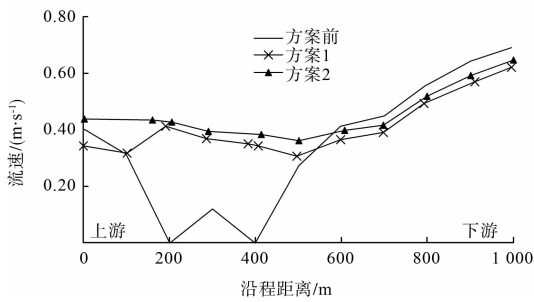
| 位置 | 流量/(m ³ ·s ⁻¹) | 流速/(m·s ⁻¹) | | |
|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------|----------------|-----------------|
| | | 方案前范围 | 方案 1 变幅 | 方案 2 变幅 |
| 航槽左侧 (距航道左边界 20 m) | 2 900 | -0.004 ~ 0.003 | -0.002 ~ 0.003 | 0.002 ~ 0.003 |
| | 13 100 | -0.198 ~ 0.042 | -0.107 ~ 0.105 | -0.065 ~ 0.082 |
| | 20 200 | -0.120 ~ 0.298 | -0.214 ~ 0.154 | -0.215 ~ 0.1692 |
| | 27 200 | -0.35 ~ 0.119 | -0.149 ~ 0.160 | -0.129 ~ 0.171 |
| 航槽右侧 (距航道右边界 20 m) | 2 900 | -0.001 ~ 0.016 | -0.002 ~ 0.010 | -0.002 ~ 0.020 |
| | 13 100 | -0.154 ~ 0.009 | -0.007 ~ 0.020 | -0.012 ~ 0.024 |
| | 20 200 | 0.012 ~ 0.104 | -0.028 ~ 0.002 | -0.029 ~ 0.006 |
| | 27 200 | -0.089 ~ 0.016 | -0.002 ~ 0.017 | -0.003 ~ 0.023 |

外梁河段炸礁的目的主要是解决因外梁存在而导致枯水期航道尺度不足、汛期滑梁水等流态碍航的问题。总体来看,由于外梁炸礁方案工程

量大,对河道边界形态改变大,因而引起的水流条件变化也较大。

在最低通航水位时,方案前外梁河段航道最

窄处宽度不足 100 m，加上外梁对流态的影响，可供利用的航道宽度仅 80 m 左右。2 个炸礁方案实施后，都拓宽了航道的宽度，满足水深的航槽宽度，达到规划的要求。而从水流条件的沿程变化来看，炸礁方案实施后沿程水面线更加平顺、流速分布更加均匀（图 6）；从计算的流态来看，航道左侧外梁前沿在炸礁方案实施以前水流紊乱、无法行船，而方案实施以后流态也得到大幅的改善，整个航道范围内流线趋直，基本不存在斜流等不良流态。



注：最低通航水位， $Q=2\ 900\ m^3/s$ 。

图 6 外梁炸礁后航道左侧沿程流速变化

在洪水期外梁淹没时，若不实施炸礁方案，无论是现场考察还是数模计算的流场分布都表明，外梁梁顶将产生与航道方向夹角较大的滑梁水以及急流等不良流态，从而大幅缩窄了航道的有效宽度。炸礁方案 1 实施后，外梁被炸除近 1/2，较多地拓宽了河道宽度，河道有效过水面积扩大，外梁挑流位置后移，且外梁走向也较方案前向河岸一侧大幅偏转，从而大大改善了汛期外梁的流态。首先，原航道范围以内的水流流速减缓，流向趋直与航道方走势基本一致，从而大幅改善了外梁河段的洪水通航流态；其次，外梁河段原来存在大面积的与航道方向夹角较大的滑梁水，工程方案实施后，因外梁没有完全炸除，故滑梁水也并未完全消除，主要是在外梁的中上部，但是

从流场计算结果可以看出，其位置向外偏移，发生滑梁水的位置距离航道左侧边界约 30 m，航道内基本已经不存在滑梁水。而炸礁方案 2 实施后，因方案 2 的炸礁基线对外梁头部也进行了炸除，并且炸除的范围更大，基本消除了外梁的挑流影响，水流流态的改善较方案 1 更大，基本消除了滑梁水对该河段航道的影响。

5 结论

总的来看，外梁的两个炸礁方案对该河段洪、中、枯水的航道条件都有大幅改善，使该河段的航道尺度达到规划目标，河段断面水力指标组合均满足 3 000 吨级船舶自航上滩的临界条件。方案 2 可以大幅改善航槽内的不良流态，但工程量较大，且大规模炸礁方案会对目前外梁上游船舶的航行线路造成不良影响。方案 1 既在一定程度上改善航槽不良流态、又不影响现有船舶的航行线路，且工程量适中；方案 2 工程量较方案 1 增加较多，且对河道洪水条件改变较大。方案 1 本身有物理模型论证支撑，因而现阶段仍然推荐以方案 1 作为外梁河段航道整治的实施方案。

参考文献：

- [1] GB 50139—2004 内河通航标准[S].
- [2] 吴持恭. 水力学(下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984: 65-70.
- [3] 陆永军, 张华庆. 平面二维河床变形的数值模拟[J]. 水动力学研究与发展: A, 1993(3): 35-46.
- [4] 李义天, 谢鉴衡. 冲击平原河流平面流动的数值模拟[J]. 水利学报, 1986(11): 11-17.
- [5] 王秀红, 曹民雄, 马爱兴, 等. 乌江沙陀电站变动回水区航道整治二维水流数学模型研究[J]. 水运工程, 2012(11): 157-159.
- [6] JTJ 312—2003 航道整治工程技术规范[S].

(本文编辑 武亚庆)