



# 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

陈 建

(长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

**摘要:** 以长江三峡库区炉子梁碍航孤礁为研究对象, 通过解析解、数学模型和概化水槽模型试验等手段, 论证了孤礁浅水效应下水面降落和船舶下沉量, 并结合长江干线航道发展规划及船舶大型化发展趋势, 确定最终的炸礁水深。工程实施后, 航槽拓宽, 航道维护及航行安全均得到了有效保障, 取得良好的整治效果。

**关键词:** 炸礁水深; 孤礁; 浅水效应; 概化水槽试验; 三峡库区

中图分类号: U 617.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)01-0125-06

## Identification of blasting depth and analysis of regulation effects of Luziliang isolated rocks in reservoirs of the Three Gorges Dam

CHEN Jian

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

**Abstract:** Taking the isolated rocks in Luziliang reach in the Three Gorges Dam as the research object, the falling of water surface and the squat of ships is demonstrated using analytic solution, mathematical model and simplified flume model tests. Considering the planning of the Yangtze River waterway and the trend of bigness ships, the reef blasting depth is determined. After project implementation, the channel has been broadened, and the channel maintenance and the sailing safety are guaranteed. The regulation effects are good.

**Keywords:** rock blasting depth; isolated rocks; effect of shallow water; simplified flume model tests; reservoirs of Three Gorges Dam

三峡工程蓄水后, 涪陵至重庆河段成为三峡库区变动回水区, 通航条件得到较大改善, 但仍然存在一些峡谷、礁石河段, 在水库消落期和中洪水期形成浅滩与急、险滩, 礁石附近流态差, 可供航行的有效航道尺度不足, 给大型船(舶)队安全航行造成较大危害。而在礁石碍航河段中部分礁石为江中孤礁, 这类礁石的存在导致河床产生突变, 从而剧烈影响局部水流条件, 礁石顶部水位降落, 航槽水深减小, 比降增大, 流速增大, 容易

导致船舶快速经过礁石时因“浅水效应”而产生吸浅、触礁等海损事故, 这类孤礁对行船危害极大。

长期以来, 相关航道整治技术规范对于江中孤礁炸礁水深没有统一的确定标准。本文通过分析三峡库区炉子梁孤礁“浅水效应”下的船舶下沉量, 采用数学模型、概化水槽试验等手段对不同炸礁水深的水位降落值进行了深入研究, 并结合长江干线发展规划及船舶大型化发展趋势, 确定了炉子梁孤礁的炸礁水深。

收稿日期: 2016-05-06

作者简介: 陈建(1970—), 男, 高级工程师, 从事港航工程科研与设计。

## 1 滩段概况

炉子梁位于上游航道里程 612 km, 所属河段航道顺直(图 1)。河心大、小炉子梁纵卧江心, 为江中孤礁, 将航道分为左右两槽。大炉子梁长 300 m、宽 30 m, 小炉子梁长 70 m、宽 20 m。

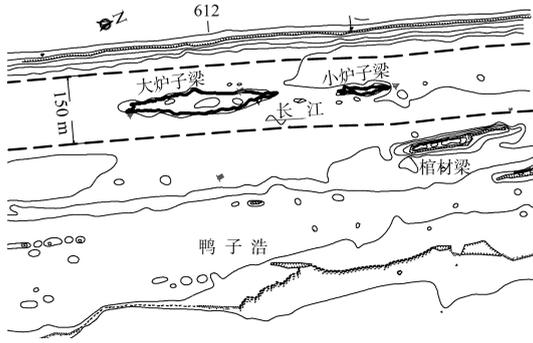


图 1 炉子梁河段河势

三峡水库 175 m 蓄水后, 该河段水面流速虽有所减小, 但左右两槽的局面并未改变, 航道依然狭窄。当太洪江水尺水位在 157 m 以下时, 左槽为主航槽, 右槽为副航槽。非汛期水流条件良好。汛期流速增大, 右岸还有棺材梁、五台梁等一系列石梁, 流态较坏。上行船舶全年沿左岸上行, 下行船舶非汛期沿航道中间下行, 汛期沿主流下行。

炸礁工程实施前, 该河段最小航道维护尺度为  $3.5 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 800 \text{ m}$  (航深 $\times$ 航宽 $\times$ 弯曲半径), 根据实测原观资料以及最新的设计最低通航水位成果分析, 大小炉子梁设计最低通航水位 153.76 m, 而大小炉子梁顶高程最高 150.83 m, 位于设计水位下 2.93 m, 不满足规划航道水深 3.5 m 的要求; 且由于大小炉子梁江心孤礁的存在, 现有左面主槽仅能达到 100 m 航宽, 不满足《长江干线航道总体规划纲要》2020 年规划航宽 150 m 的要求, 是限制大型船舶进出重庆的卡口河段。且炉子梁为江中孤礁, 位于航槽的正中间及规划 150 m 航宽船舶航行的航线上, 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。为了保证该段航道的安全, 每年航道维护部门需花费大量的人力物力对河段内的助航标志进行全年维

护, 航道维护难度极大。

## 2 炸礁水深的确定

### 2.1 孤礁“浅水效应”理论分析

#### 2.1.1 船舶的“浅水效应”

船舶航行至浅水域时, 水流受船底空间的限制主要以两舷的二元流动为主, 船体周围的水流速度增加, 摩擦阻力、涡流阻力和兴波阻力均增大, 压强降低, 船舶下沉量增大, 严重时会导致船舶吸底<sup>[1-2]</sup>, 这种现象称为船舶的“浅水效应”。

而在航槽当中, 由于炉子梁等这类江心礁石的存在, 导致河床产生突变, 从而剧烈影响局部水流条件, 礁石顶部水位降落, 航槽水深减小, 比降增大, 流速增大, 容易导致船舶快速经过礁石时因“浅水效应”而产生吸浅、触礁等海损事故, 故位于航槽中且位于船舶航线上的孤礁对行船危害极大。

#### 1) 船体周围流速及压力变化。

船舶驶于浅水水域后, 船底水下空间变小, 周围压力变化及沿船长分布情况与船型、相对水深、船速等有密切关系, 航速越高, 相对水深越浅则变化越大, 船体在水面要取得重力与浮力的平衡多表现为船体下沉。船舶驶入狭窄水道或其他船体附近时, 因船侧间隙减少, 也会使压力变化加剧, 甚至于左右难于平衡而造成航向不稳或偏转现象。

#### 2) 船体下沉与纵倾。

浅水中船体的下沉及纵倾变化较深水更为激烈, 对船舶操纵影响较大。由于浅水中流经船底的水流流速的增加, 使得船体周围水压力减小, 从而出现船舶下沉、吃水增加, 船体附加质量和附加惯性较深水中航行时增加得更加明显。船底和河床的边界层的厚度都是渐变的, 从船首到船尾逐渐增加, 使得船尾的过水断面比船首的小, 因而流速在船尾处增加较船首明显, 压力下降更多, 故船尾下沉量比船首大, 船舶呈尾倾状态, 随着船速提高, 船舶的纵倾状态会发生改变<sup>[3-4]</sup>。

### 3) 行船阻力变化。

船舶沿浅水边缘行驶, 船首向两侧排水前进, 在首部形成高压区。由于两侧的水深条件不同, 排向外侧深水一侧的水能自由扩散, 但浅水一侧水面壅高, 产生了一个附加的压力, 使两侧的反作用力不等, 其作用点在重心之前, 成偏转力矩, 推动船首向外侧偏转, 船尾则向内侧偏转。因此, 浅水一侧水深愈小, 跑舵愈显著。

#### 2.1.2 浅水航道的界定

通常来说, 船舶航行水域是否属于浅水域主要根据水深与船舶吃水之比(即相对水深  $h/T$ )而定。从理论和实践相结合的角度来看, 在浅水域中操船, 通常将相对水深  $h/T \leq 1.1$  称为自力操船的极限水深界限。在此类水域中, 船舶进行转向、横移等各种操作将十分困难; 对他船实施避让操纵, 也觉得本船动作比较呆滞, 越是大吨位船舶这种感觉越强烈。

对于三峡库区航槽内的孤礁, 若孤礁顶部水深 4 m, 对于船舶吃水 3.5 m 的 3 000 吨级货船, 则  $h/T=1.14$ , 几乎属于极浅水域; 若孤礁顶部水深 5.0 m, 船舶吃水 4.3 m 的 5 000 吨级货船, 则  $h/T=1.16$ , 几乎属于极浅水域。这些孤礁均将严重影响船舶的操纵性, 因而计算船舶下沉量时必须考虑“浅水效应”。

#### 2.1.3 船舶驶过孤礁顶部下沉量的确定

船舶在浅水域航行的安全问题之一是船体水下需留有一定的富余水深, 船舶航行下沉量的计算精度对估计安全航行所需水深有着极其重要的影响。一般来说船首和船尾的下沉量不同, 在此讨论的是最大下沉量。目前, 船舶航行下沉量的计算方法主要包括半理论公式和经验公式。

##### 1) 半理论公式。

Tuck 利用细长体理论简化得到下沉量计算公式:

$$S = c_s \frac{\nabla}{L^2} \cdot \frac{F_h^2}{\sqrt{1-F_h^2}} \quad (1)$$

式中:  $c_s$  为平均下沉系数;  $S$  为下沉量(m);  $\nabla$  为排水量( $m^3$ );  $L$  为船长(m);  $F_h$  为弗汝德数。

Hooft 比较 Tuck 公式和模型试验的结果, 得到公式<sup>[5]</sup>:

$$S = 1.46 \frac{\nabla}{L^2} \cdot \frac{F_h^2}{\sqrt{1-F_h^2}} K_s + 0.5 L \sin\left(\frac{\nabla}{L^3} \cdot \frac{F_h^2}{\sqrt{1-F_h^2}} K_s\right) \quad (2)$$

$$\text{Huuska 公式}^{[6]}: S = 2.4 \frac{\nabla}{L^2} \cdot \frac{F_h^2}{\sqrt{1-F_h^2}} K_s \quad (3)$$

上述两式中  $K_s$  为修正系数。

##### 2) 经验公式。

Eryuzlu 在模型试验的基础上给出了一个下沉量计算公式<sup>[7]</sup>:

$$S = 0.298 \frac{h^2}{T} \left(\frac{v}{\sqrt{gT}}\right)^{2.289} \left(\frac{h}{T}\right)^{-0.297} K_b \quad (4)$$

式中:  $h$  为水深(m);  $T$  为船舶吃水(m);  $v$  为船速(m/s);  $K_b$  为修正系数。

Barrass 提出一个计算公式<sup>[8]</sup>:

$$S = K C_B v^2 / 100 \quad (5)$$

式中:  $K$  为断面系数;  $C_B$  为船舶方形系数。

##### 3) 孤礁顶部船舶下沉量的确定。

选用 Barrass、Eryuzlu、Huuska 及 Hooft 共 4 个公式进行计算。

计算参数如下: 船型采用库区较具有代表性的 3 000 吨级和 5 000 吨级货船进行计算, 3 000 吨级货船长×宽×吃水=88 m×15 m×3.5 m, 5 000 吨级货船长×宽×吃水=105 m×16.3 m×4.3 m; 航速 1~5 m/s (3.6~18 km/h); 3 000 吨级船舶孤礁顶部浅水水深分别按 4、4.5、5 m 考虑, 5 000 吨级船舶孤礁顶部浅水水深分别按 5、5.5、6 m 考虑。经计算, 不同航速和水深组合下船体下沉量见表 1。

表1 不同航速和水深组合下船体下沉量计算

m

吨级/t	水深/m	h/T	公式	航速/(m/s)				
				5	4	3	2	1
3 000	4.0	1.14	Eryuzlu	0.698	0.419	0.217	0.086	0.018
			Huuska	0.824	0.413	0.203	0.084	0.020
			Hooft	0.736	0.369	0.182	0.075	0.018
			Barrass	0.575	0.368	0.207	0.092	0.023
			平均值	0.708	0.392	0.202	0.084	0.020
	4.5	1.29	Eryuzlu	0.674	0.404	0.209	0.083	0.017
			Huuska	0.754	0.398	0.200	0.083	0.020
			Hooft	0.598	0.316	0.159	0.066	0.016
			Barrass	0.575	0.368	0.207	0.092	0.023
			平均值	0.650	0.371	0.194	0.081	0.019
	5.0	1.43	Eryuzlu	0.653	0.392	0.203	0.080	0.016
			Huuska	0.709	0.387	0.198	0.083	0.020
			Hooft	0.506	0.276	0.141	0.059	0.014
			Barrass	0.575	0.368	0.207	0.092	0.023
			平均值	0.611	0.356	0.187	0.079	0.018
5 000	5.0	1.16	Eryuzlu	0.954	0.572	0.296	0.117	0.024
			Huuska	0.992	0.541	0.277	0.116	0.028
			Hooft	0.842	0.460	0.235	0.098	0.024
			Barrass	0.679	0.435	0.245	0.109	0.027
			平均值	0.867	0.502	0.263	0.110	0.026
	5.5	1.28	Eryuzlu	0.933	0.560	0.290	0.115	0.023
			Huuska	0.964	0.539	0.278	0.117	0.028
			Hooft	0.810	0.452	0.234	0.099	0.024
			Barrass	0.679	0.435	0.245	0.109	0.027
			平均值	0.847	0.497	0.262	0.110	0.026
	6.0	1.40	Eryuzlu	0.894	0.536	0.278	0.110	0.022
			Huuska	0.903	0.514	0.268	0.114	0.028
			Hooft	0.748	0.425	0.222	0.094	0.023
			Barrass	0.679	0.435	0.245	0.109	0.027
			平均值	0.806	0.478	0.253	0.107	0.025

对计算结果进行分析,从安全角度考虑,由于孤礁顶部水深较浅导致船舶触底的危害较大,船舶也不敢轻易从上面通过,因而在计算3 000吨级船舶下沉量时建议按照孤礁上水深4.5 m考虑,取下沉量的平均值0.65 m。同理,在计算5 000吨级船舶下沉量时建议按照孤礁上水深5.5 m考虑,取下沉量的平均值0.85 m。

## 2.2 数学模型计算

炉子梁二维数学模型建立的范围为炉子梁礁石上游2.5 km至下游2.9 km共计约5.4 km长的河段。由于该河段整体较为顺直,因而数学模型采用平面正交网格。

1) 计算控制条件。流量 $Q=4\ 500\ \text{m}^3/\text{s}$ ,最低通航水位 $H=153.76\ \text{m}$ 。

2) 计算方案布置。对炉子梁孤礁按照拟定深度切除超高部分礁石。共计7组水深,包括不炸礁,炸礁水深分别为3.7、4.0、4.5、5.0、5.5、6.0 m。

3) 炉子梁顶部水流特性分析。数学模型计算成果表明,在设计最低通航水位条件下,炉子梁江中孤礁的存在对水位影响较大。与无礁石的正常水面线相比,由于水下孤礁的存在,导致礁石顶部产生水面的突然降落,礁石顶部的实际水深减小,局部比降陡增,流速增大(表2)。

表 2 不同炸礁深度对水流条件影响

炸礁水深/m	最小水深/m	水位降落值/m	1 倍船长比降/‰	最大流速/(m/s)
不炸礁	2.51	0.13	14.44	1.68
3.7	3.58	0.12	13.33	1.65
4.0	3.89	0.11	12.22	1.64
4.5	4.40	0.10	11.11	1.63
5.0	4.91	0.09	10.00	1.62
5.5	4.92	0.08	8.89	1.61
6.0	5.93	0.07	7.78	1.60

### 2.3 概化水槽试验

#### 1) 模拟范围。

考虑到炉子梁河段及航槽较为顺直，且通过二维数模计算在设计水位时航槽入口水流分布较为均匀，根据本试验的设计目的，从航槽中截取部分河宽进行模拟即可满足要求。

#### 2) 模型比尺。

考虑到水深问题，原型航道内水深约在 10 m 左右，采用正态模型，平面比尺和垂直比尺采用 1:100。

#### 3) 礁石概化。

江中孤礁平面上看一般均呈离心率较小的不规则椭圆形，水槽试验时将礁石概化为前后为半圆弧、中间为矩形的结构。其中矩形长度考虑了 3 种：100、300、400 cm，宽度 8 cm。

#### 4) 试验水流条件的控制。

炉子梁河段整体较为顺直，从现场考察及二维数模计算结果来看，在设计水位条件下航槽范围内水流分布较为均匀，因此概化水槽试验采用航槽内的单宽流量作为控制条件。

#### 5) 概化水槽试验结果分析。

图 2 统计了概化水槽试验不同尺度的礁石随礁石顶部水深变化时造成的水面跌落值，从试验结果来看，礁石顶部水深对于水面跌落的影响较大。当水深较浅时跌落值较大，且此时礁石的尺寸对跌落值也有影响，礁石越长，则水位跌落值越大。随着礁石顶部的水深增加，水位跌落值逐渐减小，当水深超过 5 m 后，水位的跌落值小于 0.1 m。

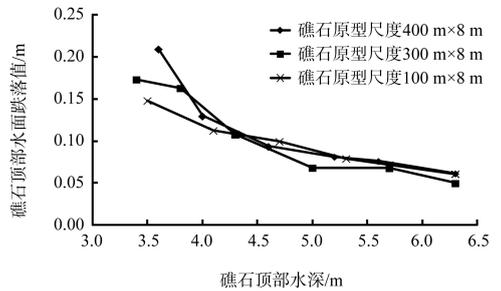


图 2 礁石顶部水位降落及其随水深的变化

### 2.4 炉子梁炸礁水深的确定

通过“浅水效应”理论分析得出，3 000 吨级船舶下沉量建议取 0.65 m。5 000 吨级船舶下沉量建议取 0.85 m。通过数学模型及概化水槽试验综合分析，礁石顶部水位降落值宜取 0.10 m。

参考内河通航标准，航道水深(炸礁水深)应按式计算：

$$H = T + \Delta H \quad (6)$$

式中： $H$  为航道水深或炸礁水深(m)； $T$  为船舶吃水(m)； $\Delta H$  为富裕水深(m)。

对于孤礁，特别是位于江心和船舶航线上的孤礁，富裕水深应包括“浅水效应”引起的船舶航行下沉量、礁石顶部水位跌落值以及石质河床富裕水深的增加值 0.2 m。

因此，3 000 吨级船舶孤礁炸礁水深应为 4.5 m；5 000 吨级船舶孤礁炸礁水深应为 5.5 m。

根据 2013 年版《长江水系过闸运输船舶标准船型主尺度系列》，长江三峡库区过闸最大标准船型已达 6 000 吨级。另外，目前三峡库区已出现少量 8 000 吨级大型船舶进行区间通航，船舶大型化趋势明显，船舶吃水增大，对通航水深的要求更高。

由于炉子梁为江心礁石，位于主航道中心，礁石两侧深槽宽度有限，为了适应今后船舶大型化发展需要，确保船舶通航安全，一劳永逸解决炉子梁维护困难等问题，最终确定炉子梁孤礁炸礁深度为 6.0 m。

### 3 炉子梁炸礁方案

大小炉子梁为江中孤礁，炸礁方案拟将整座礁石炸低至设计底高程。设计最低通航水位为

153.76 m, 设计炸礁水深为 6.0 m, 设计炸礁底高程为 147.76 m, 底坡为平坡(图 3)。

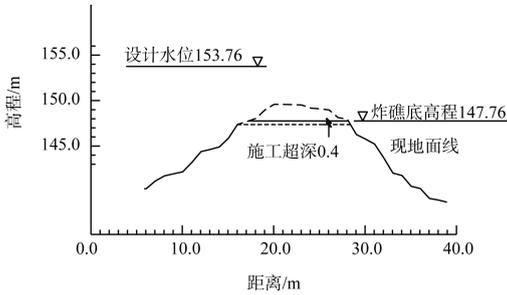


图 3 炉子梁炸礁典型断面

### 4 整治效果分析

数学模型试验表明, 方案实施以后, 航道最小水深维持在设计炸礁水深 6.0 m, 满足船舶浅水航槽内行驶的要求, 达到了炸礁工程的目的。

炉子梁炸礁工程于 2013 年 12 月开工, 2014 年 5 月全部完工并通过第三方硬式扫床验收。该工程实施后, 航槽由原来的左右两窄槽变成现在“通天槽”, 航道有效宽度满足 150 m 规划航宽要求, 全槽内航道最小水深达到 6 m, 消除了河段中枯水期的通航限制, 提高了河段航道的通过能力, 确保过往船舶的通航安全, 另外, 原来为防止船舶触礁需增加并适时调整的 5 座浮标全部取消, 极大地缓减了航道维护压力。

### 5 结语

1) 分析“浅水效应”理论, 计算得出的孤礁顶部船舶航行下沉量和水位降落值是可信的, 综合考虑各种因素最终确定的炉子梁孤礁炸礁水深 6.0 m 是合理的。

2) 炉子梁孤礁实际整治效果显著, 降低了航道维护部门的维护难度及维护工作量, 提高该段航道通过能力, 保障船舶通航安全。

3) 通过理论分析、数学模型及概化水槽试验确定的炉子梁孤礁的炸礁水深值, 可为类似工程炸礁参数的确定提供一定的参考依据。

### 参考文献:

- [1] 陈哲, 谢世平. 浅析浅水对船舶操纵的影响[J]. 重庆交通学院院报, 2002, 21(4): 119-122.
- [2] 闫伟. 大型船舶在浅水域操纵性能的探讨[J]. 航海技术, 2008(S2): 4-6.
- [3] 朱伟. 浅谈浅水道航行对船舶工况的影响[J]. 航海与船舶驾驶, 2007(1): 1.
- [4] 招定友. 船舶浅水效应的研究[J]. 天津航海, 2009(2): 4-6.
- [5] CORDIDE, HASEGEWA, HIRANO, et al. The Manoeuvring Committee: Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC [J]. International journal for philosophy of religion, 2002, 36(3): 169-186.
- [6] HUUSKA O. On the evaluation of underkeel clearances in finnish waterways report No. 9 [R]. Finland: Helsinki University of Technology, 1976.
- [7] ERYUZLU N E, CAO Y L, D' AGNOLO F. Underkeel requirements for large vessels in shallow waterways [C]// Proceedings of the 28th International Navigation Congress. Spain: PIANC, 1994: 17-25.
- [8] BARRASS C B. Thirty-two years of research into ship squat[M]. Germany: Squat Workshop, 2004.

(本文编辑 武亚庆)

## 编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿和承诺上刊等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿和审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www.sygcc.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。