



万州长江公路大桥防撞设施工程通航论证*

余葵, 刘洋, 林江, 吴俊, 胥润生, 李晓飏, 舒荣龙, 母德伟
(重庆交通大学西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 三峡水库175 m蓄水后, 万州长江公路大桥两端部分拱圈及立柱被淹没。一旦船舶失控或走偏航道碰撞拱圈和立柱, 极易导致拱桥垮塌, 引发极为恶劣的安全事故。针对大桥现状, 创新提出了弧形水上升降式桥梁防撞装置, 该装置能对拱桥易撞部位进行区域式防护, 并能随水位变化而自动升降。主要通过物理模型试验并结合相关数值模拟分析拟建防撞工程建成后对桥区河段河床演变、通航净空尺度、通航水流条件以及船舶航行条件等的影响。

关键词: 万州长江大桥; 桥墩防撞装置; 净空尺度; 通航论证; 弧形水上升降式设施

中图分类号: U 612.31⁺7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0151-05

Navigation argument on anti-collision device of Wanzhou Yangtze River road bridge

YU Kui, LIU Yang, LIN Jiang, WU Jun, XU Run-sheng, LI Xiao-biao, SHU Rong-long, MU De-Wei

(Southwestern Hydro Engineering Research Institute for Waterway, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: After the Three Gorges Reservoir storages water to 175 m, part of the arch ring of Wanzhou Yangtze River road bridge is submerged. Once the ship is out of control or goes off the channel and then collides with the arch ring, the arch bridge is easily to collapse and thus leads to accidents. Based on the current situation of the bridge, we propose arch-shape waterborne up & down anti-collision facility which will raise and fall automatically with variation of water stage. The impact of the anti-collision device on bed evolution, navigation clearance dimensiona, navigation current condition, as well as vessels' navigation condition is analyzed by physical model test and numerical simulation.

Key words: Wanzhou Yangtze River bridge; piers' anti-collision device; clearance dimension; navigation argument; arc-shaped waterborne up & down device

万州长江公路大桥位于重庆市万州主城区上游7 km黄牛孔处(距宜昌航道里程338.4 km),处于三峡水库常年回水区,是国家“两纵两横”主干线之一的318线(川—渝—鄂—沪)上跨长江的一座特大型钢筋混凝土箱形拱桥,全长856.12 m,桥宽24 m,主跨420 m,其跨度居同期同类型桥梁世界第一。

万州长江公路大桥拱圈、立柱均采用矩形钢筋混凝土薄壁箱型结构,大桥自身顺水流方向抗

撞能力较弱。同时,三峡水库正常蓄水后,该桥位于三峡水库常年回水区。由于该桥拱脚高程较低,仅152.59 m,随着三峡水库175 m蓄水运行,大部分时间内大桥拱圈将被部分淹没,桥区通航宽度进一步变窄,水深增加,加之未来船舶载质量也越来越大,一旦船舶失控或走偏航道碰撞拱圈和立柱,将极易导致拱桥垮塌,引发极为恶劣的安全事故。万州长江公路大桥桥区河段水位为172.0 m时航道现状见图1。

收稿日期: 2011-12-29

*基金项目: 交通部西部科技项目(2011318350990)

作者简介: 余葵(1965—),男,副研究员,主要从事水工结构防撞设计、桥梁通航安全、桥梁健康检测等方面的研究工作。



图1 172.0 m蓄水位时桥区航道情况

因此，针对该大桥防撞能力弱、桥区航道窄深，不适用现有的附着式、独立式、人工岛等防撞装置的特点^[1]，创新地提出了弧形水上升降式防撞装置^[2]，主要由自浮式弧形防撞带、浮筒和导向井3部分组成，其三维立体图如图2所示。工作原理是防撞带对拱桥易撞部位进行区域式防护，并利用自身水的浮力随水位变化而自动升降，受到船舶撞击时能够通过防撞带自身形变吸收船舶撞击时的巨大能量，而且弧形的碰撞面能够使船舶改变航行方向，减小撞击力，最大限度地实现对船舶和桥梁的双重保护。



图2 弧形水上升降式防撞装置三维立体图

本文通过物理模型试验并结合相关数值模拟分析，拟建防撞工程建成后对桥区河段河床演变、通航净空尺度、通航水流条件以及船舶航行条件等的影响。

1 桥区自然条件分析

1.1 桥区水文条件

万州长江大桥所在河段规划航道等级为 I

级，三峡水库正常运行后，工程河段位于三峡水库常年回水区。根据《内河通航标准》的规定^[3]，最高通航水位应采用水库正常蓄水位与洪水频率5%入库洪水（ $Q=76\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$ ）所形成库水位中较高者，并计入河床可能淤积引起的水位抬高值，而桥位处最低通航水位亦受三峡防洪限制水位控制。桥区河段通航水位如表1所示。

表1 桥区通航水位

时间或位置	最高通航水位/m	最低通航水位/m
三峡水库运行初期	175.20	145.20
三峡水库运行100 a后	175.96	145.20
三峡水库坝前水位	175.00	145.00
桥位处水位	选择高值175.96 (最高通航水位)	145.20 (最低通航水位)

注：本文除三峡坝前水位和特殊说明外，均采用黄海高程系，本地吴淞-黄海=1.74 m。

1.2 桥区河段河床演变分析

三峡成库前，工程河段为典型的山区河流，河岸及河床多由岩石和沙卵石构成，抗冲性能较好。汛期水位暴涨暴落，悬移质泥沙在边滩回流及缓流区落淤，推移质粒径较粗，在河道中呈跳跃式间隙运动状态，但在汛后沉积的泥沙又被冲刷，年内河床冲淤基本平衡，多年来工程河段河床相对稳定。

当三峡水库坝前水位按照175-155-145 m水位运行时，工程河段处于常年回水区内，历时水位较天然情况枯水位抬高50~60 m，流速大幅减缓，冲刷动力大大减缓，河段将出现累积性淤积，淤积量随着水库运行年限而增大。具体表现为：建库初期，枯水期水位升高，汛期淤积的泥沙汛后失去走沙条件，泥沙将大量落淤，库区河床将逐年抬高；同时，河道过水断面的逐年减小又将使水流流速不断增加、泥沙淤积速度得以变缓。因此，从河床演变规律上看，工程河段的河床呈逐年抬高之势，随着水库运行年限的增加，其上升速度将逐年减缓，直至达到新的冲淤平衡。

现阶段，自三峡水库蓄水以来，工程河段河床断面形态基本一致，总体略有淤积，但淤积强度还较小；工程河段河床主槽变化较小，淤积区域以回流及缓流区为主，一般淤高2~3 m，但绝大部分淤面高程处于汛限制水位以下。因此认为

三峡枢纽工程按175 m水位运行后泥沙淤积不会对工程河段通航带来大的影响, 反而因水深大幅增加流态改善, 航道条件大为改观。

1.3 防撞工程建成后对河道演变的影响

表2为拟建工程过水面积侵占率, 可以得出, 防撞工程建成后, 各级通航水位条件下过水面积侵占率较小, 对工程河段水流条件影响较小。从模型试验结果也可知: 工程建成后, 除防撞带附近水域流速有一定影响外, 其余水域流速在工程前后基本没有变化; 防撞带附近水域流速增加值一般在0.05~0.15 m/s, 且该增加值横向分布不连续, 说明工程后流速的增加在纵向和横向上均具有较明显的局部性。因此, 工程后流场改变局限在防撞带附近较小的范围内, 对工程河段通航水流条件和河势稳定影响较小。

表2 拟建工程过水面积侵占率

水位/m	工程前过水面积/m ²	工程阻水面积/m ²	面积侵占率/%
最高通航水位175.96	38 392	513	1.33
最低通航水位145.20	22 363	156	0.69

2 桥区河道通航水流条件

为了研究工程河段的水流条件, 建立了桥区河段1:100正态物理模型, 模型模拟范围是从桥轴线上游约2.5 km开始至桥轴线下游约2.5 km止长约5 km的原型河段, 模型各项比尺见表3。

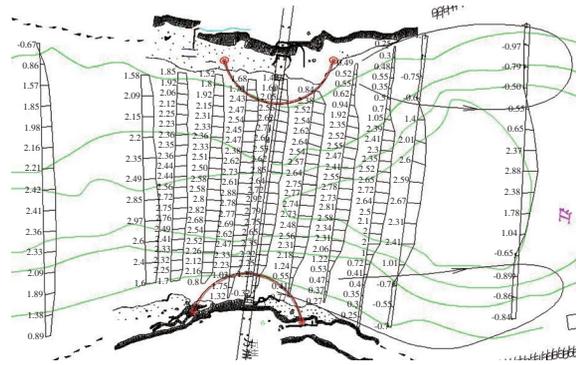
表3 整体水工模型比尺

名称	符号	关系式	比尺值
几何比尺	λ_L, λ_h	$\lambda_L = \lambda_h$	100
水流、沉降和起流速比尺	$\lambda_v, \lambda_w, \lambda_{vc}$	$\lambda_v = \lambda_w = \lambda_{vc} = \lambda_h^{1/2}$	10
流量比尺	λ_Q	$\lambda_Q = \lambda_L \lambda_h \lambda_v$	100 000
河床糙率比尺	λ_n	$\lambda_n = \lambda_h^{1/6} \left(\frac{\lambda_h}{\lambda_L} \right)^{1/2}$	2.15
水流运动时间比尺	$\lambda_{t(水)}$	$\lambda_{t(水)} = \frac{\lambda_L}{\lambda_v}$	10

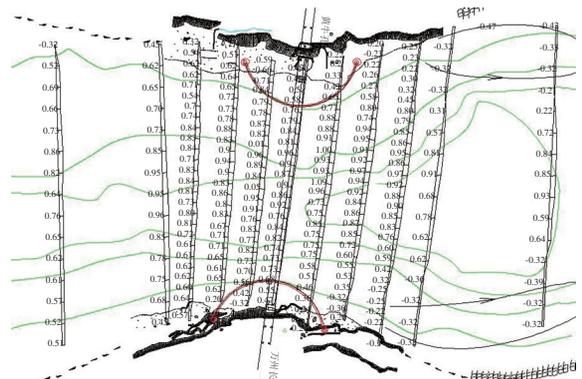
模型制作完成后, 在对模型进行几何相似性检验和实测水面线以及流速、流向等验证后, 观测了各典型工况下桥区河段的通航水流条件。

实测当采用最不利水位流量条件组合, 即三峡水库坝前水位145 m及洪水流量 $Q=56\ 700\ m^3/s$

时, 万州长江大桥桥轴线上游3倍船长范围内主流流速在2.3~2.9 m/s, 桥轴线法线方向与水流流向夹角 $3^\circ\sim 8^\circ$, 对应桥轴线最大横向流速为0.41 m/s; 当三峡水库坝前水位175 m, 遇枯期100 a一遇洪水 $Q=28\ 400\ m^3/s$ 时, 工程河段水流平缓, 流速较小, 桥轴线上游3倍船长范围内主流流速一般在0.9 m/s左右, 对应桥轴线最大横向流速为0.11 m/s。典型流速分布见图3。



a) $Q=56\ 700\ m^3/s$, 坝前145 m起调流量



b) $Q=28\ 400\ m^3/s$, 坝前175 m, 枯期1%洪水

图3 防撞工程建成后桥区河段水流条件

通过实测防撞工程前后桥区河段的水流条件可知: 工程河段河道较为顺直, 主槽单一; 各级流量情况下, 水流均较为顺畅, 断面流速分布较为均匀, 水流条件良好, 主流基本沿河心下。由于万州长江大桥桥轴线与河道基本垂直布置, 桥位附近水流流向与桥轴线法线方向基本一致; 水流出桥位后河道放宽, 主流仍位于河心, 左、右岸边附近均有回流产生。而当防撞工程建成后, 其对桥区河段水位、流速、水面比降影响较小。各级流量情况下, 防撞带外侧附近水流仍较顺直, 其边缘水流均能沿防撞带平顺流向下流, 没

有绕流、横流等不良流态；防撞带附近水域流速增加值一般在0.05~0.15 m/s，且该增加值横向分布不连续。桥区河段通航水流条件较好。

3 桥梁通航净空尺度论证

3.1 通航船型、船队论证

三峡水库蓄水运行后，为航运发展提供了良好的条件，桥区河段船舶流量大，船舶向大型化、标准化发展。考虑到三峡库区船舶大型化的趋势以及远期发展规划的要求，同时在《长江三峡水利枢纽初步设计》^[4]中，提到“单船运输主要以3 000吨级干散货船为主力”，因此，3 000吨级干散货船仍为目前的主流船型，但随着航运的发展，尺度和吨位相对较大的5 000吨级干散货船将成为库区未来的标准代表船型，其尺度为110.0 m × 19.2 m × 4.3 m。

3.2 现状条件下桥梁通航净空尺度

万州长江大桥桥区河段规划航道等级为国家I-(2)级航道，桥区航标是按最高通航水位时18 m净高进行布置，且桥位附近已建桥梁均按照18 m通航净高进行设计，因此，万州长江大桥通航净宽尺度以18 m通航净高时的通航净宽作为论证的依据为宜。

根据《内河通航标准》表5.2.2-1规定，I-(2)级航道按照3排3列船队双向取值，需满足18 m通航净高时的最小双向通航净宽为320 m，上底宽280 m，侧高7 m。根据实测资料，桥区河段最低通航水位143.46 m时，基本处于万州长江大桥两端基脚附近，按18 m通航净高取值时桥下通航净宽407 m，上底宽367 m；在桥区河段最高通航水位175.96 m时，万州长江大桥部分拱圈被淹没，桥下满足18 m净高的通航净宽为345 m，上底宽305 m，此时通航净宽尺度最小。

3.3 防撞工程建成后桥梁通航净空尺度

现状条件下，万州长江大桥满足18 m净高的通航净宽分别为345 m（最高通航水位）和407 m（最低通航水位），防撞工程建成后，桥下实际通航净宽为324 m，小于现状条件下满足18 m净高的通航净宽。因此，为保障工程河段船舶航行安全，需结合工程河段的实际通航情况，对工程实

施后桥下通航净空尺度是否满足I-(2)级航道的通航净空尺度需求加以论证（表4）。

表4 桥下满足18 m净高的通航净宽需求值

流量/(m ³ ·s ⁻¹)	桥位水位/m	通航净宽需求值(单向/双向)/m	工程后桥下通航净宽/m
28 400 (枯期)	175.50	160/320	
56 700 (汛期)	153.54	187/374	324
76 700 (汛期)	168.50	183/366	

由表4可知，枯水期三峡水库坝前水位175 m，遇同期100 a一遇洪水流量 $Q=28\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，万州长江大桥桥位处水位为175.50 m，接近最高通航水位，桥下需满足18 m净高的单向通航净宽160 m，双向通航净宽为320 m。防撞工程建成后，最高通航水位175.96 m时，按18 m净高取值桥下通航净宽为324 m，满足枯季双向通航要求。

汛期三峡水库坝前限制水位为145 m（吴淞），当工程河段洪水流量 $Q=56\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，万州长江大桥桥位处水位为153.54 m，桥下需满足18 m净高的单向通航净宽187 m，双向通航净宽为374 m；当流量大于56 700 m³/s时，水库将开始蓄洪，工程河段遇20 a一遇洪水 $Q=76\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，桥位处水位为168.50 m，桥下需满足18 m净高的单向通航净宽183 m，双向通航净宽为366 m。防撞工程建成后，汛期按18 m通航净高取值时桥下通航净宽为324 m，只能满足单向通航净宽要求。

3.4 防撞方案适应性分析

通过上述对三峡库区航运的发展和桥区河段上下游已建桥梁通航净空尺度的情况分析可知，无论从长江航运的现状还是未来发展趋势来看，5 000吨级单船灵活、机动、适应性强，是库区未来的标准代表船型。根据桥区河段通航安全管理规定（长海法规[2008]359号文），工程河段限制船舶（队）总长度不超过240 m，宽度不超过55 m，并且禁止大型船舶之间在大桥水域会让，明确桥区为通航控制河段，则最不利状态只能是一个大型船队与一艘单船交会，选择5 000吨级干散货船与工程河段限制船队为依据，参照《内河通航标准》附录C所列公式进行计算得到表5^[3]。表5分析了在满足18 m通航净空情况下不同船舶及船队组合工况下的通航条件，由此进一步得出拟建防撞

设施工程按18 m净空建成后,既能满足桥区河段在各水位时期5 000吨级单船双向通航的要求,又能满足5 000吨级单船和一大型船队交会的要求,

而且,枯期亦能满足标准船队双向通航的要求,因此,防撞设施工程按18 m净空布置能够适应现实和未来长江航运发展的需要。

表5 不同船舶及船队组合情况下的通航条件

通航净宽/m	船舶及船队组合	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	水位/m	通航净宽需求/m		通航条件
				单向	双向	
324	5 000 t单船+5 000 t单船	28 400	175.50	60.12	119.40	324>194.28
		56 700	153.54	100.32	194.28	满足双向通航要求
	5 000 t单船+大型船队	28 400	175.50	234.21	234.21	324>309.1
		56 700	153.54	309.10	309.10	满足交会通航净宽要求
	大型船队+大型船队	28 400	175.50	141.60	281.20	324>281.2
		56 700	153.54	187.00	374.00	满足双向通航要求 324<374 仅满足单向通航要求

注:通航净宽指防撞设施工程按18 m净空建成后的桥区通航净宽。

4 桥区航线规划

万州长江大桥桥区河段位于长江万州上游,其航道里程为338~339 km(距宜昌)。桥区河段河槽单一,两岸岸壁陡峭,基岩裸露,中上段顺直,下段微弯。三峡水库正常蓄水后,桥区河段高、中、低水期河宽变化不大,河宽在410~510 m。该桥主跨420 m,其下约1.2 km处有万宜铁路万州长江大桥,最大通航孔跨度为360 m。

三峡水库正常蓄水运行后,工程河段成常年库区。汛期水库坝前水位处于145 m低水位运行,由于水库抬高水位使水面比降变缓、过水面积增大、流速降低、流态均匀、主流基本沿河心下,通航水流条件较好。汛末三峡水库开始逐渐蓄水至175 m高水位,水位较天然情况大幅抬高,航道水深大幅增加,水流条件大为改善。

为适应三峡库区运行水位的变化,船舶通过桥区航段应遵守《长江三峡库区船舶定线制规定(2005)》。

通过实测洪水期船舶航迹线可见,工程河段上行船舶沿左岸一侧通航分道航行,上行航线距离拟建工程最近距离约50 m,下行船舶沿右岸一侧通航分道航行,下行航线距离拟建工程最近距离约105 m。因此,由于工程修建后桥区河段水面比降和水流流速变化均较小,拟建工程的修建未占据船舶(队)上、下行航线,工程河段船舶(队)上、下行航行方式基本保持不变。

5 结语

1) 三峡水库175 m蓄水后,使得三峡库区数

座类似万州长江公路大桥的拱桥1 a中大半时间处于拱圈淹没状态,都存在较大的船撞风险,而弧形水上升降式防撞装置的创新提出和运用将有效地解决库区此类大桥的防撞问题;

2) 拟建防撞工程建成后,对桥区河段水位、流速、水面比降影响较小,各级流量情况下防撞带外侧附近水流仍较顺直,其边缘水流均能沿防撞带平顺流向下流,没有绕流、横流等不良流态,桥区河段通航水流条件仍较好。

3) 现状条件下,最低通航水位时,万州长江大桥按18 m通航净高取值时桥下通航净宽407 m;最高通航水位时,按18 m通航净高取值时桥下通航净宽345 m。拟建防撞工程建成后,按18 m净高取值桥下通航净宽为324 m,既能满足桥区河段在各水位时期5 000吨级单船双向通航的要求,又能满足5 000吨级单船和一大型船队交会的要求,而且,枯期亦能满足标准船队双向通航的要求。

参考文献:

- [1] 王君杰,王福敏,赵君黎,等.桥梁船撞研究与工程应用[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 余葵,胥润生,李晓飏,等.水上升降式防撞装置:中国,200920293771[P].2011-04-06.
- [3] GB 50139—2004 内河通航标准[S].
- [4] 长江水利委员会.长江三峡水利枢纽初步设计[R].武汉:长江水利委员会,1993.

(本文编辑 武亚庆)