

基于风险接受准则的桥墩抗撞承载力需求分析

罗佳润

(中铁二院(广东)港航勘察设计有限责任公司, 广东 广州 510663)

摘要: 本文以一座铁路桥为研究对象, 结合 AASHTO 规范的规定, 对该桥进行了详细的风险评估, 并结合船撞桥的风险接受准则计算得到桥墩抗撞承载力的需求, 为桥梁设计提供依据, 同时还提出了桥墩防撞风险决策的建议。

关键词: AASHTO; 桥墩; 风险评估; 抗撞; 承载力; 风险决策

中图分类号: U443.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 03—0096—03

跨通航河道的桥梁中, 通常会有桥墩落于水中, 而通航水域往往又有船舶航行, 这样就存在船撞桥墩的风险。合理评估桥墩被船撞的风险, 对桥墩的科学设防具有重大意义。从目前国际上的应用情况来看, 美国 AASHTO 的《公路桥梁船撞设计指南》(2009 版) 所提供的桥梁船撞风险评估方法最为实用^[1], 该指南中提供了一个计算桥梁年倒塌频率的模型, 根据这个模型, 可以结合船舶年通航量、偏航概率、几何概率、倒塌概率等因素计算得到桥梁的年倒塌频率。

目前国内也有不少学者结合 AASHTO 提供的模型, 对特定桥梁船撞风险评估^[2-4], 为桥梁抗撞、防撞提供了一定的依据。

本文以新建渝黔铁路麻柳坪郁江大桥为例, 结合 AASHTO 的数学模型, 以关键性桥梁的年撞损概率为目标, 来反推桥墩抗撞承载力, 为桥墩的设计提供必要的依据。

1 AASHTO 风险分析模型简介^[6]

2009 年的 AASHTO 船撞设计指南中, 对风险分析提出了三种不同的方法, 其中以方法 II 的应用最为广泛。方法 II 是一种基于概率的分析程序, 方法 II 需要大量的船舶、桥梁和航道特征的输入数据。方法 II 提出了计算由于船撞导致的桥梁年倒塌频率的模型, 其计算表达式为:

$$AF=(N)(PA)(PG)(PC)(PF)$$

式中: AF 为由于船撞导致的桥梁年倒塌频率, 应针对每个桥梁构件和船舶分类进行计算, 所有桥梁构件的 AF 的总和等于整个桥梁结构的年倒塌频率; N 为按类型、尺寸和装载条件分类的可能撞击桥梁构件的船舶年通航数量; PA 为船舶偏航概率; PG 为异常船舶与桥墩或桥跨碰撞的几何概率; PC 为由于异常船舶撞击导

致桥梁倒塌的概率; PF 由于上游或下游陆块或其他阻挡船只的结构造成的船只碰撞, 考虑到潜在保护桥墩免受船舶碰撞的调整系数。其它更详细参数含义参考文献^[6]。

2 项目概况

拟建太子坪乌江特大桥所在河段为乌江重庆段, 系乌江下游段。大桥桥址区位于乌江土沱~中咀段内, 属低水通航控制河段。

从现状河道情况来看, 桥址位于三峡回水乌江段末端, 桥址河段势弯曲。桥区河段上为峡谷-庙垭口, 水面狭窄, 枯水期江面宽仅 90~100m, 最大水深可达 25m 左右, 水流流速 1.0m/s 左右; 洪水期江面展宽 110~170m, 水陡流急, 最大流速增至 3.5m/s 及以上。桥址枯水面最窄处仅约 200m, 洪水期流漫滩后, 面宽达约 400m。白马枢纽建成蓄水后, 太子坪乌江特大桥位于其常年回区, 桥址附近河道水位将抬升, 水深富余, 流速变缓, 桥区河段航道条件总体较好。

拟建太子坪特大桥中心里程: DK160+635.05, 桥长 2313.85m。其中, 跨越乌江段主孔布置为 (131+300+131)m 双塔斜拉桥。大桥 28#、29# 墩间桥孔为通航孔, 跨度 300m, 通航孔梁底高程为 231.17m。大桥 28#~29# 主墩均为圆端矩形墩, 桥墩尺寸均为 24×12m (横桥向×顺桥向, 下同), 桥墩下设圆端矩形承台, 承台尺寸均为 40.8×26×6.0m, 承台顶高均基本位于河床面以下。



图 1 拟建太子坪特大桥桥位现场

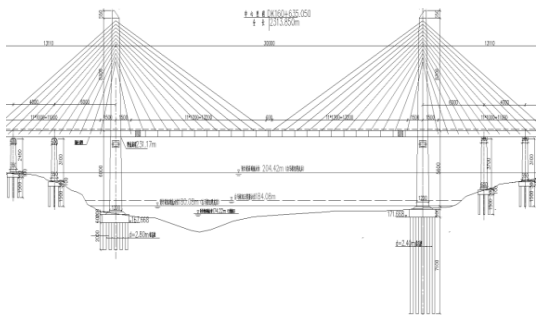


图2 拟建太子坪特大桥梁桥型图

拟建太子坪乌江特大桥梁位于乌江白马~中咀段,现状航道等级为Ⅳ级,航道维护尺度为 $1.9 \times 30 \times 330\text{m}$ 。太子坪乌江特大桥梁所在的乌江航道规划为Ⅲ级,对应航道尺度为 $2.7 \times 45 \times 480\text{m}$,通航保证率98%,通行1000t船舶。

3 船撞风险评估

3.1 通航水位的选取

根据文献^[5],桥区下游的白马枢纽建成后,对桥区的水位将产生影响。

表1 桥区通航水位

项目	天然情况下 (m)	白马枢纽建 成后	一年中的出 现概率	对应流量 (m^3/s)
最高通航水位(10年一遇洪水水位)	204.29	204.42	10%	20900
5年一遇洪水水位	200.61	200.97	20%	17500
当前武隆实际下行禁航流量 对应下水位	190.32	190.39	34%	9930
最低通航水位	174.22	180.08	34%	347

据此,本文进行船撞风险评估时,综合考虑以白马枢纽建成后对应的四个水位作为通航水位进行评估。

3.2 水流速度及航行速度

根据文献^[5]整理得到表2插值得出180.08下的水流流速并求得速度分量。

表2 不同水位下水流速度表

水位(m)	水流流向与桥轴 线法向夹角为 (°)	流速 (m/s)	船舶航向与桥轴 线法向夹角 (°)	水流速度在船 舶航向上的分 量(m/s)	水流速度在垂直于船 舶航向上的分量 (m/s)
204.42	22	3.34	18	3.33	0.23
200.97	22	3.01	18	3.00	0.21
190.39	22	2.73	18	2.72	0.19
180.08	22	2.36	14.5	2.34	0.31

3.3 通航密度

在2005年以前,彭水及银盘两级枢纽尚未开工,乌江航运正处在黄金阶段,太子坪乌江特大桥梁、黄草乌江大桥和清水坪乌江大桥所在的乌江河段船舶流量为16~20艘/日。2005~2010年银盘枢纽实行明渠通航, $5000\text{m}^3/\text{s}$ 以上流量停航,加上彭水枢纽断航,船舶流量减少为6~10艘/日。2010年底乌江银盘枢纽工程截流

断航,船舶实行翻坝运输或货物改走路上运输,受其影响,本江段船舶总流量大幅下降。根据当地港航管理部门统计资料显示,2011年至2014年,全年通过本江段的船舶仅900艘次,且多为小型短途运输船。银盘枢纽蓄水运行后,船闸具备通航条件,但受乌江航运萎缩的影响,现阶段工程所在乌江河段过坝船舶很少,仅有些私营的货船及渔船,船舶流量不大,日均流量约1~4艘次,且主要为货船。

乌江渡至涪陵段航道全长594km,是乌江干流的主要航道。乌涪段的6座水电站枢纽中(含待建的白马枢纽),思林、银盘、白马等3座枢纽的库区死水位与其上游枢纽最低通航水位相衔接,这3座枢纽建成后,其库区航道将成为常年库区航道^[7]。由于太子坪乌江特大桥梁所在的乌江航道规划为Ⅲ级,故船舶的通航量参照下游同属Ⅲ级航道的涪陵大桥处通航量,主要船型及参数见表4。

表3 2050年桥位处船舶通航量预测^[8]

不同船舶吨位*100(DWT)下的船舶通航量/艘					船舶通过总数 /艘	平均日通过船舶 次数
0.5~5	5~10	10~20	20~30	30~40		
1817	2498	2952	2612	1476	11355	31

表4 主要船型及其参数

船型	500t级	1000t级	2000t级	3000t级	4000t级
船长(m)	51	55	80	85	130
船宽(m)	9.2	11	13.8	15	16.3
吃水深度(m)	2.3	2.6	3	3.15	4.3

船舶航行速度根据文献^[5],船舶航行速度上行3.89m/s,下行6.94m/s。分析中按上下行船舶数量相等进行。

3.4 桥年倒塌可接受风险

考虑铁路的重要性,结合桥梁可接受风险的要求,确定该桥年倒塌可接受风险以0.0001次/年作为参考。

3.5 评估计算

根据已有参数计算,结合《公路桥梁抗撞设计规范》的有关规定计算得到船舶撞击力如下表5。

表5 船舶撞击力(MN)

项目	500t	1000t	2000t	3000t	4000t
上行(3.89m/s)	4.9	5.5	12.5	18.3	23.7
下行(6.94m/s)	7.4	8.2	18.7	27.5	35.5

经过分析,在最高通航水位下,船舶的可达区域涉及P1~P5五个墩,因此,将这5个墩作为研究对象,其中P2、P3为桥塔。限于篇幅,仅列出190.39m水位下的分析:

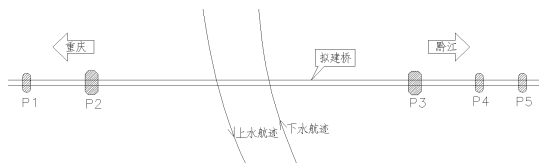


图3 桥墩与航道中心线的关系

表6 偏航概率PA(单船,主航道下)

BR	R_B	R_C	R_{KC}	R_D	PA
0.6×10^{-4}	1.51	1.58	1.41	1.0	2.02×10^{-4}

根据实测的航迹线来看,各个水位线航迹偏差不大,故针对不同的水位,采用一致的航迹线进行分析。

表7 190.39m水位下船舶撞击概率(考虑水位出现概率)

桥墩	船舶	下行				上行			
		年通过量	偏航概率	几何概率	年撞击概率	偏航概率	几何概率	年撞击概率	
P2	500t级	909	2.02×10^{-4}	0.0077	0.00048	2.02×10^{-4}	0.0155	0.00097	
	1000t级	1249	2.02×10^{-4}	0.012	0.00103	2.02×10^{-4}	0.022	0.00189	
	2000t级	1476	2.02×10^{-4}	0.0407	0.00412	2.02×10^{-4}	0.0511	0.00518	
	3000t级	1306	2.02×10^{-4}	0.0461	0.00413	2.02×10^{-4}	0.0568	0.00509	
	4000t级	738	2.02×10^{-4}	0.0627	0.00318	2.02×10^{-4}	0.0645	0.00327	
P3	500t级	909	2.02×10^{-4}	0.0074	0.00046	2.02×10^{-4}	0.0004	0.00002	
	1000t级	1249	2.02×10^{-4}	0.0117	0.00100	2.02×10^{-4}	0.0009	0.00008	
	2000t级	1476	2.02×10^{-4}	0.0402	0.00408	2.02×10^{-4}	0.0113	0.00115	
	3000t级	1306	2.02×10^{-4}	0.0455	0.00408	2.02×10^{-4}	0.0145	0.00130	
	4000t级	738	2.02×10^{-4}	0.0624	0.00316	2.02×10^{-4}	0.0361	0.00183	

根据桥年倒塌可接受风险:0.0001次/年,经过反复计算迭代,得出P2,P3抗力为35.5MN,P1,P3,P4抗力为26.5MN的前提下,全桥年倒塌可接受风险能满足要求。

表8 2050年各墩的年碰撞概率及可接受最大年倒塌概率下各墩的年倒塌概率

项目	P1	P2	P3	P4	P5
年撞击概率($\times 10^{-3}$)	5.26	88.91	32.30	4.07	0.64
全桥年撞击概率	0.13182				
各墩年倒塌概率	0.0000295	0	0	0.0000554	0.0000123

4 结论与建议

从分析结果来看,按2050年的预测数据,全桥一年被撞的次数达到0.13182次,其中P2墩被撞的风险最大,达到0.08891次/年。对于P1,P4,P5,由于在高通航水位时,会处于水中,虽其被撞风险较小,但一旦被撞,造成的后果会比较严重。对于上行船舶,速度较小,撞击力也较小,对桥墩的抗撞承载力需求不起控制作用。根据AASHTO的船撞桥风险接受准则及本次计算分析,对于通航孔的抗撞设防承载力需要满足最大通航船舶撞击力的要求,同时要尤其注意距离通航孔不远处的水中辅助墩抗撞风险,这类墩往往承载力较低,一旦被遭受较大的撞击力,会产生严重后果。如果要将全桥的年倒塌风险降至 10^{-4} 以下的话,仅仅从提高抗力的角度出发,将会以较高的通航船舶的撞击力来设计

通航孔的桥墩,对于非通航孔的桥墩,这样做的代价会比较高昂。

基于以上的分析,给出以下风险决策建议:

(1) 由于桥梁所在航段的船舶在目前情况下所列船型,由于后期白马枢纽的建成后,会对航道有重大影响,所以可以结合当前情况,做好当前的桥墩抗防撞设计,确保近期桥梁安全;

(2) 结合后期的航道的变化,动态搜集航道及船型信息,适时做好相应的船撞风险评估,并作出相应的调整;

(3) 当前情况下,需做好航道的导助航措施,有效减少船舶的偏航概率;

(4) 对于有通航需求的桥梁,前期可结合此方法计算桥墩抗撞承载力需求,确定墩尺度及材料或先行确定尺寸及材料后再结合此方法验算。

参考文献:

- [1] 耿波,王福敏,汪宏.三峡库区桥梁船撞技术与工程实践[M].人民交通出版社,2016
- [2] 张少为,毛瀚概.嘉陵江黄花园大桥船桥碰撞概率的AASHTO计算法解析[A].中国公路学会桥梁和结构工程分会、辽宁省公路学会、中朝鸭绿江界河公路大桥项目指挥部.中国公路学会桥梁和结构工程分会2013年全国桥梁学术会议论文集[C].中国公路学会桥梁和结构工程分会、辽宁省公路学会、中朝鸭绿江界河公路大桥项目指挥部:中国公路学会,2013:6.
- [3] 邓安妍,高建东,杜跃亭.基于AASHTO模型算法的桥梁船撞风险分析[J].世界桥梁,2011(01):55-58.
- [4] 高晓,赵宏元,姚浩桢.基于AASHTO规范的城市内河航道船桥碰撞风险分析[J].港工技术,2020,57(S1):116-119.
- [5] 重庆西科水运工程咨询中心,湖南省交通规划勘察设计院有限公司.新建重庆至黔江铁路跨河桥梁航道通航条件影响评价报告[R].,2019.12
- [6] AASHTO.Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges (2nd edition) [Z].American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C.2009
- [7] 姚育胜.乌江水电开发对航运的影响及对策研究[J].武汉交通职业学院学报,2016,18(03):5-10.
- [8] 曹佰杨,李嵩林.涪陵乌江大桥复线桥船撞风险研究[J].公路交通技术,2016,32(02):51-56