

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.02.010

基于目标失效概率的桥梁船撞风险 及防撞水准论证

张智超¹, 张景峰¹, 杨 栋², 冯 亮¹, 韩万水¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中检西部检测有限公司, 陕西 西安 710032)

摘要:为合理确定跨航道桥梁的船撞风险与防船撞设计水准,采用基于目标失效概率的分析方法,对某跨航道桥梁进行了船撞安全风险评估。根据美国 AASHTO 船撞分析规范推荐的船舶速度调整模型,对船舶碰撞速度进行了修正,并采用 AASHTO 经验数学模型进行了桥梁船撞概率计算。根据中国《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020)中提供的等效静力法,计算了不同载重吨位与不同速度的船舶碰撞力。采用截面抗力法计算了桥梁的船撞抗力。通过对比桥梁船撞抗力与不同吨位级别的船舶碰撞力,分析得到了桥梁实际防撞水准,并根据桥梁目标失效概率(1×10^{-4} 次/a)反推得到了桥梁设计防撞水准。结果表明:桥梁船撞安全风险主要来源于靠近航道下行线且船撞抗力较低的桥墩;桥梁在 5 a 和 10 a 后的船撞概率分别增长 1.4 倍和 1.8 倍,而桥梁的失效概率分别增长 1.8 倍和 2.4 倍,船舶流量增长过程中大吨位船舶比例增加,桥梁船撞失效概率的增长速率要高于船撞概率;采用基于目标失效概率得到的桥梁设计防撞水准可确保全桥各涉水桥墩具有相对一致的船撞安全可靠度,船撞失效风险处于可控水平,采用设计防撞水准后可使桥梁的船撞年失效概率较实际设防水准在目前及远期分别下降 17.0 倍和 14.6 倍。

关键词:桥梁工程;桥梁船撞风险评估;目标失效概率;跨航道桥梁;防船撞设计水准

中图分类号:U447

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2023)02-0072-09

Demonstration of Bridge-vessel Collision Risk and Fortification Criterion against Vessel Collision Based on Target Failure Probability

ZHANG Zhi-chao¹, ZHANG Jing-feng¹, YANG Dong², FENG Liang¹, HAN Wan-shui¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

2. CCIC West Testing Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710032, China)

Abstract: In order to reasonably determine the vessel collision risk and design fortification criterion against vessel collision for bridges cross navigable waterways, the risk assessment of a selected cross-channel bridge is conducted by using the analysis method based on target failure probability. According to the vessel speed adjustment model recommended by AASHTO vessel collision analysis specification, the collision speed of vessel is modified, and the bridge-vessel collision probability is calculated by using the AASHTO empirical mathematical model. According to the equivalent static method provided by Chinese *Specifications for Collision Design of Highway Bridges* (JTG/T 3360-02—2020), the vessel collision forces under different load tonnages and different speeds are calculated. The collision resistance of the bridge is calculated by using sectional resistance method. The actual fortification criterion against vessel collision is obtained by the comparison between the bridge anti-collision resistance and vessel collision load at each tonnage level. The

收稿日期:2021-09-28

基金项目:国家自然科学基金项目(51808048);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2022JM-177);中央高校基本科研业务费项目(CHD 300102212911)

作者简介:张智超(1998-),男,山东济宁人,硕士。(17866618319@163.com)

fortification criterion for bridge against vessel collision is inversely calculated based on the of bridge target failure probability (1×10^{-4} times/a). The result shows that (1) Bridge-vessel collision risk mainly comes from the piers close to the down-bound line of the waterway with low structural anti-collision resistance. (2) The bridge-vessel collision probability after 5 years and 10 years increases by 1.4 times and 1.8 times respectively, while the failure probability of the bridge increases by 1.8 times and 2.4 times respectively. Since the proportion of large-tonnage vessels increases with the growth of vessel traffic, the failure probability of bridge increases at a higher rate than that of bridge-vessel collision probability. (3) The adoption of the designed bridge fortification criterion against vessel collision could ensure relatively uniform safety reliability for all in-water piers within overall bridge, and the failure risk of bridge due to vessel collision is at a controlled level. After adopting the designed anti-collision fortification criterion, the annual failure probability of the bridge due to vessel collision could be reduced by 17.0 times and 14.6 times respectively at present and in the future compared with the adoption of actual fortification criterion.

Key words: bridge engineering; bridge-vessel collision risk assessment; target failure probability; cross channel bridge; designed fortification criterion against vessel collision

0 引言

随着我国桥梁建设事业的迅猛发展,大量跨越江河海湾桥梁已经建成或处于规划建设之中。预计到2025年,我国“黄金水道”长江上建成和在建特大桥将突破100座^[1-2]。蓬勃发展的桥梁建设虽然对缩短陆路交通距离、促进区域间经济文化交流起到了巨大作用,但大量修建的跨航道桥梁也逐渐成为水上交通运输的障碍,桥梁结构与水上船舶之间的矛盾逐渐凸显。近年来,我国频繁发生多起严重的船桥碰撞事故,造成了人员伤亡和严重的经济损失^[3],为此交通运输部联合3部门印发了《船舶碰撞桥梁隐患治理三年行动实施方案》,以期提升跨航道桥梁的安全水平。

对于跨航道桥梁,采用概率论方法并根据桥梁重要性程度以及船撞安全风险确定桥梁的防撞水准,是在满足桥梁建设经济性和适用性的基础上,提高桥梁防灾减灾能力的重要途径^[4]。自20世纪70年代起,国外大型工程咨询公司和研究机构就针对跨航道桥梁进行了船桥碰撞风险专题研究:美国国家公路与运输协会AASHTO发布的《船舶碰撞公路桥梁设计指南》中给出了确定跨航道桥梁船撞倒塌概率的实用计算方法^[5];欧洲规范中同样基于风险分析的设计思想给出了桥梁船撞失效风险的计算流程^[6]。在国内,王君杰等^[1]较早地对船桥碰撞概率、安全风险准则进行了深入研究,建立了桥梁船撞安全评估数据库;Wang等^[7]考虑水中障碍物的影响,基于Kunz模型建立了同时适用于直航道和弯航道的船撞概率计算数学模型;周敦等^[8]联

合采用有限元-神经网络-蒙特卡洛法和极限状态设计法,对不同可靠度指标下的桥梁船撞作用组合分项系数进行了研究;王鹏等^[9]采用三概率参数路径积分方法计算了某钢箱梁斜拉桥自身抗船撞能力及近远期年碰撞概率和倒塌频率;罗佳润^[10]基于AASHTO规范对某座铁路桥的桥墩抗撞承载力进行了分析;钱国辉^[11]针对上海某座既有航道桥梁船舶撞击风险进行了评估,并对其抗撞性能进行了分析。我国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[12]中建议应进行专题研究确定船舶撞击作用,但对具体的流程和方法并无明确规定。交通运输部于2020年发布了《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020)^[13](下称中国规范),该规范根据桥梁重要性等级和失效概率,提出了“性能设计、分级设防”的总体方法,提升了抗船撞设计的科学性。从目前实践来看,船桥碰撞专题研究已成为大跨径桥梁规划和设计初期必须的工作,以确定桥梁船撞安全风险满足要求,但目前专题论证确定桥梁防船撞水准时,往往参考桥区范围内在建桥梁,或简单以桥区通航最大吨位船舶的碰撞力作为设计防撞要求,缺乏可供参考的科学做法,传统确定过程基于确定性思路且带有主观性,可能造成桥梁实际防撞水准过低或过高,无法在经济性和安全性上取得平衡。

基于此,本研究以某跨航道桥梁的船撞安全分析为例,计算桥梁实际失效概率并据此确定桥梁的实际防撞水准,根据设定的桥梁目标失效概率论证桥梁设计防撞水准,为桥梁抗船撞设计工作提供科学参考。

1 既有桥梁防撞水准确定方法

桥梁防撞水准,即桥墩在偶然组合作用下承载能力极限状态实际所能承受的设计船型船撞作用或所对应的船舶吨级。目前的桥梁防船撞水准确定方法主要有半确定性方法、基于设定失效概率的风险分析方法以及费用-效益分析方法。

基于设定失效概率的风险分析方法适用于具有明确性能要求的大多数跨航道桥梁结构,桥梁的设定失效概率可根据桥梁的重要性程度而具有不同的失效水准,亦可根据桥梁结构撞击后的性能状态设定不同的目标概率。中国规范、欧洲规范和美国 AASHTO 规范在桥梁船撞安全风险计算的出发点和思路是一致的,但是相较而言美国 AASHTO 船撞分析指南中给出的船撞风险分析方法较为明确且具有可操作性,在船撞风险专题分析中的使用最为广泛。AASHTO 规范中计算处于航道中桥梁构件在受到船舶碰撞荷载作用下结构发生倒塌的年概率表达式如式(1)所示,桥梁结构的倒塌概率应为各个控制桥梁结构安全(是否失效)年失效倒塌概率之和,采用 AASHTO 指南中的船撞风险分析方法流程如图1所示。

$$AF = \sum_{i=1}^n (N_i)(PA_i)(PG_i)(PC_i)(PF_i), \quad (1)$$

式中, AF 为桥梁结构的年倒塌频率; N 为每类船舶的年通行量; PA 为船舶的偏航概率; PG 为表征偏航后船舶撞上桥梁的可能性大小的几何概率; PC 为偏航船舶碰撞桥梁后发生倒塌的概率; PF 为保护措施

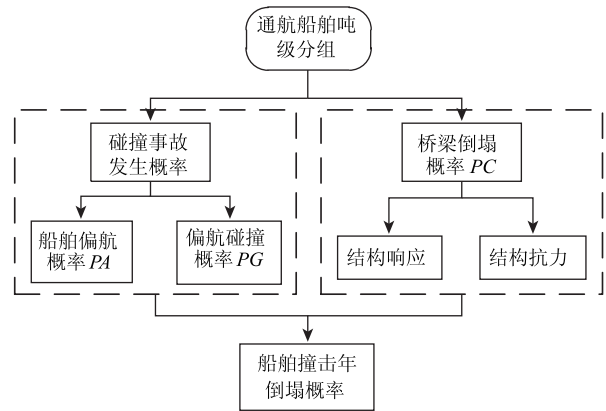


图1 AASHTO 规范船撞倒塌年概率计算流程

Fig.1 Flowchart of calculating annual vessel collision collapse probability in AASHTO specification

施调整系数; i 为第 i 种类船舶; h 为船舶种类数。

2 桥梁船撞风险评估

2.1 工程概况和基本参数

某跨航道桥梁全长 1 270 m, 由主桥及两侧引桥组成(见图2)。其中主桥为中承式系杆拱桥, 主跨 420 m, 两侧边跨 100 m, 左侧引桥为 7×70 m 等跨连续梁, 右侧引桥为 4×40 m 等跨连续梁。左侧引桥 3[#]~7[#]桥墩, 以及主桥 8[#]~10[#]桥墩在绝大多数水位条件下位于水中, 存在船撞风险, 右侧引桥桥墩不涉水。主桥桥墩采用变截面空心薄壁墩, 左侧引桥桥墩采用双矩形空心柱式墩, 基础均采用低桩承台群桩基础(见图3)。大桥设计通航净高为 37.12 m, 实际通航宽度为 393 m, 最低通航水位为 160.58 m, 最高通航水位为 189.41 m。

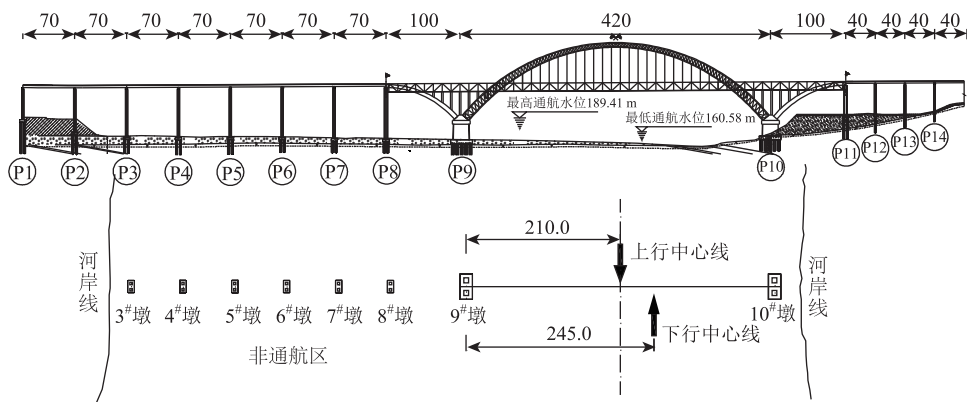


图2 桥梁立面及航道布置图(单位: m)

Fig.2 Arrangement of bridge elevation and channel (unit: m)

通航航道的船型组成较复杂, 船舶载重吨位从小于 1 000 DWT 到超过 8 000 DWT 不等, 为便于进行船撞风险分析, 对于中小吨位船舶, 选择数量较

多的 1 000 DWT 级和 3 000 DWT 级货船作为分析代表船型, 大吨位船舶一般数量较少, 但往往是船撞安全风险的控制性因素, 本研究选取典型的

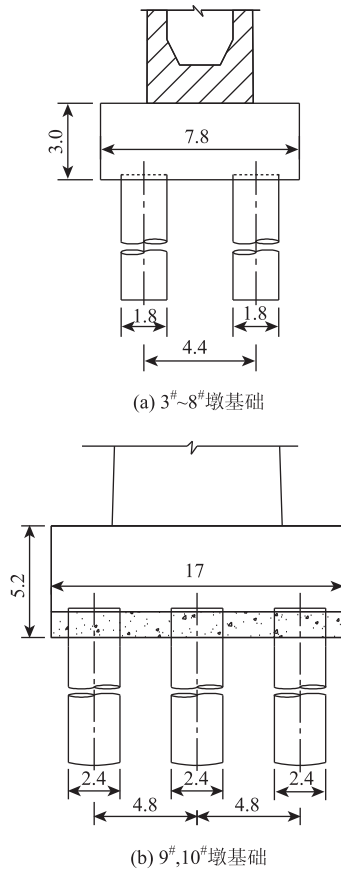


图 3 桥梁基础形式 (单位: m)

Fig. 3 Pattern of bridge foundation (unit: m)

5 000 DWT 级和 8 000 DWT 级船舶作为分析船型。基于航道通航流量统计数据,考虑航道船舶流量增长对远期船撞安全风险的影响,确定各吨位级别船舶在目前以及 5 a 和 10 a 后的通行流量,如图 4 所示。中小吨位船舶(1 000~3 000 DWT)流量约占船舶总流量的 50%,上行船舶在不同预测年份基本保持与下行船舶相等,船舶流量 5 a 后和 10 a 后相对于目前增长 40%和 80%。

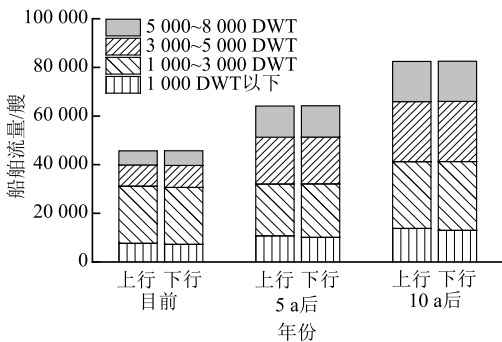


图 4 各吨位船舶流量分布

Fig. 4 Distribution of vessel traffic by tonnage

根据船舶实际航迹线观测数,上行船舶航迹中

心线基本与主孔航道中心线重合,下行航道航迹线平均值距离 9#墩为 245 m (见图 2)。船舶撞击速度是影响船舶撞击力的重要因素,根据观测数据,1 000~3 000 DWT 级货船的上水典型航速为 2.78 m/s,5 000~8 000 DWT 级船舶的上水典型航速为 12 km/h (3.33 m/s),下水船舶在上水船舶典型航速的基础上,叠加如表 2 中所示的相应水位水流流速。需要指出的是,通过船舶流量调查得到的船舶速度一般为各类代表性船舶的上行和下行典型通航速度,对于通航船舶在实际情况下的撞击速度需要进行调整,目前最常采用的船舶撞击速度计算模型是根据 AASHTO 规范推荐的船速调整模型得到的。

表 1 各桥墩处不同水位水流流速

Tab. 1 Water flow velocities at different water levels at each pier

桥墩	水流流速/(m · s ⁻¹)				
	164.91 m 水位	167.67 m 水位	173.52 m 水位	179.4 m 水位	189.41 m 水位
3	—	0.73	0.75	0.91	1.71
4	—	1.25	1.79	1.63	1.79
5	—	1.89	2.15	2.05	2.1
6	0.15	2.29	2.35	2.35	2.3
7	0.2	2.55	2.44	2.51	2.43
8	0.3	2.74	2.8	2.7	2.54
9	0.56	2.89	2.91	2.54	2.36
10	—	—	0.53	0.48	0.69

2.2 碰撞倒塌概率

倒塌概率 PC 表征在碰撞发生情况下结构倒塌失效不能完成预计功能的概率,目前对于船桥碰撞倒塌概率 PC 的计算主要有倒塌概率曲线或抽样模拟 2 种方法^[14],桥梁船撞倒塌概率曲线可被认为是一种桥梁船撞易损性曲线^[5],AASHTO 规范中 PC 的计算公式具体表达如下:

$$PC = \begin{cases} 0.1 + 9(0.1 - H/P_B) & 0 \leq H/P_B < 0.1 \\ (1 - H/P_B) & 0.1 \leq H/P_B \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, H 为桥梁抗力; P_B 为船舶碰撞力。

关于船舶撞击桥梁下部结构荷载的计算方法主要有等效静力法、简化荷载时程法^[15]以及有限元仿真计算^[16]。相较于其他碰撞荷载计算方法,等效静力法计算最为简便,等效荷载的取值在一定程度上考虑了碰撞过程中的动力效应。表 2 给出了采用不同方法得到的船撞力荷载,中国规范的碰撞力计算方

表 2 不同计算方法得到的船撞力

Tab.2 Vessel collision forces by different calculation methods

船舶载重 吨位/DWT	满载吨位/ t	撞击速度/ (m·s ⁻¹)	AASHTO	Pedersen	中国规
			规范计算 船撞力/ MN	公式 ^[17] 计算船 撞力/MN	范计算 船撞力/ MN
1 000	1 600	2.78	10.77	17.20	10.47
		5.56	21.54	34.45	20.93
3 000	4 400	2.78	18.65	32.50	19.59
		5.56	37.31	64.99	39.19
5 000	6 700	3.33	28.84	48.04	30.46
		6.11	52.93	88.14	55.89
8 000	9 850	3.33	36.49	58.24	38.68
		6.11	66.95	91.67	70.98

法是根据我国 8 艘代表性轮船的船撞动态过程，经过数理统计得到的，来源依据明确，且与美国 AASHTO 规范中的计算结果相差较小，因此本研究采用中国规范方法计算船舶碰撞力。

船撞抗力表示的是桥梁构件可以抵抗的最大船撞荷载，桥梁船撞抗力的计算一般可采用截面抗力分析方法或 Pushover 分析方法，本研究采用截面抗力法计算桥梁船撞抗力，对于已服役桥梁，在具有可靠检测数据的情况下，应考虑材料劣化对结构抗力的影响。船撞抗力计算结果在图 5 中给出。

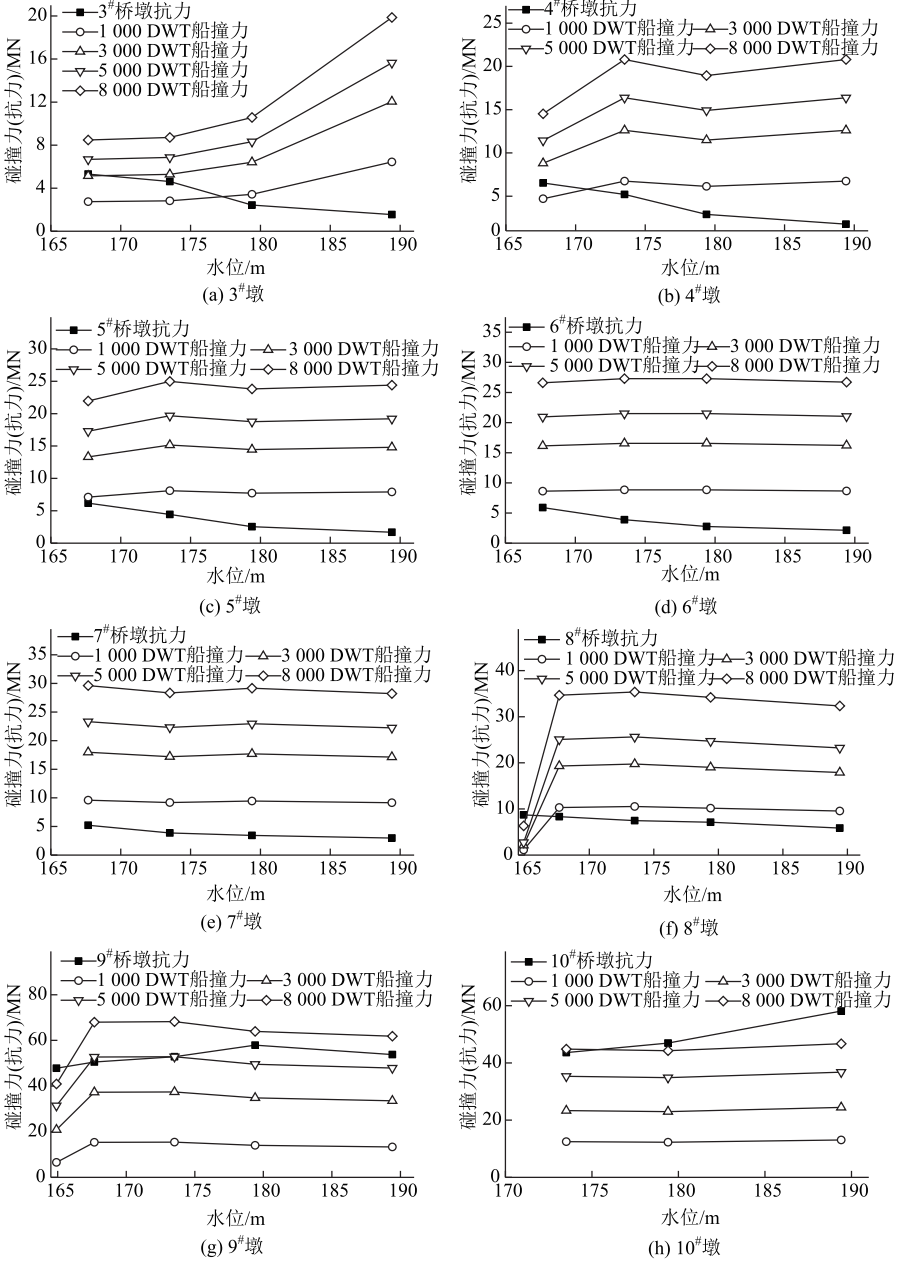


图 5 不同水位下各桥墩抗力和船撞力对比曲线

Fig.5 Comparative curves of resistance and vessel collision force of each pier at different water levels

2.3 船舶碰撞概率

船舶碰撞概率表征桥区航运船舶在各种可能情况下撞击接触跨航道桥梁的概率,是船撞风险分析的核心内容。船舶碰撞桥梁事件的发生与多种因素相关,准确确定难度较大。目前确定碰撞概率的主要方法有观测统计法和经验数学模型法,常用的经验数学模型主要有 AASHTO 模型、KUNZI 模型、EUROCODE 模型以及三参数路径积分模型^[1],本研究采用操作性较强的 AASHTO 方法计算船舶碰撞概率。

式 (1) 中, (N_i) (PA_i) (PG_i) 即为每一类船舶通过航道时与桥墩发生碰撞的概率,表 3 给出了目前以及远期预测年份下的船撞概率,需要说明的是,表 3 中所给出的各墩船撞概率是在各水位下船撞概率的加权求和。可以发现,所分析的桥梁船撞概率随时间推移而逐渐增长,在目前、5 a 后以及 10 a 后的船撞概率为 1.98, 2.82 次/a 和 3.62 次/a,船撞风险按照从大到小的顺序依次为 9[#], 10[#], 8[#], 7[#], 6[#], 5[#], 4[#], 3[#]桥墩,其中 9[#], 10[#]和 8[#]标墩年碰撞概率较大,在远期 10 a 后分别达到了 2.37, 1.11 次/a 和 0.13 次/a。

表 3 不同年份桥梁船撞概率及年倒塌概率

Tab. 3 Probabilities of bridge-vessel collision and annual collapse in different years

桥墩	2020 年		2025 年		2030 年	
	船撞概率/ (次·a ⁻¹)	年倒塌概率/ (次·a ⁻¹)	船撞概率/ (次·a ⁻¹)	年倒塌概率/ (次·a ⁻¹)	船撞概率/ (次·a ⁻¹)	年倒塌概率/ (次·a ⁻¹)
3	1.56E-08	7.54E-09	3.03E-08	1.56E-08	3.89E-08	2.00E-08
4	6.50E-07	3.14E-07	1.19E-06	6.09E-07	1.54E-06	7.84E-07
5	1.88E-05	1.15E-05	3.26E-05	2.17E-05	4.19E-05	2.79E-05
6	3.84E-04	2.01E-04	6.32E-04	3.53E-04	8.12E-04	4.54E-04
7	4.74E-03	1.94E-03	7.39E-03	3.31E-03	9.51E-03	4.26E-03
8	6.69E-02	2.11E-02	1.02E-01	3.33E-02	1.31E-01	4.28E-02
9	1.30E+00	1.79E-02	1.85E+00	3.87E-02	2.37E+00	4.98E-02
10	6.07E-01	6.45E-04	8.61E-01	1.40E-03	1.11E+00	1.80E-03
全桥	1.98E+00	4.18E-02	2.82E+00	7.71E-02	3.62E+00	9.91E-02

2.4 桥梁船撞失效风险分析

桥梁船撞失效风险一般以年倒塌概率或失效重现期表示,从表 3 中给出的各墩及全桥在不同预测年度的船撞年倒塌概率可以看出,大桥全桥年倒塌概率分别为 4.18×10^{-2} , 7.71×10^{-2} 次/a 和 9.91×10^{-2} 次/a,其中倒塌风险主要来源于 8[#], 9[#], 7[#]和 10[#]桥墩。8[#]和 7[#]桥墩倒塌风险较高的原因主要是其距离主航道距离较近,存在较大的船撞风险,又因其自身抗力较小,在船撞作用下倒塌概率较大,所以其年倒塌概率最大。9[#]桥墩由于其距离主航道较近且桥墩附近流速较快,船舶撞击力和撞击风险较大,因此船舶撞击年倒塌概率较高;10[#]桥墩由于其自身抗力较大,在发生船撞情况下的倒塌概率(PC)并不高,但由于其距离主航道最近,船舶撞击风险较大,最终的船舶撞击年倒塌概率较高。大桥在目前、5 a 后以及 10 a 后的年倒塌概率逐渐增大,5 a 和 10 a 后全桥的倒塌风险分别比目前年增长 84%和 137%。对比表 3 中的船撞概率和年倒塌概率数据可以发现,随着船舶流量的增长,桥梁船撞失效概率的增长速率要高于船撞概率,这主要是由于

增长的船舶流量中,大吨位船舶比例增加,导致碰撞后结构的失效概率增加,最终使得年倒塌概率的增长速率快于船舶流量和碰撞概率的增长速率。

根据中国规范中给出的 L2 船撞作用设防水准,取 1×10^{-4} 次/a 作为船撞倒塌的可接受临界水平,可知无论是在近期、5 a 后以及 10 a 后,大桥的船撞年倒塌概率均超出可接受临界水准 2 个数量级。不仅如此,8[#]和 9[#]桥墩单独的船撞年倒塌概率在各个年份均已超出 1×10^{-4} 次/a 临界水准 2 个数量级,7[#]桥墩的船撞年倒塌概率在各个年份均已超出临界水准 1 个数量级;同时 10[#]桥墩在 5 a 以及 10 a 后的船撞年倒塌概率也将超出临界水准 1 个数量级。因此,大桥的船撞安全风险主要来源于 7[#]~10[#]这 4 个桥墩,由于下行船舶的船撞速度一般比上行船舶高,因此可以推知船撞安全风险主要来自于下行航道船舶。3[#]~6[#]桥墩由于远离主航道,当船舶漂流至距离主航道较远时,船舶在发生碰撞时速度较低,考虑到 3[#]~6[#]桥墩的船舶碰撞概率处于较低水平,因此最终的船撞年倒塌概率均较低,对于全桥的船撞安全风险影响不大。

3 桥梁防撞水准论证

3.1 桥梁实际防撞水准

通过对比图 8 中桥墩碰撞抗力与不同吨级船舶实际碰撞力之间的相对大小关系,可得到桥梁的实际防撞水准。3#桥墩在 167.97 m 和 173.52 m 水位下,其桥墩抗力大于 1 000 DWT 级船舶碰撞力,在 179.40 m 水位下,桥墩抗力稍小于 1 000 DWT 级船舶碰撞力,在最高水位下(189.41 m),桥墩抗力明显小于 1 000 DWT 级船舶碰撞力,考虑到最高水位在 1 a 中出现的概率只有 0.5%,确定 3#桥墩的实际防撞水准接近但略小于 1 000 DWT 级船舶碰撞力;5#、6#和 7#桥墩在各水位情况下,4#和 8#桥墩除在

164.91 m 水位情况下,其船撞抗力均明显小于 1 000 DWT 级船舶碰撞力,确定 4#~8#桥墩的实际防撞水准小于 1 000 DWT 级船舶碰撞力;9#桥墩除在 167.97 m 水位情况下的桥墩抗力略小于 5 000 DWT 级船舶碰撞力外,其余各水位情况下的桥墩抗力均大于 5 000 DWT 级船舶碰撞力,因此确定 9#桥墩实际防撞水准为接近但略小于 5 000 DWT 级船舶碰撞力;10#桥墩除在 173.52 m 水位条件下的船撞抗力略小于 8 000 DWT 级船舶碰撞力外,其余水位情况下的船撞抗力均大于 8 000 DWT 级船舶碰撞力,因此确定其实际防撞水准为接近但略小于 8 000 DWT 级船舶碰撞力。各墩实际防撞水准在表 4 中给出。

表 4 桥梁防撞水准论证

Tab. 4 Demonstration of fortification criterion against vessel collision for bridges

桥墩	3	4	5	6	7	8	9	10
实际防撞水准/DWT	接近 1 000	<1 000	<1 000	<1 000	<1 000	<1 000	接近 5 000	接近 8 000
设计防撞水准/DWT	1 000	1 000	1 000	3 000	5 000	5 000	8 000	8 000

3.2 桥梁设计防撞水准

3.2.1 桥梁设计防撞水准确定原则

由于大桥实际防船撞安全水准较低,导致其年倒塌概率远高于临界失效水平,因此需要通过桥梁防撞设计提升防撞水准。桥梁船撞安全评估本质上属于风险分析范畴,而桥梁设计防撞水准的确定,也应从风险分析的角度出发,确定满足桥梁船撞安全指标的设计防撞水准。具体就是通过设定单个桥墩以及结构整体的倒塌年概率指标(1×10^{-4} 次/a),经反算得到设计碰撞船舶的临界吨位级别,该吨位级别即为桥梁设计防撞水准。

3.2.2 桥梁设计防撞水准论证

3#、4#和 5#桥墩的船撞年倒塌概率小于中国规范中给出的 L2 船撞作用设防水准(1×10^{-4} 次/a),因此可认为 3#、4#和 5#桥墩的船撞安全风险完全满足要求,但综合考虑全桥设计防撞水准的连续性,可取 1 000 DWT 级船舶(碰撞力)作为 3#、4#和 5#桥墩的设计目标防撞水准。

在实际防撞水准下,6#桥墩的船撞年倒塌概率在不同年份均超出临界安全水平,根据给出的不同设计防撞吨位级别所对应的桥墩年倒塌概率,当设防水准为 1 000 DWT 级船舶时,6#桥墩船撞年倒塌概率仍超过临界值 1×10^{-4} 次/a,上调防撞水准为 3 000 DWT 级船舶时,6#桥墩在目前和 5 a 后的年倒塌概率均低于 1×10^{-4} 次/a,在 10 a 后年倒塌概率为

1.15×10^{-4} 次/a,略微超过中国规范中给出的 L2 船撞作用设防水准年倒塌概率临界值。7#和 8#桥墩的船撞年倒塌概率远超临界值,是全桥船撞安全风险的主要来源之一。通过图 9 可知:对于 7#桥墩,当设防水准为 5 000 DWT 级船舶时,7#桥墩目前、5 a 后和 10 a 后的年倒塌概率分别为 1.78×10^{-4} 、 3.85×10^{-4} 次/a 和 4.95×10^{-4} 次/a,上调设防水准为 8 000 DWT 级船舶时,理论上桥梁船撞倒塌概率为 0。对于 8#桥墩,当防撞水准设为 3 000 DWT 级船舶时,8#桥墩船撞倒塌概率仍然较大,提高船撞设防水准至 5 000 DWT 级船舶时,8#桥墩的船撞倒塌概率仍超过 1×10^{-4} 次/a 的临界值,提高防撞水准至 8 000 DWT 级船舶时,年倒塌概率为 0,但对于非通航孔的桥梁下部结构提高防撞水准至最高等级非常不经济,所以须通过其他途径来降低船撞安全风险。因此综合确定 7#和 8#桥墩船撞水准为 5 000 DWT 级船舶,并可采取其他手段降低船撞倒塌风险。9#和 10#桥墩的年倒塌概率同样不满足船撞风险要求,当提高设计防撞水准至 8 000 DWT 级船舶时,理论上桥梁船撞倒塌概率为 0,满足船撞安全风险要求。

3.3 提高桥梁船撞安全水平的其他措施

采用图 6 中论证得到的设计目标防撞水准后,全桥的船撞年倒塌概率在目前状态下降低了约 17.0 倍,在远期(5 a 和 10 a 后)下降约 14.6 倍,但由于 7#和 8#桥墩的年倒塌概率较大,且自身抗力

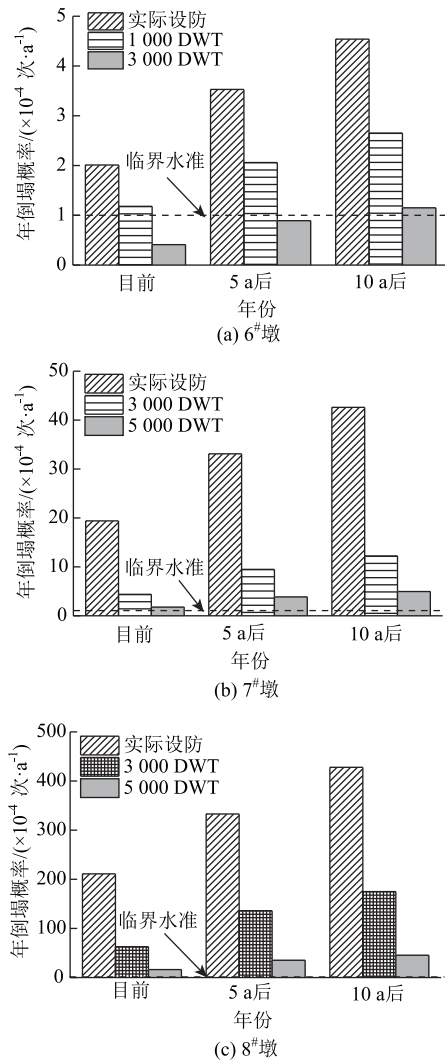


图6 设计目标防撞水准论证

Fig. 6 Demonstration of designed target fortification criterion against vessel collision

较低,导致全桥的船撞失效概率仍未达到临界安全水平(见图7)。针对7#和8#桥墩以上特点,只通过提高结构自身抗力很难满足船撞倒塌风险的要求,因此可通过设置拦截装置,减小船舶撞击频率,降

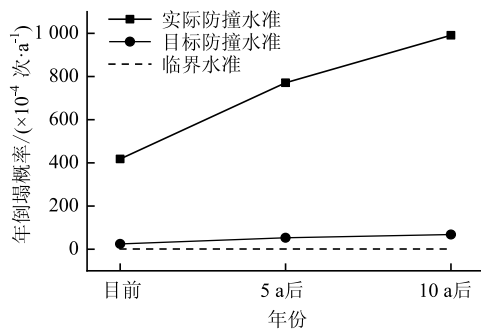


图7 不同防撞水准下桥梁年倒塌概率

Fig. 7 Bridge annual collapse probability under different fortification criteria against vessel collision

低船舶撞击速度继而降低船撞力,来降低桥墩船撞倒塌风险;或可通过在墩身周围设置浮式套箱等缓冲装置^[18],降低船舶碰撞传递至桥墩结构的动力效应,防止严重倒塌事件的发生。同时,本研究中给出的桥梁船撞安全风险论证主要针对桥梁结构在碰撞作用下的整体破坏状态,对于碰撞过程中发生的结构局部损伤,还需要通过精细化动力分析和局部构造措施加以解决,这也是目前船桥碰撞专题研究中需要考虑的重点问题之一。

4 结论

本研究对某跨航道桥梁进行了船撞安全风险分折,并论证得到了桥梁实际防撞水准和满足目标失效概率的设计防撞水准,得出结论如下:

(1) 桥梁船撞安全风险主要由船舶碰撞概率和碰撞后失效概率2方面控制。由于下行船舶的速度较大,桥梁船撞安全风险主要来源于靠近航道下行线且船撞抗力较低的桥墩。

(2) 船撞概率随桥区通航流量成正比例增长,目前流量下桥梁船撞概率为1.98次/a,船撞失效概率为 4.18×10^{-2} 次/a,5 a和10 a后的船撞概率分别增长1.4倍和1.8倍、失效概率分别增长1.8倍和2.4倍,由于船舶流量增长过程中大吨位船舶比例增加,因此桥梁船撞失效概率的增长速率高于船撞概率。

(3) 基于目标失效概率论证的桥梁设计防撞水准相较于传统桥梁防撞水准确定的主观性做法更为合理。采用本研究确定的设计防撞水准后,可使桥梁船撞年失效概率相较于实际设防水准在目前及远期下降约17.0倍和14.6倍,并且可使全桥各涉水桥墩具有相对一致的船撞安全可靠度。

参考文献:

References:

- [1] 王君杰,耿波. 桥梁船撞概率风险评估与措施 [M]. 北京:人民交通出版社,2010.
WANG Jun-jie, GENG Bo. Probabilistic Risk Assessment and Safety Measurements against Bridge-vessel Collisions [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [2] 耿波,王福敏,汪宏. 三峡库区桥梁船撞技术与工程实践 [M]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.
GENG Bo, WANG Fu-min, WANG Hong. Technology and Engineering Practice of Anti-ship Collision Technology for Bridges in Three Gorges Reservoir [M]. Beijing:

- China Communications Press Co., Ltd., 2016.
- [3] 刘占辉, 呼瑞杰, 姚昌荣, 等. 桥梁撞击问题 2019 年度研究进展 [J]. 土木与环境工程学报, 2020, 42 (5): 235-246.
- LIU Zhan-hui, HU Rui-jie, YAO Chang-rong, et al. State-of-the-art Review of Bridge Impact Research in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42 (5): 235-246.
- [4] 项海帆, 范立础, 王君杰. 船撞桥设计理论的现状与需进一步研究的问题 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2002, 30 (4): 386-392.
- XIANG Hai-fan, FAN Li-chu, WANG Jun-jie. State of Art of Ship Collision Design for Bridges and Future Research [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2002, 30 (4): 386-392.
- [5] AASHTO GVCB—2009, Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges [S]. 2nd ed.
- [6] BS EN 1991-1-7, Eurocode 1: Actions on Structures [S].
- [7] WANG J J, WANG W. Estimation of Vessel-bridge Collision Probability for Complex Navigation Channels [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20 (7): 04014091.
- [8] 周枚, 赵威, 温杰, 等. 基于可靠度的桥梁船撞作用荷载组合分项系数 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2018, 38 (6): 155-164.
- ZHOU Mi, ZHAO Wei, WEN Jie, et al. Combined Partial Coefficient of Ship-bridge Collision Loads Based on Reliability [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38 (6): 155-164.
- [9] 王鹏, 油川洲. 某钢箱梁斜拉桥船撞设防标准研究 [J]. 公路交通技术, 2021, 37 (6): 122-127.
- WANG Peng, YOU Chuan-zhou. Study on Ship Collision Protection Standard of a Steel Box Girder Cable-stayed Bridge [J]. Technology of Highway and Transport, 2021, 37 (6): 122-127.
- [10] 罗佳润. 基于风险接受准则的桥墩抗撞承载力需求分析 [J]. 中国水运, 2022 (3): 96-98.
- LUO Jia-run. Demand Analysis of Bridge Pier Crashworthiness Based on Risk Acceptance Criterion [J]. China Water Transport, 2022 (3): 96-98.
- [11] 钱国辉. 既有航道桥梁船舶撞击风险评估及抗撞性能分析 [J]. 中国市政工程, 2022 (1): 99-102, 128, 129.
- QIAN Guo-hui. Risk Assessment of Ship Collision & Analysis of Anti-collision Performance on Existing Waterway Bridges [J]. China Municipal Engineering, 2022 (1): 99-102, 128, 129.
- [12] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范 [S].
- JTG D60—2015, General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts [S].
- [13] JTG/T 3360-02—2020, 公路桥梁抗撞设计规范 [S].
- JTG/T 3360-02—2020, Specifications for Collision Design of Highway Bridges [S].
- [14] 张景峰. 船舶-桥梁碰撞动力分析及船撞作用下桥梁结构可靠度研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- ZHANG Jing-feng. Dynamic Analysis of Vessel-bridge Collision and Reliability of Bridge Structures Subjected to Vessel Collision [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [15] ZHANG J F, CHEN X Z, LIU D J, et al. Analysis of Bridge Response to Barge Collision: Refined Impact Force Models and Some New Insights [J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19 (8): 1224-1244.
- [16] 张景峰, 李小珍, 肖林, 等. 两类船-桥碰撞力差异及桥梁结构响应分析 [J]. 振动与冲击, 2016 (4): 156-161.
- ZHANG Jing-feng, LI Xiao-zhen, XIAO Lin, et al. Differences of Impact Forces for Two Sorts of Vessel-bridge Collisions and Bridge Dynamic Response Analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016 (4): 156-161.
- [17] PEDERSEN P T, VALSGARD S, OLSEN D, et al. Ship Impacts: Bow Collisions [J]. International Journal of Impact Engineering, 1993, 13 (2): 163-187.
- [18] 张景峰, 李小珍. 钢套箱-群桩组合防撞结构防撞性能仿真分析 [J]. 桥梁建设, 2018, 48 (6): 47-52.
- ZHANG Jing-feng, LI Xiao-zhen. Simulation Analysis on Anticollision Property of Steel Fender Box-pile Group Composite Protective Structure [J]. Bridge Construction, 2018, 48 (6): 47-52.