

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201903065

船桥撞击力影响因素有限元仿真模拟分析*

曹明, 张南, 沈强, 代彦辉, 李晓锐

(南京工业大学土木工程学院, 江苏南京 211816)

摘要: 为了探究船桥碰撞时船撞力的影响因素, 选取合适的船撞力为桥梁设计提供参考, 采用动力分析软件 LS-DYNA, 结合沪通长江大桥、天生港专用航道桥以及厦漳大桥三座实桥, 分别进行了不同船速、不同通航水位、不同基础形式和不同船型等因素对船撞力的影响分析研究。研究表明: 船撞力峰值和船速正相关; 中通行水位时, 船桥撞击动力响应最大; 不同桥墩基础和不同船型对船撞力有较大影响。基于中国铁路规范和有限元计算结果, 考虑了船舶类型和基础类型对船撞力的影响, 对船撞力计算公式提出改进方法, 所得研究结果可为桥梁抗撞设计和研究提供参考。

关键词: 船桥碰撞; 撞击力; 影响因素; 有限元仿真; 模拟分析

中图分类号: U447 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0603-09

Finite Element Simulation of Influencing Factors of Ship-bridge Impact Force

CAO Ming, ZHANG Nan, SHEN Qiang, DAI Yanhui, LI Xiaorui

(College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: In order to explore the influencing factors of ship-bridge impact force and adopt an appropriate design impact force of ship-bridge collision, the dynamic analysis software IS-DYNA was used to analyze and study the influence of ship speeds, navigable water levels, foundation forms and ship types on the impact force of ship-bridge collision, respectively, taking the Hutong Yangtze river bridge, special channel bridge of Tiansheng port and Xiazhang bridge as examples. The results show that the peak impact force of ship-bridge collision is positively correlated with the ship speed, and when the navigable water stage is medium, the dynamic response of ship-bridge collision is the greatest; the pier foundation type and ship shape have great influence on the impact force of ship-bridge collision. Based on the Chinese code and simulation results of finite element analyses, the improved calculation method for impact force of ship-bridge collision is proposed by considering ship type and foundation type, which provides the references for the design and research of bridge anti-collision.

Keywords: ship-bridge collision; impact force; influencing factor; finite element simulation; simulation analysis

* 收稿日期: 2019-03-31; 修回日期: 2019-11-09

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划重点课题(2017G004-B)、国家自然科学基金(51278243)资助

作者简介: 曹明(1993—), 男, 硕士研究生。主要从事结构防撞理论及应用研究。E-mail: cm7911336@163.com

通讯作者: 张南(1957—), 男, 教授, 博士。主要从事桥梁结构抗车船撞击研究。E-mail: jiaodazhang@126.com

引言

船桥碰撞问题的系统研究开始于20世纪60年代,虽然在船撞桥事故的统计中,船桥碰撞属于小概率事件,但是随着交通运输的不断发展以及船舶桥梁数量的增多,船桥碰撞事件将会越来越频繁。船舶撞击桥梁往往存在桥梁结构损伤甚至倒塌的风险,从而造成交通运输障碍以及个人生命财产的严重损失,近年来引起了桥梁工程界和交通运输界,以及社会各界的广泛关注。船桥碰撞本质上是复杂的冲击动力学问题,在实际工程和桥梁设计中,如何科学地确定船撞力显得尤为关键,且具有一定难度。目前船撞力大小的选取通常采用规范计算、有限元仿真或者试验实测三种不同的方法。

随着计算机技术的快速发展,有限元方法在研究船桥碰撞问题上得到了越来越广泛的应用。如:刘建成等^[1]通过有限元仿真模拟计算了4万吨球鼻型散货船与某长江大桥碰撞,分析了船撞力、能量

转换响应规律。潘晋等^[2]依据三峡标准散货船的设计图纸建立船舶有限元模型,通过数值模拟计算拟合得到不同吨级和船速下的船桥碰撞力曲线,该曲线可以为桥梁设计中船舶-桥墩碰撞力计算及评估提供参考。美国学者G.R.Consolazio等^[3]利用有限元软件分别模拟了驳船与圆形桥墩和方形桥墩的碰撞,研究结果表明船速、撞击角度、驳船吨位和桩位布置等参数对船桥碰撞响应有重要影响。

目前,美国AASHTO规范、欧洲规范、中国铁路规范和中国公路规范都给出了船撞力的计算公式。但目前的规范公式尚未对通航水位、基础类型和船舶类型等因素的影响考虑进船撞力的计算公式中。因此,本文探讨了通航水位、基础类型和船舶类型等因素对船撞力的影响。

本文选取沪通长江大桥^[4]、天生港专用航道桥^[5]、厦漳大桥^[6]三座实桥,分别代表沉井、低桩和高桩三种不同基础形式,运用数值仿真模拟对船桥碰撞响应的主要影响因素进行了计算分析研究。三座桥梁的总体布置如图1~3所示。

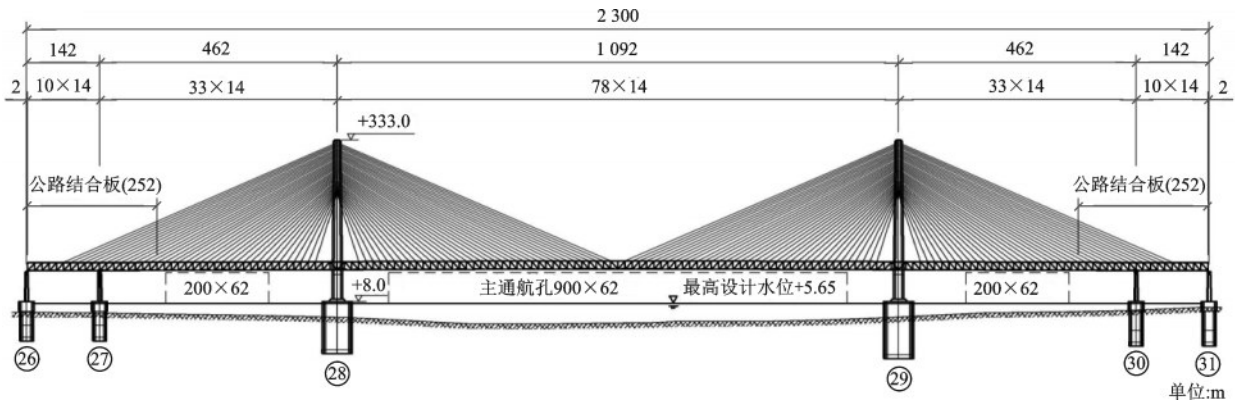


图1 沪通长江大桥

Fig.1 Hutong Changjiang River Bridge

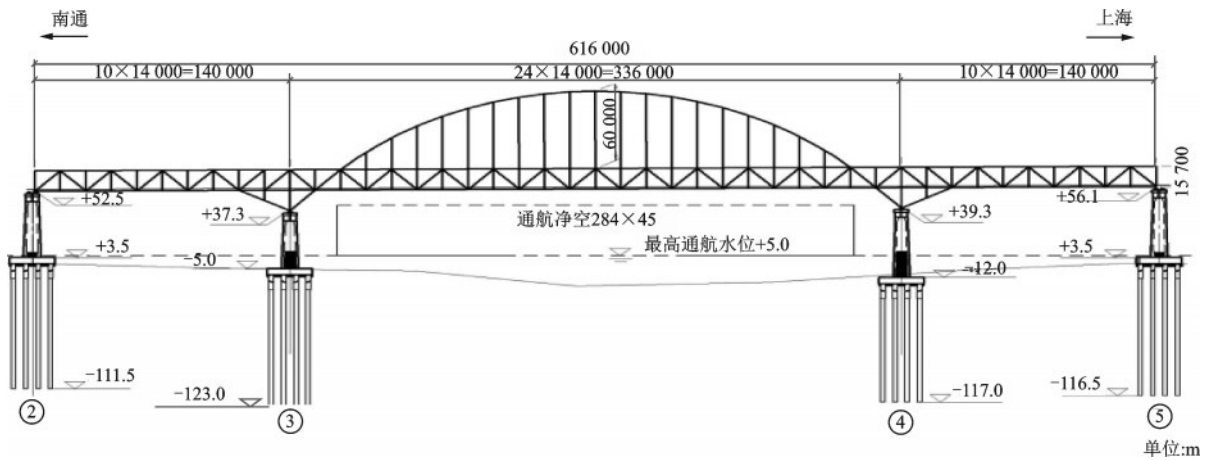


图2 天生港专用航道桥

Fig.2 Special channel bridge of Tiansheng Port

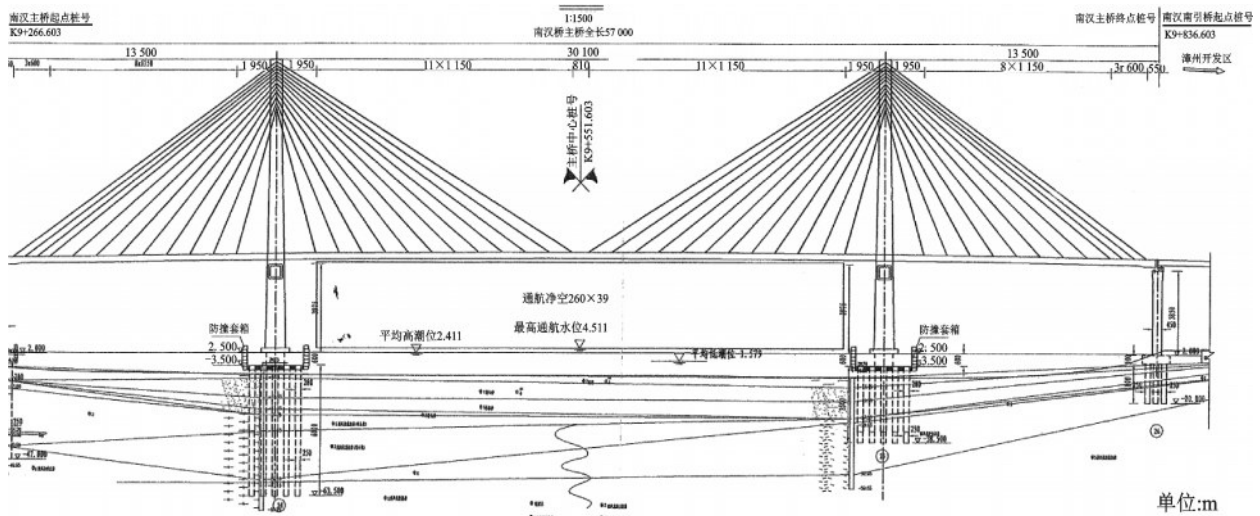


图3 厦漳大桥

Fig.3 Xiamen-Zhangzhou Bridge

1 船撞力计算的规范公式

(1) 美国 AASHTO 规范公式^[7]:

$$P=0.98(DWT)^{1/2}(V/8) \quad (1)$$

式中, P 为撞击力, MN; DWT 为船舶的载重吨位, t; V 为船舶的撞击速度, (m/s)。

AASHTO 规范公式是在船舶正撞刚性墙的基础上提出的, 适用于油轮、货轮、散货船类型的船舶船头正撞桥墩的情况。

(2) 欧洲规范公式^[8]:

$$P=V(KM)^{1/2} \quad (2)$$

式中, V 为碰撞体在撞击时的速度, (m/s); K 为碰撞体的等效刚度, 即船舶的刚度, 对于内陆船舶 $K=5 \text{ MN/m}$, 远洋船舶 $K=15 \text{ MN/m}$; M 为碰撞体的质量, t。

(3) 中国《铁路桥涵设计规范》公式^[9]:

$$P=\gamma V \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{C_1+C_2}} \quad (3)$$

式中, P 为设计船舶撞击力, MN; γ 为动能折减系数, $\text{s/m}^{1/2}$, 正撞和斜撞时 γ 分别取 0.3 和 0.2, 动能折减系数 γ 表明船舶的动能在碰撞过程中只有一部分转化为系统的内能; α 为船舶驶进方向与墩台撞击点处切线所形成的夹角; V 为船舶撞击墩台的速度, (m/s); W 为船舶的重量, MN; C_1 为船舶的弹性变形系数, C_2 为被撞桥梁构件的弹性变形系数, 在无资料时, 《铁路桥涵设计基本规范》^[9] 建议 C_1+C_2 取 0.5 m/MN 。对于刚度较大的桥墩, $C_2 \approx 0$ 。

2 船桥碰撞数值模拟方法与计算模型

2.1 数值模拟方法

动力有限元软件可以精确模拟船桥碰撞过程中各种复杂的材料非线性、接触非线性等问题, 本文主要利用 ANSYS/LS-DYNA 对船桥碰撞问题进行研究。

2.2 船桥计算模型

2.2.1 桥墩结构模型

本文按照实际几何尺寸建立沪通长江大桥 29 号主墩、天生港专用航道 3 号桥墩以及厦漳跨海大桥南汉主桥 25 号桥墩实体模型。阙水杰等^[10]通过数值仿真模拟研究了整桥模型和单墩模型对船撞力的影响, 发现两者差距不大。所以在建模时, 选取单个桥墩简化模型来替代整桥模型, 桥墩的有限元模型如图 4~6 所示。

本文混凝土材料本构模型选用 LS-DYNA 中 96 号弹性损伤模型。

2.2.2 船舶有限元模型

我国内河航道中船舶种类较多, 不同种类的船舶由于用途不同导致其形状和尺寸也有较大差异。本文分别选取内河航道上常见的两类代表性船舶建立有限元模型, 第一类为吃水线较深并具有球形或流线型船艏的散货船, 第二类为装卸速度快, 载重量大具有 v 型船艏的集装箱船。本文采用的船舶尺寸参数见表 1。



图4 沪通长江大桥沉井基础

Fig.4 The sinking foundation of the Hutong Yangtze River Bridge

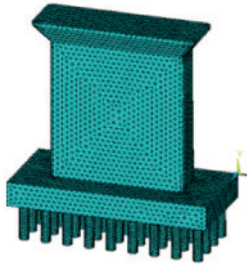


图5 天生港专用航道桥低桩基础

Fig.5 Low pile foundation of the special Channel bridge of Tianshenggang Port



图6 厦漳大桥高桩基础

Fig.6 High-pile foundation of Xiazhang Bridge

表1 船舶尺寸参数

Table 1 Ship size parameters

船舶类型	船舶重量/t	总长/m	船宽/m	型深/m	满载吃水/m	船舶形式	满载排水量/t
散货船	5 000	92.2	13.58	7.3	5.8	球鼻形	7 500
散货船	10 000	136	21	11.1	8.4	球鼻形	15 000
集装箱船	5 000	105	19.5	9.2	6.9	v型艏	7 500

在船桥碰撞过程中,船艏是碰撞损伤的主要区域,碰撞时船艏部位的应变速率会对撞击力以及变

形产生较大影响,故船艏部分采用塑形随动本构模型。而船体中后部由于远离碰撞区只提供质量支持,因此船体中后部采用刚性体模型^[11],这样可以节省计算时间,提高计算效率。

有限元网格划分的粗细程度对计算精度有重要影响,船艏外部钢板和内部的纵横隔板采用shell163壳单元。为了获得较为真实的计算结果,本文对船艏采用较为精细的网格划分,船艏网格划分的单元尺寸为0.3 m。由于在整个船桥碰撞过程中,只有船艏与桥墩发生碰撞接触,船体中后部未与桥墩发生接触,为提高工作效率,船体中后部进行网格划分时,单元尺寸控制在0.8 m左右。

本文船舶与桥墩的动摩擦系数和静摩擦系数都取0.3。根据划分网格单元的尺寸,取材料最大的塑性失效应变为0.34,剪切模量为500 MPa,应变率参数 $C=40.1, P=5$,满载时整船的质量主要通过加大船尾钢板的密度来满足。散货船和集装箱船的有限元模型如图7和图8所示。

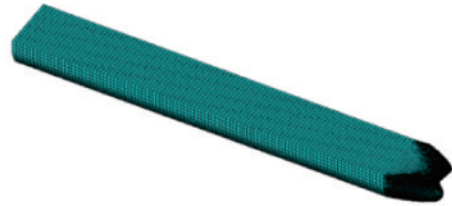


图7 散货船有限元模型

Fig.7 Finite element model of the bulk carrier

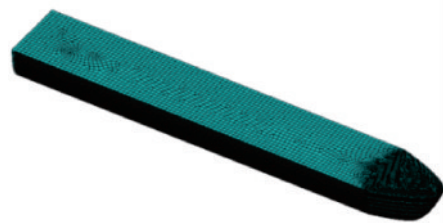


图8 集装箱船有限元模型

Fig.8 Finite element model of the container ship

3 船桥撞击力影响因素分析

本文采用数值仿真模拟计算,分别研究了在不同船速、通航水位、桥墩基础形式和船型等因素下船桥碰撞响应之间的差异,分析这些因素与碰撞峰值力之间的关系,为实际工程设计提供参考依据。

3.1 不同船速对船撞力的影响分析

船舶撞击速度是影响船桥碰撞响应的一个重要因素,本文采用5 000 t级集装箱船(图8)分别以不同的船速2、3、4 m/s正向撞击天生港辅助航道桥墩(图5),得到撞击力时程曲线如图9所示。

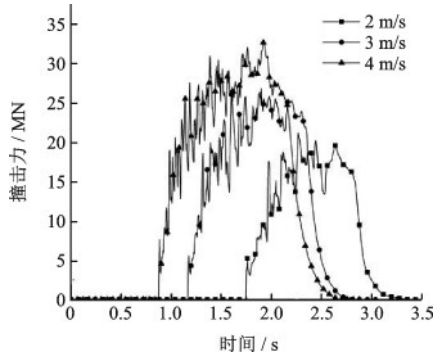


图9 不同船速下撞击力时程曲线对比

Fig.9 Comparison of time history curves of impact force at different ship speeds

将有限元仿真计算结果与规范公式的计算结果作对比,见表2。从表2可以看出,美国规范计算结果最大,中国铁路规范计算结果最小。在不同船速下,有限元仿真计算结果与美国规范的计算结果较为接近,而与中国铁路规范计算结果相差较大。这些规范的计算公式均考虑了船速对撞击力的影响,且都认为撞击力与船速成正比。

3.2 通航水位对船撞力的影响分析

本文采用10 000 t级散货船,分别在高水位、中

表2 计算结果比较

Table 2 Comparison of calculation results

船速/(m·s ⁻¹)	计算方法	峰值力/MN
2	有限元仿真	21.16
	美国规范	17.33
	中国铁路规范	7.49
	欧洲规范	12.49
3	有限元仿真	26.81
	美国规范	26.00
	中国铁路规范	11.24
	欧洲规范	18.74
4	有限元仿真	32.69
	美国规范	34.65
	中国铁路规范	14.98
	欧洲规范	24.98

水位和低水位时与厦漳南汉主桥25号桥墩(图6)进行船撞有限元分析,船舶速度均采用4 m/s。

不同通航水位下由于船舶的撞击位置不同,船舶的破坏形态有着明显差异,中通航水位下船舶破坏最为严重。图10和图11是不同通航水位下的撞击力时程曲线和承台位移曲线,计算结果见表3。通过对撞击力和承台位移时程曲线的分析,发现在三种通航水位下船舶撞击力时程变化趋势基本相同,但最大撞击力和最大承台位移相差较大。

计算结果表明:当船舶处于中通航水位时,船桥的碰撞接触面最大,桥墩的整体动力响应也最大,即撞击力和承台位移达到最大值。因此,当船舶处于中通航水位时,船舶撞击桥墩产生的危害是最大的,在计算桥墩防撞设计时,应充分考虑工程实际通航水位的变化对桥墩撞击力的影响。

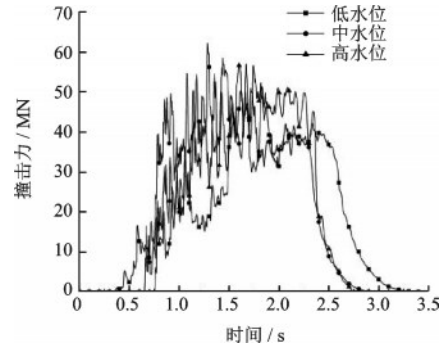


图10 撞击力时程曲线

Fig.10 Time history curves of the impact force

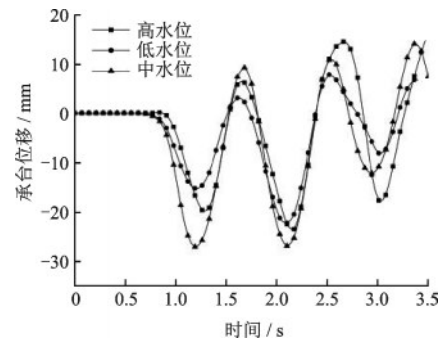


图11 承台位移曲线

Fig.11 Capsule displacement curves

表3 计算结果比较

Table 3 Comparison of calculation results

通航水位	撞击力峰值/MN	承台位移峰值/mm
高水位	56.69	23.6
中水位	62.09	26.9
低水位	56.93	22.2

3.3 桥墩基础类型对船撞力的影响分析

本文选取实际工程中的高桩基础(图6 厦漳大桥)、低桩基础(图5天生港专用航道桥)和沉井基础(图4沪通长江大桥),用以分析不同基础形式对撞击力的影响。以散货船舶(图7)5 000 t级为例,采用船速4 m/s,对这三种不同基础类型下船桥撞击进行有限元分析,计算结果如图12~13和表4所示。

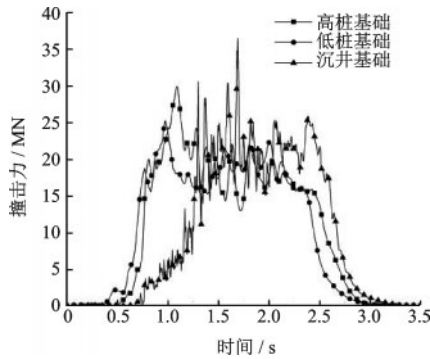


图12 撞击力时程曲线

Fig.12 Time history curves of the impact force

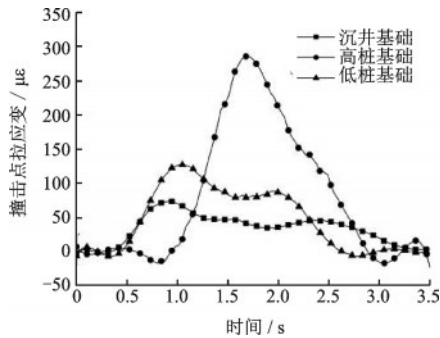


图13 撞击点拉应变比较

Fig.13 Comparison of tensile strains at the impact point

表4 计算结果比较

Table 4 Comparison of calculation results

计算方法	撞击力峰值/MN	拉应变峰值/ $\mu\epsilon$
高桩基础	31.27	302.12
低桩基础	25.62	124.30
沉井基础	36.41	75.63
美国规范	34.65	—
中国铁路规范	14.98	—
欧洲规范	24.98	—

由图12撞击力时程曲线可知,沉井基础和桩基础的船撞力相对较大,低桩基础最小。从撞击力来看,低桩的船撞力分别比沉井和高桩低29.6%和

18.1%。从图13撞击点混凝土拉应变曲线可以看出,沉井基础的混凝土拉应变小于桩基础,分别是高桩基础的25%和低桩基础的60.8%,从桥墩撞击点的动力响应上看,沉井基础比桩基础小。

对于沉井基础和桩基础,沉井基础埋置深度较大,其底部约束较强,可看作完全固结,船桥碰撞时,沉井基础基本不发生侧移。而桩基础底部约束相对较弱,在撞击荷载较大时,有一定程度侧移,根据功能互等原理,在船舶初始动量相同的情况下,位移大,撞击力小,这导致桩基础的撞击峰值力小于沉井基础的撞击峰值力。

通过与规范计算结果的对比(表4),发现高桩和沉井基础桥墩的计算结果与美国规范较为接近,低桩基础桥墩的计算结果与欧洲规范较为接近。建议高桩和沉井基础桥墩的撞击力计算参考美国规范计算公式,低桩基础桥墩撞击力计算参考欧洲规范。根据本文计算结果表明,基础类型对船撞力影响较大。因此,计算船撞力时要考虑基础类型的影响。

3.4 不同船型对船撞力的影响分析

由于不同船型的船舶形态及内部构造差别较大^[12],在船撞过程中碰撞力和变形模式也必定存在差异。目前,对于航道中的不同船舶,关于探讨其撞击作用的不同以及桥梁结构响应差异的研究较少。本文选取出现频率较高的两类代表性船舶进行研究,第一类为吃水线较深并具有球形或者流线型船艏的散货船(图7),第二类为装卸速度快,载重大并具有V型船艏的集装箱船(图8)。

本文建立了集装箱船和散货船两类船型实体模型,采用吨位5 000 t级,以船速4 m/s撞击天生港专用航道桥墩(图5),得到不同船型撞击力时程曲线如图14所示,计算结果见表5。由计算结果可知,两类代表船型由于船艏刚度不同,造成了船撞力存在较大差异。集装箱船出现撞击力峰值的时间要

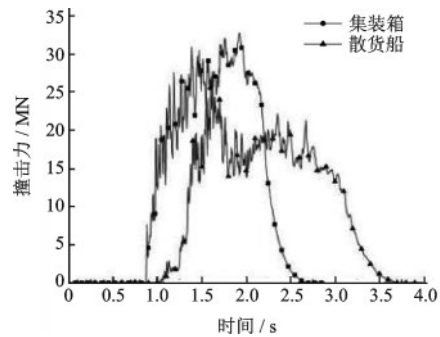


图14 不同船型撞击力时程曲线

Fig.14 Time history curves of impact forces of different ship types

稍晚于散货船,并且整个撞击时长相对较短。在时程曲线的发展上,散货船撞击力存在相对平缓的屈服平台,而集装箱船在达到最大峰值力之后便开始迅速归为零点,这主要是两类船型船艏的构造差异造成的。集装箱船船艏为前倾壁式结构,撞击力主要靠甲板和纵横舱壁承担。而散货船的抗力构件主要由球鼻、甲板、纵横舱壁和加劲板件组成,随着撞击过程的进行,参与碰撞的构件逐渐增多。因此,散货船撞击力时程曲线存在一个平缓的屈服平台,撞击时长也相对较长。

将两类船型撞击有限元计算结果与美国规范、欧洲规范和中国铁路规范计算结果作对比(表5)。由计算结果可知,本文的集装箱船仿真计算结果和美国规范计算结果较为接近,本文的散货船仿真计算结果和欧洲规范计算结果较为接近。建议在计算船撞力时,对于集装箱船和散货船,可分别参考美国规范和欧洲规范。中国铁路规范的船撞力计算公式的计算结果偏小,有必要进行合理改进。

表5 撞击峰值力计算结果比较

Table 5 Comparison of calculation results of peak impact force

计算方法	吨位/t	船速/(m·s ⁻¹)	撞击峰值力/MN
集装箱船	5 000	4	32.69
散货船	5 000	4	25.62
美国规范	5 000	4	34.65
中国铁路规范	5 000	4	14.98
欧洲规范	5 000	4	24.98

4 基于中国铁路规范船撞力计算公式的改进

由本文3.3节和3.4节的计算结果可知,桥墩基础类型和不同船型对船撞力的计算值有较大影响。因此,在船撞力计算公式中应考虑这两类因素对船撞力的影响。本文在中国铁路规范计算船撞力公式的基础上,考虑基础类型和船舶类型对船撞力的影响,对船撞力计算公式提出改进方法。

4.1 考虑船舶类型对船撞力的影响

本文以5 000 t级集装箱船和散货船为例,应用有限元动力分析软件,计算了在2、3、4 m/s的不同船速下正面撞击天生港辅助航道桥,得到的计算结果见表6。

结合不同船型计算结果和中国铁路规范计算公式,将不同船型计算的船撞力结果代入中国铁路规范公式。正撞时 γ 取0.3,撞击角 α 取90°,计算得到不同船型的船舶弹性变形系数 C 见表6。中国铁路规范在考虑船舶和桥墩的弹性系数时将 C_1+C_2 取为0.5 m/MN,在实际情况中桥和船舶的种类存在差别,即桥与船舶的刚度不是固定值。桥墩的刚度大小与船艏不在一个数量级,一般为船艏刚度几十倍,在船桥碰撞中,桥墩吸收的能量很小,变形一般可以忽略,所以桥墩的弹性变形系数可以取为0^[13]。船撞力的大小主要由船艏决定。由于桥墩弹性变形系数 $C_2 \approx 0$,故此结果是对船艏弹性变形系数 C_1 的修正,是在中国铁路规范计算船撞力公式的基础上,考虑了不同船型对船撞力的影响。

表6 不同船型弹性变形系数计算结果

Table 6 Calculation results of elastic deformation coefficients of different ship types

船型	船速/(m·s ⁻¹)	峰值力/MN	弹性系数 C /(m·MN ⁻¹)	平均值/(m·MN ⁻¹)
集装箱	2	21.16	0.063	0.085
	3	26.81	0.088	
	4	32.69	0.105	
散货船	2	18.73	0.08	0.120
	3	23.87	0.11	
	4	25.62	0.17	

4.2 考虑基础类型对船撞力的影响

本文以5 000 t级散货船为例,进行了散货船分别在2、3、4 m/s的船速下,撞击不同类型基础的数值模拟分析,取散货船的弹性系数为表6中的0.120。得到的动力数值分析结果见表7。

由表7可见,沉井基础比桩基础的撞击力大。结合表7计算结果,建议在中国铁路规范计算撞击力公式的基础上乘以一个基础类型差异放大系数 R ,该系数可依据基础类型取不同数值。

由表7所示的计算结果,建议在此条件下,沉井基础的放大系数 R 取1.35,低桩基础的放大系数 R 取1.05,高桩基础的放大系数 R 取1.25。

以5 000 t级散货船为例,船速4 m/s,计算了美国规范、欧洲规范和中国铁路规范,以及本文船撞力改进计算方法所计算的船撞力。

美国AASHTO规范公式:

$$P=0.98(DWT)^{1/2}(V/8) \quad (1)$$

表7 不同基础类型差异放大系数计算结果

Table 7 Calculation results of difference amplification factors of different foundation types

基础类型	船速/ (m·s ⁻¹)	峰值力/ MN	放大系数 R	R 平均值
沉井	2	22.05	1.44	1.343
	3	32.11	1.40	
	4	36.41	1.19	
低桩	2	18.73	1.22	1.033
	3	23.87	1.04	
	4	25.62	0.84	
高桩	2	21.64	1.41	1.200
	3	26.93	1.17	
	4	31.27	1.02	

欧洲规范公式:

$$P=V(KM)^{1/2} \quad (2)$$

中国《铁路桥涵设计规范》公式:

$$P=\gamma V\text{Sin}\alpha\sqrt{\frac{W}{C_1+C_2}} \quad (3)$$

本文船撞力改进计算方法:

$$P=R\gamma V\text{Sin}\alpha\sqrt{\frac{W}{C}} \quad (4)$$

式中,C为船舶和桥墩弹性系数之和(表6);R为基础类型差异放大系数(表7)。

上述四种方法的计算结果见表8。

如表8所示,中国铁路规范计算的船撞力相比美国规范和欧洲规范的计算值偏小,本文有限元计算结果与美国规范和欧洲规范计算值相近。本文改进计算方法的计算值接近美国规范和欧洲规范的计算结果,与有限元计算结果也接近。这表明,本文提出的船撞力改进计算方法和计算结果比较合理。

本文提出的船撞力改进计算方法,可适用于计

表8 不同基础类型船撞力计算结果

Table 8 Calculation results of ship collision forces for different foundation types

基础类型	各规范的计算船撞力			有限元 计算值	本文改进 计算值
	美国 规范	中国铁 路规范	欧洲 规范		
沉井	34.65	14.98	24.98	36.41	41.30
低桩	34.65	14.98	24.98	25.62	32.12
高桩	34.65	14.98	24.98	31.27	38.24

单位:MN

算5 000 t级船桥撞击力。对于其它条件下的船撞力计算,还需要做大量的有限元计算分析和试验研究,这将在今后研究工作中进一步开展。

5 结 论

(1)船撞力峰值与船速存在正相关,撞击时间随着船速的增大而增大。

(2)当船舶处于中通航水位时,船桥碰撞接触面最大,船桥撞击的动力响应也最大。

(3)通过有限元计算结果与规范公式计算结果的对比,三种桥墩基础情况下的船桥撞击力峰值均有差异。因此,计算撞击力要考虑基础类型的影响。

(4)通过有限元计算相同吨位级的两种船型,撞击天生港辅助航道桥,得到的撞击力有所不同。因此,计算船桥撞击力要考虑船舶类型的影响。

(5)以5 000 t级船舶为例,考虑了船舶类型和基础类型对船撞力的影响,对船撞力计算公式提出了改进方法。提出的船撞力改进计算方法与有限元计算结果以及美国规范和欧洲规范计算结果较为接近,可为完善撞击力计算公式提供参考。对于其它条件下的船撞力计算,还需要做大量的研究工作。

参考文献:

- [1] 刘建成,顾永宁,胡志强.桥墩在船桥碰撞中的响应及损伤分析[J].公路,2002(10):33-41.
Liu J Ch,Gu Y N,Hu Zh Q.Response and damage analysis of piers in bridge collision[J].Highway,2002(10):33-41.(in Chinese)
- [2] 潘晋,姜伟,许明财.散货船与桥墩碰撞力的经验公式与数值模拟对比研究[J].振动与冲击,2012,31(19):123-127.
Pan J,Jiang W,Xu M C.Comparative study on empirical formula and numerical simulation of collision force between bulk carrier and bridge pier [J].Vibration and Shock,2012,31(19):123-127.(in Chinese)
- [3] Consolazio G R,Cowan D R.Nonlinear analysis of barge crush behavior and its relationship to impact resistant bridge design[J].Computers & Structures,2003,81(8-11):547-557.
- [4] 高宗余,梅新咏,徐伟.沪通长江大桥总体设计[J].桥梁建设,2015,45(6):1-6.

- Gao Z Y, Mei X Y, Xu W. Overall design of Hutong Yangtze River Bridge[J]. Bridge Construction, 2015, 45(6): 1-6. (in Chinese)
- [5] 侯健, 彭振华, 张燕飞. 沪通长江大桥天生港专用航道桥设计[J]. 桥梁建设, 2015, 45(6):53-57.
Hou J, Peng Zh H, Zhang Y F. Design of special channel bridge for Tiansheng Port of Hutong Yangtze River Bridge[J]. Bridge Construction, 2015, 45(6): 53-57. (in Chinese)
- [6] 田文民, 王江波, 冯云成. 厦漳跨海大桥南汉主桥桥塔设计[J]. 桥梁建设, 2013, 43(4):33-38.
Tian W M, Wang J B, Feng Y Ch. Design of the main tower bridge of Nanxun Bridge of Xiamen-Zhangzhou Bridge[J]. Bridge construction, 2013, 43(4): 33-38. (in Chinese)
- [7] AASHTO. LRFD bridge design specification and commentary [S]. Washington D. C: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [8] Vrouwenvelder ACWM. Design for ship impact according to Eurocode 1, Part 2.7: ship collision analysis[M]. London: CRC Press, 1998.
- [9] 铁路桥涵设计规范: TB10002—2017 [S]. 北京: 国家铁路局, 2017.
Design code for railway bridges and culverts: TB10002—2017 [S]. Beijing: National Railway Administration, 2017. (in Chinese)
- [10] 阙水杰, 张南, 樊文才. 桥梁遭受船舶撞击的有限元仿真分析[J]. 交通信息与安全, 2010, 28(1):130-134.
- Que Sh J, Zhang N, Fan W C. Finite element simulation analysis of bridge impacted by ship impact[J]. Traffic Information and Security, 2010, 28(1): 130-134. (in Chinese)
- [11] 王自力, 蒋志勇, 顾永宁. 船舶碰撞数值仿真的附加质量模型[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(4):321-326.
Wang Z L, Jiang Zh Y, Gu Y N. Additional quality model for numerical simulation of ship collision [J]. Explosion and Shock, 2002, 22(4): 321-326. (in Chinese)
- [12] 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, 35(4): 156-161.
Zhang J F, Li X Zh, Xiao L, et al. Analysis of collision force difference bridge response of two types of ship-bridge [J]. Vibration and Shock, 2016, 35(4): 156-161. (in Chinese)
- [13] 陈国虞. 有防撞装置时计算船撞桥的力——铁路桥梁规范中船撞力公式的延伸修订[J]. 铁道标准设计, 2004(1):47-49.
Chen G Y, Calculate the force of the ship hitting the bridge when there is an anti-collision device——Extension and revision of ship collision formula in railway bridge specification [J]. Railway Standard Design, 2004 (1):47-49. (in Chinese)

(本文责编:池营营)