

大跨梁-拱组合刚构桥船撞力和抗撞性能研究

张文明¹, 王志伟¹, 赖亚平²

(1.东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189; 2.林同棣国际工程咨询(中国)有限公司, 重庆市 401121)

摘要:梁-拱组合刚构桥是一种新桥型, 船撞研究较少。该文以礼嘉嘉陵江大桥为工程背景, 研究大跨度上承式梁-拱组合刚构桥梁的船撞力标准值和抗撞性能。首先确立了代表船型和船撞计算工况, 利用ANSYS/LS-DYNA非线性有限元瞬态动力软件模拟了单墩模型在各工况下船桥碰撞过程, 并对比了船撞力有限元仿真结果与多种经验公式计算结果。最后利用全桥模型和验算截面的极限承载力反推得到桥墩的极限抗船撞力, 对桥墩的抗撞性能进行了评估。结果表明: 船撞力具有很强的非线性波动特征, 船艏最大撞深发生时刻滞后于最大撞击力发生时刻, 船桥碰撞过程中的系统能量主要是由船舶动能转化为船艏局部变形内能; 不同的船撞力经验公式的计算结果相差较大, 推荐采用动力仿真模拟值; 极限抗船撞力验算结果表明礼嘉嘉陵江大桥主墩的抗撞性能满足要求。

关键词:梁-拱组合刚构; 船桥碰撞; 船撞力; 抗撞性能; 有限元法; 经验公式

中图分类号: U447

文献标志码: A

Vessel Collision Force and Anti-Collision Performance of Long-Span Beam-Arch Composite Rigid Frame Bridge

ZHANG Wenming¹, WANG Zhiwei¹, LAI Yaping²

(1.School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China; 2.T. Y. Lin International Engineering Consulting (China) Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Abstract: Beam-arch composite rigid frame bridge is a new bridge type, and it has few vessel collision studies. By taking the Lijia Jialing River Bridge as the engineering background, the standard value of vessel collision force and anti-collision performance of the long-span beam-arch composite rigid frame bridge were studied. After determining the representative vessel type and vessel collision calculation conditions, the vessel-bridge collision processes of the single-pier models under various calculation scenarios were simulated by using ANSYS/LS-DYNA nonlinear finite element transient dynamic software. The simulation results of collision forces were compared with the results of several empirical formulas. Finally, the full bridge model and the ultimate bearing capacity of the checked section were used, and the ultimate anti-collision force of the piers was obtained. Then, the anti-collision performance of the pier was evaluated. The results show that the vessel collision forces have a strong nonlinear fluctuation feature; the time when the maximum collision depth occurs lags behind the time when the maximum collision force occurs; the system energy during the vessel-bridge collision is mainly converted from the vessel kinetic energy to the internal energy of the local deformation of the bow. The results of different empirical formulas of vessel collision force vary greatly, and the dynamic simulation values are recommended. The checking results of the ultimate anti-collision force show that the anti-collision performance of the main piers of the Lijia Jialing River Bridge meets the requirements.

Keywords: beam-arch composite rigid frame; vessel-bridge collision; vessel collision force; anti-collision performance; finite element method; empirical formula

收稿日期: 2023-05-12(修改稿)

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2022YFB3706703); 国家自然科学基金资助项目(编号: 52078134, 52378138)

作者简介: 张文明, 男, 博士, 教授. E-mail: zwm@seu.edu.cn

0 引言

随着水上交通运输业的发展,船桥碰撞事故的发生率逐年上升。船桥碰撞事故,不仅可能直接造成桥梁坍塌和人员伤亡,还可能间接导致水路运输受阻及环境污染等问题。因此,对桥梁船撞问题的研究日益迫切。由于船舶的大质量(千吨级)、大尺度(数十米)和大动能(兆级)特性,船桥相撞是一个毫秒到秒量级的短时历程,也是一个包含着巨大能量交换的动态过程。因此,船撞桥本质上是一个复杂的冲击动力学问题^[1-3]。

为保证桥梁的安全可靠,有必要科学地确定船撞力标准值并对桥梁抗撞性能进行评估。船舶撞击力的计算方法多样,实际工程应用最多的是经验公式法。中国主流的船撞力经验公式有《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020)^[4]、《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[5]以及《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)^[6]提供的计算公式;美国 AASHTO 规范^[7]、欧洲 Eurocode^[8]以及国际桥梁及结构工程协会(IABSE)^[9]也提出了相应的公式。对于较为重要的桥梁,一般需要对桥梁抗撞性能进行专项研究。王贵春等^[10]以南京长江三桥北主墩为案例,采用 Ansys 有限元软件研究了桩土作用对船舶撞击力的影响,同时将有限元计算结果与多种经验公式进行了对比;罗赞^[11]通过模型试验研究了一座大跨度预应力混凝土变截面连续箱梁桥在多种影响因素下的船撞动力响应;郭健等^[12]以金塘大桥非通航孔段连续梁桥为工程背景,通过有限元方法和缩尺模型试验开展船撞流固耦合分析,探究了水流对船撞力的影响;朱俊羽等^[13]以遭遇船撞后的某桥为研究对象,从墩顶位移和桥墩抗力方面评估了被撞

桥墩的安全性能。然而,现有文献对大跨度上承式梁-拱组合刚构桥梁的船撞力标准值和抗撞性能的相关研究较少。

在船桥碰撞的动力分析方法研究方面,王君杰等^[14]和陈诚等^[15]基于船桥碰撞动力数值模拟结果的统计分析,给出了桥梁等效静船撞力的经验公式,并给出了考虑桥墩几何因素的修正公式;张文明等^[16]基于 ANSYS/LS-DYNA 软件讨论了船桥碰撞过程中撞击力、撞击响应以及系统能量转换的规律和特点;王君杰等^[17]通过有限元动力分析获得了81条船撞击力-撞深过程样本曲线,并基于此建立了撞击力-撞深关系概率模型;宋彦臣等^[18]利用数值仿真获得的撞击力时程样本提出一种碰撞简化荷载模型,即采用修正半波正弦函数近似描述撞击力过程;樊伟等^[19]总结形成了利用质点碰撞法进行高桩承台桥梁船撞简化动力时程分析的一般性程序。然而,上述文献缺少对大跨度上承式梁-拱组合刚构桥梁的船桥碰撞动力分析方法研究。本文提出了一套船桥碰撞简化动力分析方法,通过结合全桥杆系模型将船-桥碰撞分析简化为船-墩碰撞分析,提高了计算分析效率。

本文以重庆礼嘉嘉陵江大桥为工程背景,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立船桥碰撞动力分析模型,探究大跨度上承式梁-拱组合刚构桥的船撞力标准值确定方法和抗撞性能分析方法。

1 工程背景

礼嘉嘉陵江大桥跨越重庆嘉陵江礼嘉河段,采用“空腹式连续刚构+变截面连续梁”组合结构形式(图1),跨径布置为(140+245+190+130+80)m。主桥桥面分两幅布置,单幅标准段桥宽18.0m。大桥最高通航水位194.24m(黄海高程系),最低通航水位

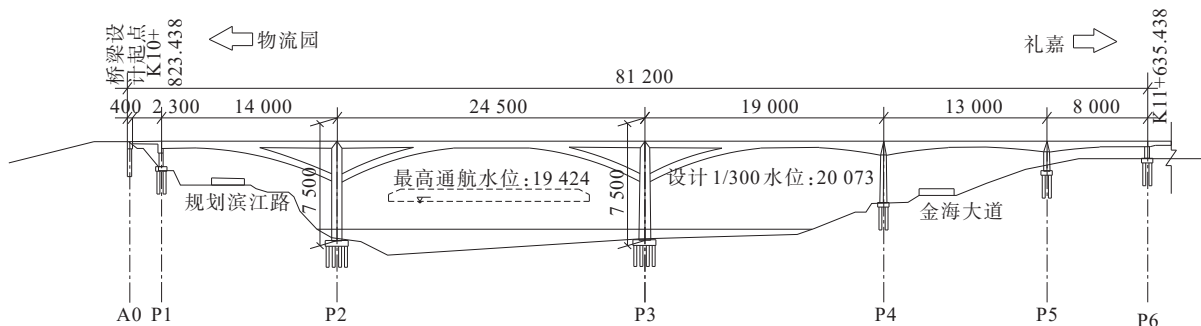


图1 礼嘉嘉陵江大桥立面图(单位:cm)

Figure 1 Elevation of Lijia Jialing River Bridge (unit: cm)

179.50 m。主桥桥墩自物流园侧到礼嘉侧依次编号为P1~P6。P2、P3和P4墩均与主梁固结,P1、P5和P6墩处设置纵向滑动支座。大桥主墩P2和P3墩涉水,存在船撞风险。

大桥主墩P2和P3采用六边形截面形式,横桥向宽度为11.0 m,顺桥向宽度在桥墩上部34.5 m范围内为7.0 m,在桥墩下部40.5 m范围内由7.0 m线性变化至9.0 m。各墩基础均采用桩基础加承台的形式。P2和P3桥墩桩基直径为2.5 m,平面布置为4×3根,桩基在横桥向和顺桥向的布置间距均为5.0 m。

2 代表船型与计算工况

依据嘉陵江航道内目前在航船舶以及未来通航

船舶规划,选取船舶载重吨位(DWT)分别为500 t、1 000 t和3 000 t的机动驳船作为代表船型,对应的船舶尺度见表1。以1 000 t级船舶为例,图2展示了其基本构造图。根据桥梁各构件高程与通航水位以及船舶吃水深度之间的关系,通过船桥相遇分析,可以确定船舶可能撞击部位为主墩P2和P3墩的墩身,不会撞击主梁、承台和桩基。

表1 代表船型的尺度参数

Table 1 Parameters for representative vessel type

载重吨位/t	总长/m	型宽/m	吃水/m
500	52.43	8.2	2.5
1 000	65.50	10.8	2.8
3 000	86.80	16.2	3.6

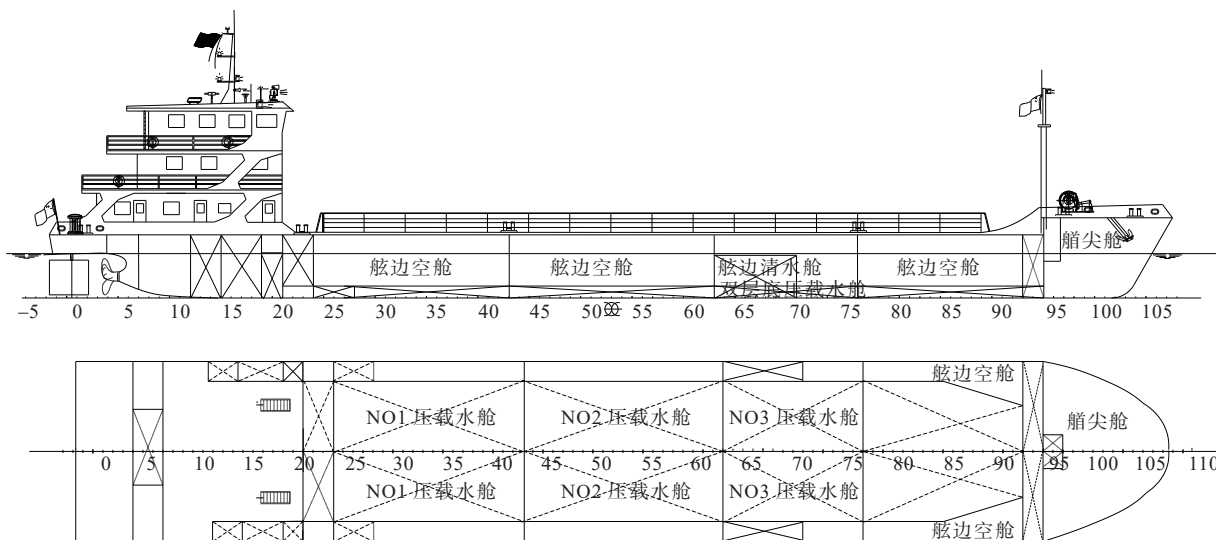


图2 1 000 t级船舶示意图

Figure 2 Vessel with 1 000 t

P2和P3墩的承台顶面高程均为166.81 m。依据通航水位和船舶吃水情况,可获得船舶撞击点的位置。根据水流速度以及船舶在航道内的正常行驶速度,可以确定撞击速度(图3),具体由式(1)表达^[4]:

$$V = \begin{cases} V_T, & X \leq X_C \\ \frac{X_L V_{\min} - X_C V_{\min} - X(V_T - V_{\min})}{X_L - X_C}, & X_C < X \leq X_L \\ V_{\min}, & X > X_L \end{cases} \quad (1)$$

式中:V为设计船舶撞击速度; V_T 为船舶在航道内的正常行驶速度; V_{\min} 为船舶最小设计撞击速度,可由所在水域的多年平均流速确定;X为桥墩中心线至航道中心线的距离; X_C 为航道中心线至航道边缘的距离; X_L 为航道中心线至3倍船长处的距离。

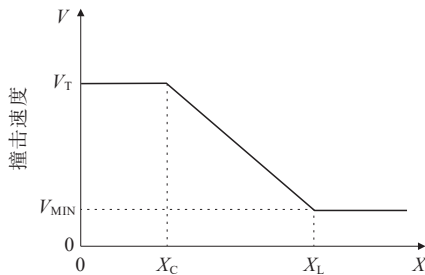


图3 船舶设计撞击速度曲线

Figure 3 Designed vessel collision velocity curve

不同通航水位对应不同的撞击速度。在最低通航水位(枯水期),嘉陵江航道船舶正常航度为4 m/s,航道中心流速为1 m/s;在最高通航水位(丰水期),船舶正常航度为6.5 m/s,航道中心流速为2.5 m/s。

根据式(1),两种水位对应的撞击速度分别为4.0 m/s和6.5 m/s。船舶最大侧撞角为风流压偏角和桥法线偏角之和。礼嘉嘉陵江大桥桥法线偏角为 5° ,风流压偏角可根据横向水流速度(0.3 m/s)和船舶航速进行确定,如下式所示:

$$\alpha_{\text{风流压偏角}} = \arctan(v_{\text{横向流速}}/v_{\text{航速}}) \quad (2)$$

根据3种代表船型、两种水位(即最高和最低通航水位)以及两种撞击角度(即正撞和侧撞,用船舶纵轴线与横桥向夹角表示),共组合出12种计算工况,如表2所示。

表2 P2和P3墩的船撞计算工况

Table 2 Calculation scenarios for vessel collision of piers

P2 and P3					
船型/ t	通航 水位	撞击点距 墩底高度/m	撞击速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	撞击偏角/ ($^{\circ}$)	工况 编号
500	最低	14.69	4.0	0	1
				10	2
	最高	29.43	6.5	0	3
				8	4
1 000	最低	14.83	4.0	0	5
				10	6
	最高	29.57	6.5	0	7
				8	8
3 000	最低	16.29	4.0	0	9
				10	10
	最高	31.03	6.5	0	11
				8	12

3 有限元模型建立

3.1 桥梁结构建模

3.1.1 桥墩模型

采用ANSYS/LS-DYNA非线性有限元瞬态动力软件模拟船舶碰撞过程。本桥存在船撞风险的桥墩为主墩P2、P3,为增加计算效率,采用单墩模型进行船舶碰撞动力计算,即只对桥墩墩身采用实体单元进行建模,如图4所示。P2和P3墩的构造形式完全相同,故只需建立一个桥墩模型。桥墩底部偏安全地采用固结约束(计算得到的船撞力偏大)。为了使桥墩顶端的受力及约束状态接近全桥模型,墩顶采用弹性约束,模拟桥梁上部结构对桥墩的约束作用。由于船舶碰撞时上部结构会产生加速度和动能,因此在墩顶设置附加质量单元来模拟上部结构

的质量和压力作用。

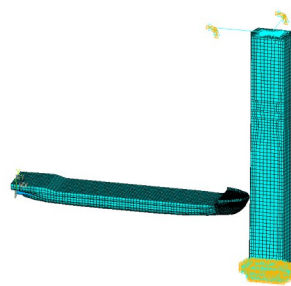


图4 船桥碰撞有限元计算模型

Figure 4 Finite element calculation model of vessel-bridge collision

本文利用Midas Civil建立的全桥模型来获得墩顶弹性约束刚度和附加质量单元的质量大小。墩顶弹性约束刚度通过等位移原则进行确定,即在相同作用力下,施加弹性约束的单墩模型和全桥模型具有相同的墩顶位移。在全桥Midas模型中,在桥墩撞击点位置处施加1 MN的斜向集中力(与横桥向夹角为 10°),可以得到墩顶横桥向位移(0.033 mm)和纵桥向位移(0.577 mm)。同理,在单墩Midas模型上施加相同的斜向集中力,亦可得到相应的墩顶横桥向位移(0.167 mm)和纵桥向位移(0.622 mm)。利用全桥模型和单墩模型的墩顶位移差值,可计算出主梁对墩顶的横桥向约束刚度为11 764 705.8 N/m,纵桥向约束刚度为7 462 686.5 N/m。附加质量单元的质量可根据两种模型中的桥墩底部反力差值来确定。全桥模型墩底反力为306 395.3 kN,单墩模型墩底反力为101 355.9 kN,因此,附加质量单元的质量为20 909 585.9 kg。

3.1.2 混凝土材料模型

船舶碰撞为一个非线性动塑性问题,需要建立合适的结构材料本构关系。由于在船舶碰撞过程中桥墩混凝土会产生硬化效应,因而采用弹塑性混凝土硬化断裂本构关系。本文采用Colorado帽盖材料模型,它是一个由失效包络面、硬化端帽盖面和拉力切断极限面组成的失效面表达的塑性模型。

判定混凝土是否发生破坏,需要依据混凝土的破坏准则。确定混凝土在复杂受力状态下的强度比较复杂,目前能解释不同破坏物理现象的混凝土强度理论尚未完善,所以实际应用中常依赖混凝土强度试验的结果。本文采用较为简单的单参数混凝土强度准则模型,即最大拉伸应力理论的破坏准则。

根据混凝土结构设计规范,C40混凝土的抗拉强度标准值取为 $2.4 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 。

3.2 船舶建模

3.2.1 船舶模型

船舶有限元模型建立主要分为船舶模型网格划分、模型连接、材料属性定义、模型配重和模型边界施加。整个船舶为钢板结构,采用壳单元进行详细建模,以兼顾船碰撞分析的精度和效率。壳单元类型采用普遍用于碰撞分析的 Belytschko-Tsay 单元,该单元类型计算精度高、速度快。

为提高分析精度和计算效率,船舶建模采用分段过渡网格的思路,即壳单元网格大小由船艏到船尾逐渐增加。船艏部分是船体碰撞变形区,该区域的网格尺度和类型对船体的刚度影响较大。因此,该部分采用精细化建模,壳单元网格平均尺寸为 $50 \sim 100 \text{ mm}$,网格最大程度采用四边形网格,如图5所示。船体和船尾部分不涉及船体变形问题,仅需考虑该部分的质量分配对船体动能和运动状态的影响,因此该部分采用粗略化建模。

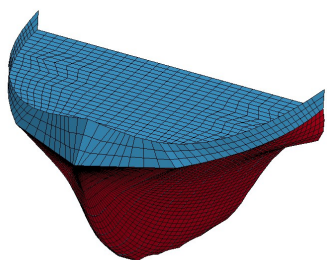


图5 船艏精细化有限元模型

Figure 5 Refined finite element model of bow

3.2.2 船用钢材材料模型

船桥碰撞时,船艏碰撞区域会产生弹塑性大变形且以塑性变形为主,而船体中后部无显著塑性变形。因此,在船舶建模时,船体中后部结构采用刚性材质,船艏采用弹塑性材质。弹塑性材质采用线性强化弹塑性本构模型,其应力 σ_y -应变 ϵ_p 表达式为:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{EE_h}{E - E_h} \epsilon_p \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量,取 $2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$; σ_0 为静屈服应力,取 $2.35 \times 10^8 \text{ N/m}^2$; E_h 为硬化模量,取 $1.18 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。钢材的密度和泊松比分别取 7850 kg/m^3 和 0.3 。

另外,在船桥碰撞过程中,应变率对船用低碳钢的塑性性能具有显著影响。因此,在上述材料本构

中,采用 Cowper-symonds 本构方程来考虑材料的塑性应变率敏感性,如式(4)所示:

$$\frac{\sigma_0'}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{q}} \quad (4)$$

式中: σ_0' 为应变率为 $\dot{\epsilon}$ 时对应的动屈服应力;对于船用钢材,常数 D 取 40.4 , q 取 5 。

有限元单元的等效塑性应变超过设定的极限塑性应变时,则认为单元失效。通过正确设定有限元单元材料的断裂极限应变值,可以使得有限元模拟的断裂状态与实际状态一致。该值受到有限元网格尺度的影响,需要根据网格尺寸进行调整。在本研究建立的有限元模型中,碰撞区最小单元特征长度为 50 mm ,钢材断裂极限应变值取 0.34 。

3.3 流体介质对碰撞的影响

流体介质对船桥碰撞分析的影响可以通过船舶附连水质量进行考虑。船舶的附连水质量会随着船舶的型线特征、撞击状态等因素的变化而变化,目前想要精确确定该值较为复杂且困难。计算附连水质量的方法主要有切片法和经验公式法。为计算方便,本文利用后者估计附连水质量。在实际操作时,附连水质量可以通过增加船舶材料密度的方法进行考虑,其值一般可以采用 $2\% \sim 7\%$ 的船舶总质量。本研究中附连水质量取为船舶总质量的 4% 。

3.4 接触算法

船舶和桥墩结构之间的碰撞相互作用通过 ANSYS/LS-DYNA 中的接触算法来实现。算法通过接触面来模拟结构之间的相互作用。具体地,在有限元模型中,在发生接触的构件之间定义一个接触面,允许构件之间连续的接触和滑动。构件之间的接触包括单面接触、节点-表面接触以及表面-表面接触3种类型。本研究采用自动单面接触和自动面-面接触,其中静摩擦系数和动摩擦系数均取为 0.1 。

4 船撞力计算结果

4.1 有限元计算结果

经过 ANSYS/LS-DYNA 软件的显式动力学分析,获得各工况下船舶撞击力随时间变化曲线如图6所示(图中 v 为撞击速度, α 为撞击偏角)。撞击力具有很强的非线性波动特征,撞击力曲线中的每一次峰值卸载都代表了船舶或桥墩某个部分的失效或破坏。

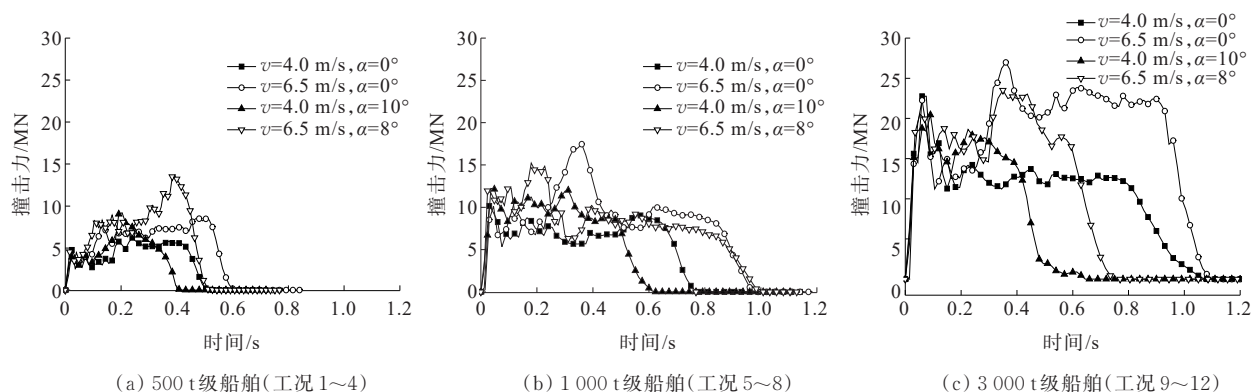


图6 各工况下船舶撞击力时程曲线

Figure 6 Time history curves of collision force under various calculation scenarios

图7以工况5(1 000 t级船舶,撞击速度4 m/s,正撞)为例展示了船桥碰撞过程中不同时刻船舶的变形和应力变化情况,其中深色代表高应力区。船舶与桥墩接触撞击过程中能量主要被船艏局部大变形吸收,图8展示了工况1~12的船舶撞深时程曲线。

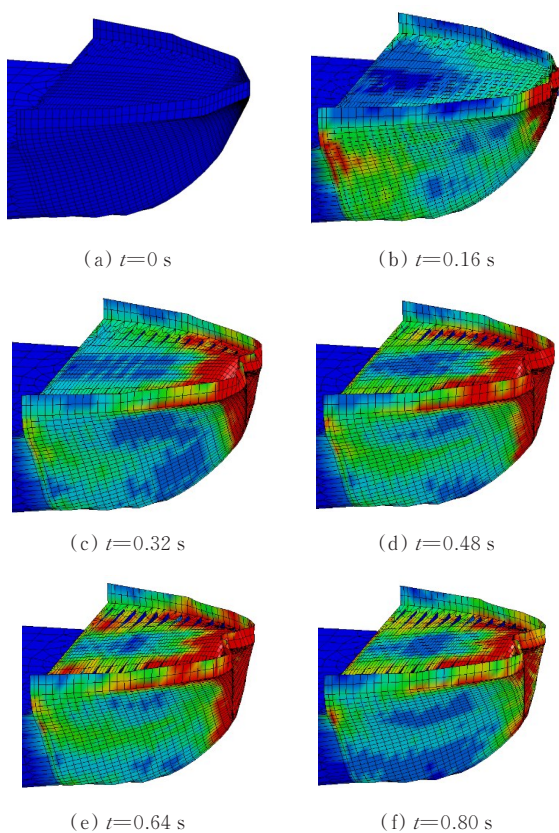


图7 船桥碰撞过程中不同时刻的船艏变形和应力分布(工况5)
Figure 7 Bow deformation and stress distribution at different time during vessel-bridge collision (Scenario 5)

可以看出:船艏最大撞深对应的界面接触力已经越过船撞力时程曲线(图6)的峰值段而达到尾部

下降段,即最大撞深发生时刻滞后于最大撞击力发生时刻。达到最大撞深后,船舶会发生一定回弹,但最终塑性变形显著。

船桥碰撞过程中的系统能量主要是由船舶动能转化为船舶局部变形内能。由于在有限元计算时为保证计算效率而采用了缩减积分算法,此时沙漏变形能导致的零能模态可能导致计算结果失真。在分析过程中,沙漏变形能若在系统总能量10%以内即可认为有限元计算结果可信。本文分析中各工况下沙漏能均低于系统总能量的5%,分析精度满足要求。限于篇幅,图9仅展示了工况5(1 000 t级船舶,撞击速度4 m/s,正撞)的能量交换过程。

表3汇总了各工况下的最大正撞力、最大侧撞力、撞击时长以及最大撞深的有限元仿真计算结果。总体上,船舶最大撞击力、最大撞深以及撞击时长均随着船舶载重吨位和撞击速度的增加而增加,并且船舶撞击时长在侧撞情形下比在正撞情形下更短。对于载重吨位较小的船型(500 t),相同撞击速度下,船舶最大正撞力和最大撞深在侧撞情形下比在正撞情形下更大;对于载重吨位较大的船型(1 000 t和3 000 t),相同撞击速度下,船舶最大正撞力和最大撞深在正撞情形下比在侧撞情形下更大。

4.2 经验公式计算结果

为方便工程应用,各国提出了多种船舶撞击桥墩的碰撞力经验计算公式,部分常用公式列于表4中。MGW公式仅考虑船舶的质量和速度,形式较为简单;美国AASHTO规范进一步将质量和速度分别采取不同的指数幂形式;SSKG公式考虑了船撞发生时的实际船舶排水量;中国《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)计入了船舶和桥墩的总刚

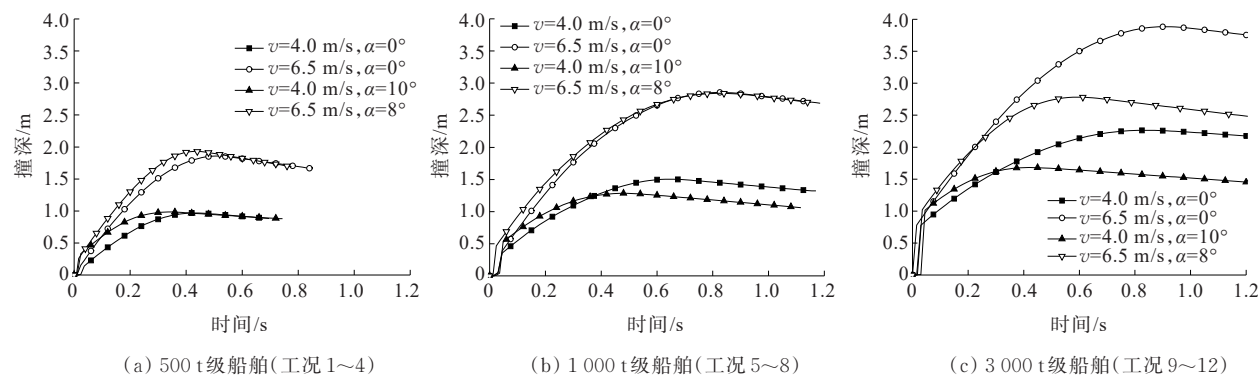


图 8 各工况下船舶撞深时程曲线

Figure 8 Time history curves of vessel collision depth under different calculation scenarios

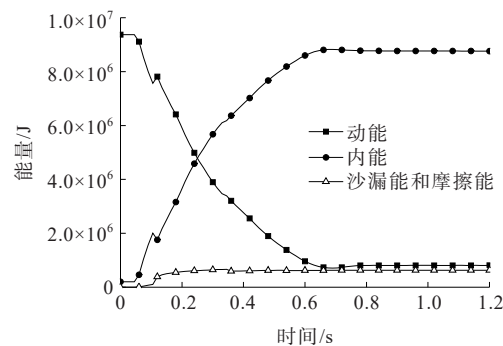


图 9 船桥碰撞系统的能量交换(工况 5)

Figure 9 Energy exchange of vessel-bridge collision system (Scenario 5)

度,总刚度越大,撞击力越大;中国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)基于冲量公式引入撞击时间的影响;中国《公路桥梁抗撞规范》(JTG/T

3360-02—2020)采用了大量数值仿真样本进行船撞力公式拟合。值得说明的是,这些经验公式大多仅适用于船舶正撞情形。

船撞力的经验公式计算结果(仅考虑正撞情形)如表 5 所示,相应工况下的船舶正撞力有限元仿真计算结果同时列于表中。从表 5 中可以看出:不同经验计算公式的计算结果相差较大。具体而言,美国 AASHTO 规范和 SSKG 公式的船撞力计算结果相近且最大,MGW 公式的船撞力计算结果最小,中国《公路桥梁抗撞规范》(JTG/T 3360-02—2020)和《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)的船撞力计算结果介于中间。中国《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)计算结果与 MGW 公式计算结果相近。另外,本文有限元仿真计算结果与中国《公路桥

表 3 各工况下的船舶撞击力仿真计算结果

Table 3 Simulation results of collision force under different calculation scenarios

船型/ t	撞击速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	撞击角度/ ($^{\circ}$)	撞击时长/ s	最大撞深/ m	最大正撞力/ MN	最大侧撞力/ MN	工况 编号
500	4.0	0(正撞)	0.516	0.97	6.2		1
	4.0	10(侧撞)	0.408	0.98	9.2	0.83	2
	6.5	0(正撞)	0.612	1.86	8.5		3
	6.5	8(侧撞)	0.536	1.93	13.6	0.98	4
1 000	4.0	0(正撞)	0.765	1.50	10.2		5
	4.0	10(侧撞)	0.612	1.28	12.2	1.26	6
	6.5	0(正撞)	0.975	2.85	17.5		7
	6.5	8(侧撞)	0.996	2.84	15.2	1.66	8
3 000	4.0	0(正撞)	1.080	2.26	22.8		9
	4.0	10(侧撞)	0.630	1.68	20.4	1.93	10
	6.5	0(正撞)	1.095	3.88	27.0		11
	6.5	8(侧撞)	0.753	2.78	23.5	2.85	12

表 4 船撞力经验计算公式

Table 4 Empirical formulas for calculating vessel collision forces

编号	公式来源	经验公式	符号说明
1	《公路桥梁抗撞设计规范》 (JTG/T 3360-20—2020) ^[4]	$F = \alpha \cdot \eta \cdot \gamma \cdot V \cdot [(1 + C_M)M]^{0.62}$	F 为船舶撞击力; V 为船舶撞击速度; M 为船舶满载排水量; T_{DWT} 为船舶载重吨位; C_M 为附连水质量系数; α 为船舶撞击力系数; γ 为撞击角度修正系数; η 为几何尺寸修正系数; g 为重力加速度; T 为撞击时间; λ 为动能折减系数; θ 为船舶轴线与碰撞面法线夹角; C_1 、 C_2 为船舶和墩台弹性变形系数; M_{act} 为船撞发生时船舶排水量
2	《公路桥涵设计通用规范》 (JTG D60—2015) ^[5]	$F = MV/gT$	
3	《铁路桥涵设计规范》 (TB 10002—2017) ^[6]	$F = \lambda V \sin \theta \sqrt{M/(C_1 + C_2)}$	
4	AASHTO 规范 ^[7]	$F = 1.2 \times 10^5 V (T_{DWT})^{1/2}$	
5	Minorsky-Gerlach-Woisin (MGW) 公式 ^[8]	$F = 0.024 (VM)^{2/3}$	
6	Saul-Svensson-Knott-Greiner (SSKG) 公式 ^[8]	$F = 0.88 (T_{DWT})^{1/2} (V/8)^{2/3} (M_{act}/M)^{1/3}$	

表 5 船舶正撞力经验结果与仿真结果的对比

Table 5 Comparison of forward v collision force of vessel between empirical and simulation results

船型/ t	正撞速度/ (m · s ⁻¹)	船舶正撞力/MN							工况 编号
		公路桥梁 抗撞规范	公路桥涵 设计规范	铁路桥涵 设计规范	AASHTO 规范	MGW 公式	SSKG 公式	正撞仿 真结果	
500	4.0	7.32	3.32	4.33	10.73	3.81	11.5	6.2	1
	6.5	11.90	5.40	7.04	17.44	5.27	15.91	8.5	3
1 000	4.0	11.25	6.33	5.98	15.18	6.05	16.27	10.2	5
	6.5	18.28	10.29	9.72	24.66	8.36	22.49	17.5	7
3 000	4.0	17.29	17.63	9.98	21.47	9.60	23.01	22.8	9
	6.5	28.10	28.65	16.21	34.88	13.27	31.81	27.0	11

梁抗撞规范》(JTG/T 3360-02—2020)的计算结果较为接近。

本文撞击力标准值推荐采用动力仿真模拟值,原因如下:上述经验公式建立在船撞桥的刚体或弹性体整体碰撞的简单理论基础上,再作若干修正的半经验公式。由于各自采用的拟合样本不同,以及对船撞桥问题中的关注重点不同,使得这些经验公式的计算结果仅在特定情况下与实际撞击力接近。另外,这类半经验公式属于从弹性系统能量守恒出发的准静态简化分析,既没有涉及应力波的传播,也没有考虑材料的应变率效应等冲击动力学问题的特征。因此,不能反映碰撞区应变高度局域化、结构的局部动态塑性屈曲和动态断裂等一系列非线性问题。

5 桥墩抗撞性能分析

本节重点关注桥墩横桥向的抗撞性能。桥墩的

抗撞性能通过桥墩的极限抗船撞能力表征,它可以利用桥梁的极限承载力反推得到。具体而言,在全桥 Midas 模型(图 10)中,将横桥向的 1 MN 水平力施加在撞击点处,则可以得到各桥墩的内力 F ,根据线性叠加原理,当桥墩受到大小为 P 的船撞力作用时,船撞力在各桥墩处产生的内力为 $F' = P \times F$ 。此时,令恒载、活载以及船撞力的作用效应偶然组合值等于截面极限承载力,可以推算出桥梁的极限抗船撞力。

对于桩承式桥墩,一般破坏位置发生在墩底以及桩顶两个关键截面,因此极限抗船撞力验算截面选择为墩底和桩顶截面。两个截面的钢筋布置示意图分别如图 11、12 所示。墩底截面外圈主筋采用直径 32 mm 的 HRB400 钢筋,内圈主筋采用直径 25 mm 的 HRB400 钢筋,主筋间距为 10 cm;内外轮廓箍筋采用直径 20 mm 的 HRB400 钢筋,箍筋加密区竖向间距为 100 mm。桩顶截面直径为 2.5 m,主筋采用直径 25 mm 的 HRB400 钢筋,环向分布,间距为 13.6 cm,

本文以礼嘉嘉陵江大桥为工程背景,开展了大跨度上承式梁-拱组合刚构桥梁的船撞力标准值和抗撞性能研究,得出以下结论:

表6 P2/P3墩的极限抗船撞力计算结果
Table 6 Ultimate anti-collision forces of pier P2/P3

工况 编号	撞击点距 墩底高 度/m	桩顶极限抗 船撞力/MN		墩底极限抗 船撞力/MN		仿真正 撞力/ MN
		抗弯	抗剪	抗弯	抗剪	
1	14.69	96.87	177.34	89.03	290.36	6.2
3	29.43	51.10	186.43	44.30	299.35	8.5
5	14.83	96.15	178.02	88.00	290.43	10.2
7	29.57	50.81	186.25	44.04	299.43	17.5
9	16.29	89.10	184.25	78.64	291.24	22.8
11	31.03	47.70	184.31	41.28	300.22	27.0

(1) 船桥碰撞是一个非线性动塑性问题,有限元仿真需要建立合适的结构材料本构关系,并考虑材料动力屈服应变率敏感性以及流体介质对碰撞的影响。

(2) 采用单墩模型进行计算,可以提升船桥碰撞动力计算效率。为使得桥墩顶端的受力及约束状态接近全桥状态,可以采用墩顶弹性约束,并在墩顶设置附加质量单元,墩顶弹性约束刚度和附加质量单元的质量可以通过 Midas Civil 建立的全桥模型获得。

(3) 撞击力具有很强的非线性波动特征,撞击力曲线中的每一次峰值卸载都代表了船舶或桥墩某个部分的失效或破坏;船舶最大撞深发生时刻滞后于最大撞击力发生时刻,达到最大撞深后,船舶会发生一定回弹;船桥碰撞过程中的系统能量主要是由船舶动能转化为船艏局部变形内能。

(4) 船撞力有限元仿真结果与多种经验公式计算结果的对比表明:本文仿真结果与《公路桥梁抗防撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020)的计算结果较为接近,不同经验公式的计算结果相差较大。大桥船撞力标准值推荐采用动力仿真模拟值。

(5) 基于线性叠加原理,桥墩的极限抗船撞力可以利用全桥 Midas 模型和桥墩验算截面的极限承载力反推得到。验算结果表明礼嘉嘉陵江大桥主墩的抗撞性能满足要求。

参考文献:

References:

[1] 郑植,耿波,袁佩,等.跨海大桥抗撞能力及防护措施研究[J].中外公路,2022,42(1):127-132.
ZHENG Zhi, GENG Bo, YUAN Pei, et al. Study on anti-

collision performance and protective measures of sea-crossing bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1):127-132.

[2] 招启嵩,温敏韬.某内河航道桥抗船撞安全性能评估分析[J].公路,2023,68(4):203-207.
ZHAO Qisong, WEN Mintao. Evaluation and analysis of safety performance of an inland waterway bridge against ship collision[J]. Highway, 2023, 68(4):203-207.

[3] 孔令元,巩健.磨刀门特大桥船撞桥墩快速重建工程技术研究[J].中外公路,2021,41(3):155-160.
KONG Lingyuan, GONG Jian. Study on engineering technology of rapid demolition and reconstruction of modaomen bridge piers due to ship collision [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(3):155-160.

[4] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥梁抗撞设计规范:JTG/T 3360-02—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd.. Specifications for collision design of highway bridges: JTG/T 3360-02—2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.

[5] 中交公路规划设计院有限公司.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd.. General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.

[6] 铁道第三勘察设计院集团有限责任公司.铁路桥涵设计规范:TB 10002—2017[S].北京:中国铁道出版社,2017.
The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation. Code for design on railway bridge and culvert: TB 10002—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017.

[7] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD bridge design specifications[S]. Washington, D. C.: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.

[8] European Committee for Standardization (CEN). EN 1991-1-7, Eurocode 1: Actions on structures-part 1-7 general actions-accidental actions[S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization (CEN), 2006.

[9] LARSEN, O D. Ship collision with bridges: The interaction between vessel traffic and bridge structures[R]. IABSE Structural Engineering Document 4. Zürich, Switzerland: IABSE-AIPC-IVBH, 1993.

- [10] 王贵春,吉喆,李武生,等.考虑桩土作用的船桥碰撞动力性能及影响因素分析[J].桥梁建设,2021,51(4):17-24.
WANG Guichun, JI Zhe, LI Wusheng, et al. Analysis of ship-bridge collision dynamic property and influential factors considering pile-soil interaction[J]. Bridge Construction, 2021, 51(4): 17-24.
- [11] 罗赞.船舶撞击桥墩动力响应影响因素研究[J].世界桥梁,2020,48(4):55-59.
LUO Yun. Study of factors influencing dynamic response of pier to vessel collision[J]. World Bridges, 2020, 48(4): 55-59.
- [12] 郭健,郑阳飞,宋神友.考虑海域水位变化的船撞桥流固耦合分析[J].桥梁建设,2019,49(6):24-29.
GUO Jian, ZHENG Yangfei, SONG Shenyong. Fluid-structure coupling during ship-bridge collision process considering sea level variations[J]. Bridge Construction, 2019, 49(6): 24-29.
- [13] 朱俊羽,祝露,韩娟,等.某跨航道桥下部结构受船舶撞击后安全性能评估及修复[J].世界桥梁,2020,48(1):87-92.
ZHU Junyu, ZHU Lu, HAN Juan, et al. Safety evaluation for substructure of a navigational channel bridge after ship collision and repairs[J]. World Bridges, 2020, 48(1): 87-92.
- [14] 王君杰,陈诚,汪宏,等.基于碰撞数值模拟的桥梁等效静力船撞力:基本公式[J].公路交通技术,2009,25(2):66-70.
WANG Junjie, CHEN Cheng, WANG Hong, et al. Equivalent static force of ship impact to bridge based on impact numeric simulation-fundamental formula[J]. Technology of Highway and Transport, 2009, 25(2): 66-70.
- [15] 陈诚,王君杰,汪宏,等.基于碰撞数值模拟的桥梁等效静力船撞力:修正系数[J].公路交通技术,2009,25(3):74-77, 82.
CHEN Cheng, WANG Junjie, WANG Hong, et al. Equivalent static ship impact to bridge based on numerical simulation for collision-correction coefficient[J]. Technology of Highway and Transport, 2009, 25(3): 74-77, 82.
- [16] 张文明,王涛,张华兵,等.基于 ANSYS/LS-DYNA 的船桥碰撞分析[J].中国水运(学术版),2006(11):21-23.
ZHANG Wenming, WANG Tao, ZHANG Huabing, et al. Ship-Bridge collision analysis based on ANSYS/LS-DYNA[J]. China Water Transport (Academic Version), 2006(11): 21-23.
- [17] 王君杰,宋彦臣,卜令涛.船舶与桥墩撞击力-撞深关系概率模型[J].中国公路学报,2014,27(6):59-67.
WANG Junjie, SONG Yanchen, BU Lingtao. Probabilistic model of impact force-penetration for ship-bridge collision[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(6): 59-67.
- [18] 宋彦臣,王君杰,尹海蛟,等.轮船-桥墩碰撞简化荷载模型[J].振动与冲击,2019,38(5):60-70.
SONG Yanchen, WANG Junjie, YIN Haijiao, et al. Simplified impact load model for ship-bridge collisions[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(5): 60-70.
- [19] 樊伟,袁万城,杨智,等.高桩承台桥梁船撞动力需求的时程分析法[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(12): 1719-1724.
FAN Wei, YUAN Wancheng, YANG Zhi, et al. Development of time history analysis for dynamic demand of elevated pile-cap bridge subjected to vessel collision[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(12): 1719-1724.
- [20] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd.. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.