

浮式钢防撞箱受力性能数值分析

韩晓磊, 王博, 李伟东

(中国建筑第五工程局有限公司, 湖南长沙 410002)

摘要: 浮式钢防撞箱在船桥碰撞中具有良好的塑性吸能防撞性能。为探究影响防撞箱防撞性能的因素, 该文基于有限元软件 Ansys/LS-DYNA, 建立了船-防撞箱-桥墩系统碰撞模型, 对碰撞机理及过程进行数值模拟, 探讨防撞箱与桥墩连接方式、尖舱尖角、防撞箱刚度等对桥墩所受撞击力的影响, 提出撞击力曲线的三阶段划分方法。分析表明: 浮式防撞箱内壁直接固结、与桥墩外壁耦合连接会降低撞击力, 最大撞击力随着防撞箱与桥墩间距的增大而变大; 防撞箱尖舱尖角宜取为 $80^{\circ}\sim 100^{\circ}$; 防撞箱碰撞区钢板厚度存在一个最优值; 最大撞击力随着非碰撞区钢板厚度的增大而变大, 超过 8 mm 增大幅度降低。

关键词: 船桥碰撞; 浮式钢防撞箱; 撞击力; 防撞箱与桥墩连接方式; 尖舱夹角; 钢板厚度

中图分类号: U448

文献标志码: A

Numerical Simulation of Mechanical Performance for Anti-Collision Steel Pontoon

HAN Xiaolei, WANG Bo, LI Weidong

(China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha, Hunan 410002, China)

Abstract: Anti-collision steel pontoon has good plasticity and energy absorption properties in ship-bridge collision. To explore the factors affecting the anti-collision performance of the anti-collision pontoon, a collision model composed of ship, anti-collision pontoon, and pier system was built based on finite element software Ansys/LS-DYNA. The collision mechanism and process were numerically simulated, and the effects of connection type between anti-collision pontoon and pier, peak angle of pontoon, and anti-collision pontoon stiffness on the collision force of the pier were investigated. The three-stage division method of collision force curve was put forward. The analysis shows that the fixed inwall of the anti-collision steel pontoon and connection to the pier surface can reduce collision force. The maximum collision force increases with the increase in distance between anti-collision pontoon and pier. The appropriate value range of the peak angle of the pontoon is $80^{\circ}\sim 100^{\circ}$. The steel plate thickness of the collision zone of the anti-collision pontoon has an optimal value. With the increase in steel plate thickness of the non-collision zone, the maximum collision force will increase, but the increase amplitude will decrease when it exceeds 8 mm.

Keywords: ship-bridge collision; anti-collision steel pontoon; collision force; connection type between anti-collision pontoon and pier; peak angle of pontoon; steel plate thickness

0 引言

近年来船舶与桥墩碰撞事故时有发生, 轻则船舶受损, 重则导致桥梁倒塌, 因此需要采取措施来保护桥墩, 以确保桥梁的正常使用。仅通过设计足够刚性的桥墩直接抵抗巨大的撞击力往往是不可行

的, 由于钢箱防撞装置具有易加工、吸能效果好、造价低等优点, 被广泛应用于桥墩防护中。

碰撞是一个复杂的非线性动态响应过程, 国内外学者多采用数值方法对船舶-钢箱防撞装置-桥墩碰撞全过程进行模拟。关于浮式防撞箱与桥墩连接方式的模拟, 张巍等^[1]以浮箱内壁与桥墩接触的节点

收稿日期: 2022-11-21

基金项目: 中建股份科技研发项目(编号: CSCEC-2021-Z-29)

作者简介: 韩晓磊, 男, 硕士, 工程师. E-mail: 1625028519@qq.com

固结作为边界条件,建立了500 t驳船与钢浮箱碰撞模型,分析了撞击力、能量转换的规律和特点;单成林等^[2]采用夹层板曲面形浮箱内壁环形护舷与墩柱单元节点耦合约束,模拟了船舶-浮箱-桥墩碰撞过程;刘建成等^[3]、韩东等^[4]、姜华等^[5]、刘伟庆等^[6]考虑了防撞装置与桥墩的接触,但没讨论二者之间的间距对浮箱防撞效果的影响。关于防撞箱刚度对防撞效果的研究,韩东等^[4]对防撞箱整体钢板厚度在同时变化的情况下,分析船舶结构和防撞箱刚度对撞击力及碰撞过程的影响;冯清海等^[7]对港珠澳大桥青州航道桥塔钢套箱防撞装置受力特性进行研究,得出碰撞部位受损较大;肖波等^[8]建立船舶撞击防撞箱有限元模型,指出碰撞部位为易损部位,并通过在防撞箱外围壁板添加一层钢板来增加碰撞部位钢板的刚度。

本文建立了船舶-防撞箱-桥墩系统碰撞有限元模型。对于防撞箱与桥墩连接方式的模拟,可考虑防撞箱内壁直接固结,或二者接触面耦合连接,或二者存在间隙。通过船舶-防撞箱-桥墩全过程碰撞仿真计算及分析,提出影响防撞箱受力性能的关键设计参数,为浮式钢防撞箱的设计与施工提供参考。

1 船舶-防撞箱-桥墩碰撞有限元分析

1.1 船舶模型

船舶外形与构造参考某实际3 000 DWT船舶图纸,其主要参数见表1。船艏部分作为碰撞区,在碰撞中可能会出现钢板屈曲、压溃等破坏现象,为了精确反映船艏变形,对船艏各层甲板、横舱壁等均采用Shell 163壳单元模拟^[7-9],其有限元网格划分较细密,单元平均尺寸为0.15 m。船体中后部作为非碰撞区,在碰撞中未发生变形或变形很小,仅提供刚度和质量,为方便碰撞区与非碰撞区的连接,船体中后部亦采用Shell 163单元模拟,其有限元网格划分较粗糙,单元平均尺寸为0.50 m。整船有限元模型见图1。

表1 船舶的主要尺寸

Table 1 Main dimensions of ship m

船舶类型	总长	垂线间长	型宽	型深	设计吃水	结构吃水
油船	139.60	134.80	19.30	11.20	8.28	8.30

船艏部分材料特性采用双线性等向强化弹塑性本构模型(*MAT_3即*MAT_PLASTIC_KINEMATIC^[10])来模拟。在船舶瞬态碰撞过程中^[11-12],低碳钢的塑性性能对应变率是高度敏感的。应变率对材料屈服强

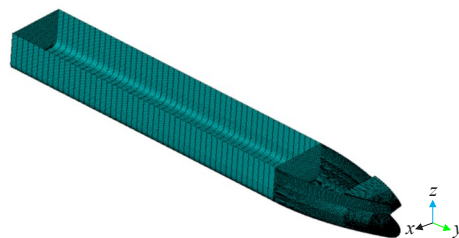


图1 船舶有限元模型

Figure 1 Finite element model of ship

度的影响采用Cowper-Symond本构方程表达,采用与应变率有关的因数表示屈服应力:

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] \left(\sigma_0 + \beta \frac{E E_{TAN}}{E - E_{TAN}} \epsilon_{eff}^p \right) \quad (1)$$

式中:初始屈服应力 $\sigma_0 = 235$ MPa; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; ϵ_{eff}^p 为有效塑性应变;弹性模量 $E = 2.06 \times 10^{11}$ Pa;硬化模量 $E_{TAN} = 1.18 \times 10^9$ Pa; C 和 P 为Cowper-Symond应变率参数,取值分别为40.4和5.0;等向强化参数 $\beta = 1.0$;失效应变 $\epsilon_f = 0.35$ ^[13]。

船体中后部材料特性采用刚体材料模型(*MAT_RIGID)模拟。为考虑船舶满载的影响,通过修改船体中后部材料密度来实现,经换算得到密度为 59.3×10^3 kg/m³,弹性模量为 2.06×10^{11} Pa,泊松比为0.3。

1.2 桥墩模型

选取某长方体实心墩作为船桥碰撞仿真计算中的桥墩模型,顺桥向3 m,横桥向8 m,垂直高度为40 m,采用Solid 164实体单元进行模拟。忽略混凝土内部钢筋作用及桩土效应,桥墩底部采用固结形式;由于桥墩横桥向抗推刚度大,撞击时间短,加上主梁巨大的质量,在墩顶会产生很大的支座反力,给桥墩提供巨大惯性约束,因此桥墩顶部亦采用固结模拟^[5,14],桥墩有限元模型见图2。桥墩采用C30混凝土,为反映材料非线性采用弹塑性损伤帽盖模型,参数^[15]取值见表2。

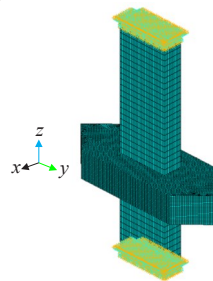


图2 防撞箱和桥墩有限元模型

Figure 2 Finite element model of anti-collision pontoon and pier

表 2 弹塑性损伤帽盖模型材料参数
Table 2 Material parameters of elastoplastic damage cap model

α	θ	λ	β	X_0	D_1	D_2
7.72	0.34	2.977	0.053 9	70.14	9.50E-04	1.67E-06
α_1	θ_1	λ_1	β_1	W	R	A^-
0.82	0	0.244	0.013 5	0.067	2.5	1
α_2	θ_2	λ_2	β_2	B^-	A^+	B^+
0.76	0	0.260 33	0.011 5	0.1	1	0.3

注:表中参数 $\alpha, \theta, \lambda, \beta, \alpha_1, \theta_1, \lambda_1, \beta_1, \alpha_2, \theta_2, \lambda_2, \beta_2$ 为子午线强度参数; X_0, D_1, D_2, W, R 为帽盖形状和位置参数; A^-, B^-, A^+, B^+ 为材料损伤参数。

1.3 防撞箱模型

防撞箱主要由内外层围板、纵横舱壁等板架结构构成,布置在桥墩外围,其结构形式及主要尺寸见图 3。防撞箱总高度为 5 m, e 为防撞箱内壁与桥墩间距, β 为防撞箱尖舱夹角。防撞箱为空间薄壁结构,均采用 Shell 163 单元模拟,为考虑钢板屈曲、压溃等破坏现象,其材料特性亦采用与船舶相同的材料模型。为探讨防撞箱不同位置钢板厚度对防撞效果的影响,把易遭受船舶直接碰撞的尖舱部分作为碰撞区,其余部分作为非碰撞区。防撞箱的有限元模型见图 2。

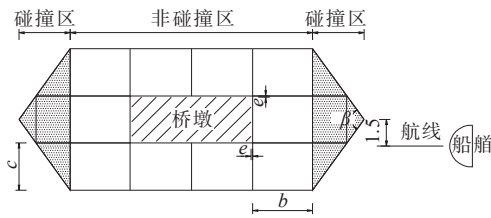


图 3 防撞箱和桥墩横断面(单位:m)

Figure 3 Cross-section of anti-collision pontoon and pier (unit:m)

1.4 流体介质的影响

以附连体质量反映船体与周围水介质之间的相互作用,其大小与船舶型线、碰撞历程等有关,精确计算相当复杂。本文附连水质量取船舶总质量的 0.04^[16-17],通过加大模型中非碰撞船体密度来实现。

1.5 接触、沙漏的处理

Ansys/LS-DYNA 软件处理结构之间的接触通过接触算法完成,通常需要选择合适的接触类型。本文采用两种接触类型:① 当物体发生大变形时,物体可能接触到自身,且接触区域不能预先确定,所以需要单面接触自动检测所有的接触表面,因此为了

模拟船艏或防撞箱内部构件可能出现的接触,在船艏和防撞箱分别建立了自动单面接触(ASSC);② 当不同物体表面接触、物体表面有较大滑移,接触表面为任意形状时,常采用面面接触(ASTS),且它可以提取接触力,所以在船舶与防撞箱、防撞箱与桥墩之间分别采用面面接触。

沙漏变形不需要能量,这在物理上不成立,LS-DYNA 采用黏性阻尼力控制沙漏,即通过关键字*CONTROL_HOURLASS 定义沙漏系数,采用 0.1。分析时考虑摩擦的影响,钢与钢之间摩擦系数采用 0.15,钢与混凝土之间摩擦系数采用 0.35^[18]。

1.6 船舶-防撞箱-桥墩运动控制方程及其求解

对船舶-防撞箱-桥墩碰撞系统建立动力学方程:

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 & 0 \\ 0 & M_b & 0 \\ 0 & 0 & M_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_s \\ \ddot{X}_b \\ \ddot{X}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_s & 0 & 0 \\ 0 & C_b & 0 \\ 0 & 0 & C_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_b \\ \dot{X}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & 0 & 0 \\ 0 & K_b & 0 \\ 0 & 0 & K_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ X_b \\ X_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_s \\ H_b \\ H_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{sb} \\ F_{bs} + F_{bp} \\ F_{pb} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: M, C 和 K 表示质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; X, \dot{X}, \ddot{X} 分别为位移、速度、加速度; H 为沙漏力;下标 s、b、p 分别代表船舶、防撞箱、桥墩; F_{ij} 为物体 j 对物体 i 产生的作用力。

碰撞动力学振动响应涉及波的传播,而研究波传播过程需要微小的时间步长,为加快求解效率,采用显示中心差分法进行动力方程求解。

1.7 与规范比较

首先对 3 000 DWT 船舶以 6 m/s 的速度正撞刚性桥墩进行数值分析,数值仿真计算与规范公式计算结果见表 3。数值模拟结果与规范公式计算结果差别较大,比欧洲统一规范^[19]和 AASHTO 规范^[20]的计算结果小,比《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002—2017)^[21]的计算结果大,数值模拟结果处于各规范计算中间值。

表 3 撞击力计算结果
Table 3 Collision force calculation results

计算方法	撞击力最大值/MN	误差/%
数值仿真计算	24.9	
欧洲统一规范	43.5	75
AASHTO 规范	40.3	62
《铁路桥涵设计基本规范》	15.1	39

2 计算结果及分析

主要计算参数:船舶载质量为3 000 DWT,航行速度6 m/s,船舶航向偏移防撞箱尖端所在中心线1.5 m。无特别说明,浮式防撞箱与桥墩间距 $e=0.1$ mm,钢板厚度12 mm,防撞箱尖舱夹角 90° 。

2.1 有无防撞箱结果对比

为探讨防撞箱的防护效果,分别计算无防撞箱、有防撞箱两种工况下桥墩受到的撞击力,其计算时程曲线见图4。

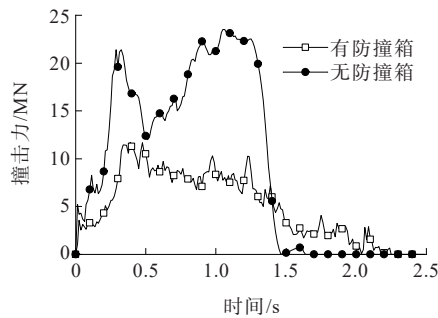


图4 有、无防撞箱桥墩所受撞击力曲线

Figure 4 Collision force curve of pier with and without anti-collision pontoon

由图4可看出:碰撞过程大致可分为3个阶段:①弹性阶段(0~0.025 s),该阶段船艏或防撞箱仅发生弹性变形,撞击力急剧达到一个峰值;②塑性变形阶段(0.025~0.350 s),该阶段板发生塑性变形同时伴随少量钢板失效,随着碰撞接触面的扩大,发生塑性变形钢板增多,撞击力快速增长;③崩溃阶段(0.350 s~碰撞结束),该阶段在理想情况下,钢板一般出现大量压溃、失效,撞击力呈缓慢降低趋势。在非理想情况下,可能伴随着非碰撞区钢板塑性变形的增多,撞击力先缓慢增大然后急剧下降。当未采用防撞措施时,桥墩受到的最大撞击力为23.52 MN,撞击时间约为1.48 s;有防撞箱时,最大撞击力为11.72 MN(降低约50%),撞击时间约为2.25 s(增加约52%)。浮式防撞箱延长了撞击作用时间,较大幅度地降低了桥墩所受撞击力峰值,发挥了良好的防护效果。

2.2 防撞箱与桥墩之间连接方式对撞击力的影响

为探究防撞箱与桥墩连接方式对撞击力的影响,考虑了6种工况:①防撞箱内壁直接固结;②防撞箱内壁与桥墩外壁节点耦合连接;③防撞箱自由,

与桥墩间距 $e=0.1$ mm;④防撞箱自由,与桥墩间距 $e=10$ mm;⑤防撞箱自由,与桥墩间距 $e=20$ mm;⑥防撞箱自由,与桥墩间距 $e=30$ mm。各工况下撞击力曲线分别见图5~10。

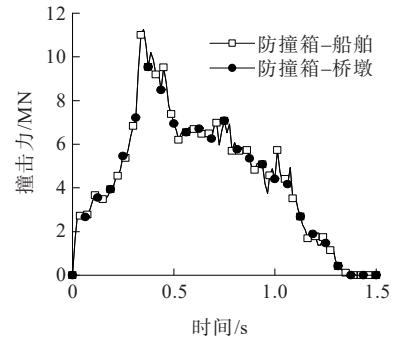


图5 工况①撞击力曲线

Figure 5 Collision force curve under condition ①

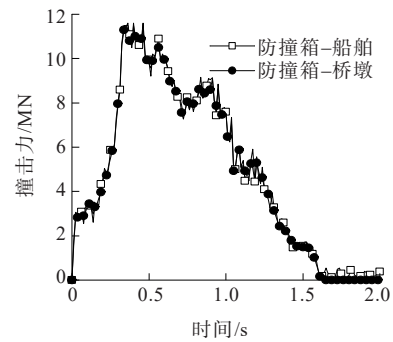


图6 工况②撞击力曲线

Figure 6 Collision force curve under condition ②

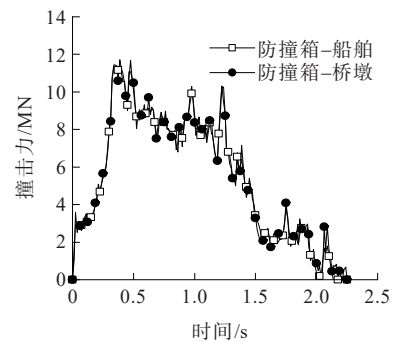


图7 工况③撞击力曲线

Figure 7 Collision force curve under condition ③

由图5~10可以看出:

(1)防撞箱内壁直接固结时,防撞箱-桥墩之间的撞击力曲线与防撞箱-船舶之间的撞击力曲线完全重合。前者曲线的弹性阶段峰值力、塑性变形阶段峰值力、最大撞击力都较小,说明防撞箱内壁直接固结桥墩受力偏小。

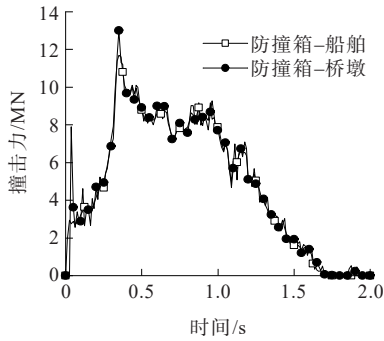


图8 工况④撞击力曲线

Figure 8 Collision force curve under condition ④

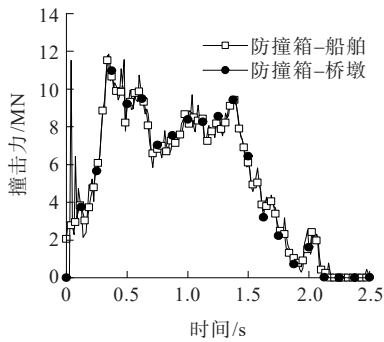


图9 工况⑤撞击力曲线

Figure 9 Collision force curve under condition ⑤

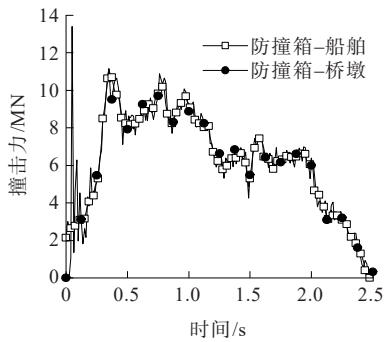


图10 工况⑥撞击力曲线

Figure 10 Collision force curve under condition ⑥

(2) 防撞箱与桥墩接触部分耦合连接时,防撞箱-船舶之间的撞击力曲线与防撞箱-桥墩之间的撞击力曲线有微小偏差。

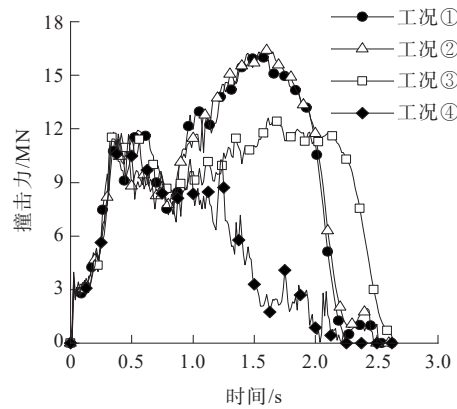
(3) 防撞箱自由时,防撞箱-桥墩之间的撞击力曲线与防撞箱-船舶之间的撞击力曲线在弹性阶段和塑性变形阶段偏差较大。前者曲线的最大撞击力随着防撞箱与桥墩间距的增大呈增大趋势,说明防撞箱与桥墩间距越大,桥墩受力越大,越不安全。

(4) 6种工况下,防撞箱-船舶之间撞击力在弹性阶段、塑性变形阶段基本重合,说明该种曲线在这两个阶段期间受防撞箱与桥墩的连接方式影响不大。

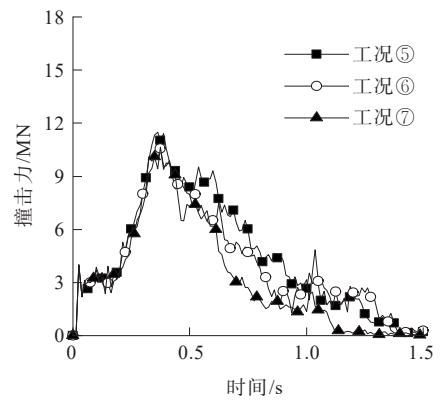
综合6种工况可见,把浮式防撞箱固结或者与桥墩耦合连接进行模拟计算是偏于不安全的;实际浮式防撞箱与桥墩存在间隙,且间隙越大,则桥墩受到的撞击力越大。这是因为在船舶的撞击作用下,防撞箱向前加速运动,当防撞箱与桥墩之间的间距越大时,防撞箱与桥墩接触时速度越大,从而使桥墩在短时间内受到较大撞击力。因此,在防撞箱实际施工时,浮式防撞箱与桥墩间距要尽量减小或采用固定于防撞箱上仅允许防撞箱上下移动的装置,以防止防撞箱在船舶与桥墩之间来回移动,从而减小桥墩所受最大撞击力。实际施工时,防撞箱与桥墩间距一般取10~30 mm,比较工况④、⑤、⑥,工况⑤最大撞击力较小,综合防护效果和经济性的平衡考量,建议取 $e=20$ mm。

2.3 防撞箱尖舱夹角 β 对撞击力的影响

为探究防撞箱尖舱夹角对撞击力的影响,计算 β 分别取 120° 、 110° 、 100° 、 90° 、 80° 、 70° 、 60° 共7种工况①~⑦。各工况下桥墩所受撞击力时程曲线见图11。



(a) 工况1~4



(b) 工况5~7

图11 不同防撞箱尖舱夹角时的撞击力曲线
Figure 11 Collision force curve under different peak angles of pontoon

由图11可知:各工况下弹性阶段峰值、塑性变形阶段峰值差别不大,且曲线基本重合,说明角度的变化对撞击力曲线弹性阶段和塑性变形阶段基本无影响。当 β 在 90° 以下(含 90°)时,撞击力曲线在崩溃阶段急剧下降,说明尖舱拨开了船头,减少了作用于防撞箱上的动能;当 β 大于 90° ,撞击力曲线在塑性阶段峰值点后又呈缓慢上升趋势,且出现一个较高的平台值,这是因为船舶船头没有被拨开,使得大量动能作用于防撞箱。

图12为最大撞击力与 β 关系曲线。

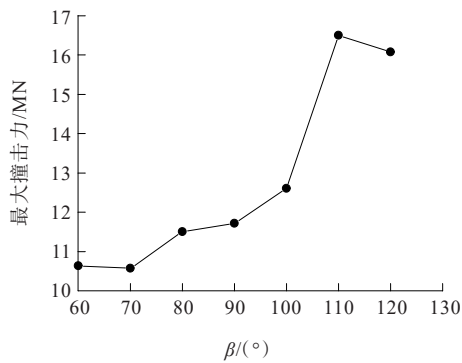


图12 最大撞击力与防撞箱尖舱夹角的关系

Figure 12 Relationship between maximum collision force and peak angle of pontoon

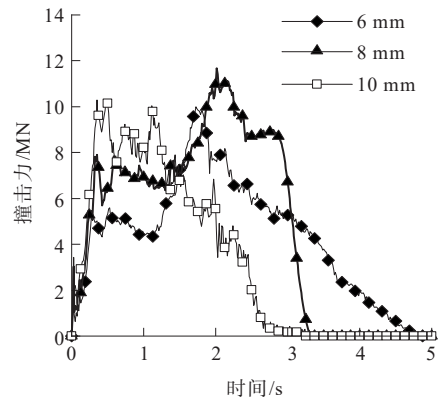
由图12可知:随着尖舱角度 β 的减小,桥墩所受最大撞击力大致呈降低趋势,说明防撞箱尖端具有良好的拨开船头的作用,正碰转化为斜碰,使碰后船舶载有更多的剩余动能,从而减少作用在防撞箱上的动能,进而减小撞击力。因此,从防撞的角度来说,防撞箱尖端夹角越小越好,但当夹角小于 80° 时,降低幅度减小。从经济的角度来说,防撞箱尖端夹角很小时不经济,故防撞箱尖舱角度最佳取值为 $80^\circ \sim 100^\circ$ 。

2.4 防撞箱整体钢板厚度对撞击力的影响

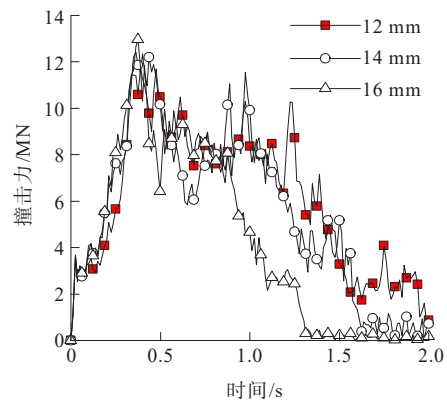
桥梁防撞中,防撞箱采用的钢板厚度一般为 $6 \sim 16 \text{ mm}$,设计时在满足大幅度降低船撞力的同时尽量减少厚度来满足省料的要求。本文分析中考虑了6种工况,即防撞箱整体钢板厚度分别为 6 mm 、 8 mm 、 10 mm 、 12 mm 、 14 mm 、 16 mm 。各工况下桥墩所受撞击力时程曲线见图13。工况①~⑥下对应弹性阶段峰值力分别为: 1.6 MN 、 3.0 MN 、 3.4 MN 、 3.5 MN 、 3.6 MN 、 3.8 MN ;塑性阶段峰值力分别为: 5.2 MN 、 7.9 MN 、 10.3 MN 、 11.4 MN 、 12.4 MN 、 13.0 MN ,可

见,弹性阶段峰值力、塑性变形阶段峰值力随着防撞箱钢板厚度的增加而增大。钢板厚度为 6 mm 、 8 mm 时,曲线在崩溃阶段出现最大撞击力,这是因为钢板厚度太薄时,船舶很容易嵌入防撞箱内,尖舱没有拨开船头导致大量船舶动能作用于防撞箱。

图14对比了不同防撞箱整体钢板厚度时的最大撞击力。



(a) 钢板厚度 $6 \sim 10 \text{ mm}$



(b) 钢板厚度 $12 \sim 16 \text{ mm}$

图13 不同防撞箱钢板厚度下撞击力曲线

Figure 13 Collision force curve under different steel plate thicknesses of pontoon

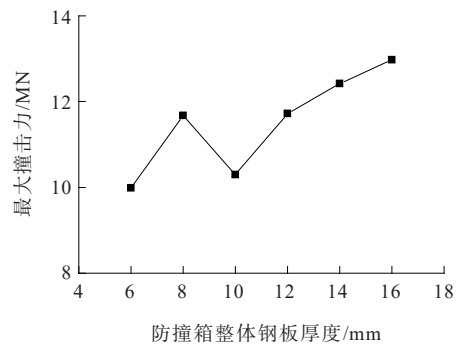


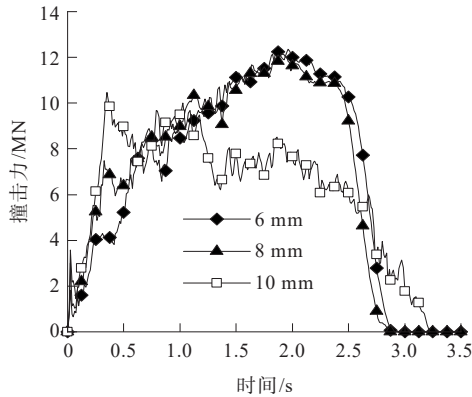
图14 最大撞击力与防撞箱整体钢板厚度的关系

Figure 14 Relationship between maximum collision force and steel plate thickness of pontoon

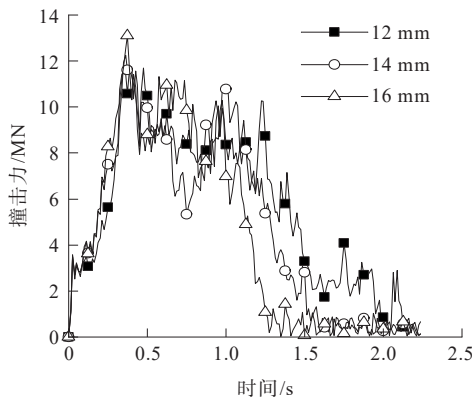
由图 14 可以看出:最大撞击力随着钢板厚度的减小而呈降低趋势,因为钢板厚度越小,钢板越容易发生塑性变形,从而能充分发挥防撞箱塑性吸能的特性。

2.5 防撞箱碰撞区域钢板厚度对撞击力的影响

非碰撞区钢板厚度为 12 mm,碰撞区钢板厚度分别为 6 mm、8 mm、10 mm、12 mm、14 mm、16 mm 共 6 种工况,各工况下桥墩所受撞击力时程曲线见图 15。



(a) 钢板厚度 6~10 mm



(b) 钢板厚度 12~16 mm

图 15 碰撞区不同钢板厚度下撞击力曲线

Figure 15 Collision force curve under different steel plate thicknesses of collision zone

由图 15 可知:工况①~⑥下对应弹性阶段峰值力分别为:1.8 MN、3.0 MN、3.5 MN、3.6 MN、3.5 MN、3.5 MN;塑性阶段峰值力分别为:4.3 MN、7.5 MN、10.5 MN、11.4 MN、12.2 MN、13.1 MN。可见,当碰撞区钢板厚度在 6 mm 以上时,弹性阶段峰值力基本无变化;塑性阶段峰值力随着碰撞区钢板厚度的增加而增大。

图 16 给出了最大撞击力与碰撞区钢板厚度的关系。由图 16 可知:桥墩所受最大撞击力随着碰撞区

钢板厚度的增加先减小后增大。因为碰撞区钢板厚度很小时,尖端部分起不到拨开船头的作用,使得船舶动能大量作用在防撞箱上,从而使撞击力变大;当碰撞区钢板厚度太大时,虽然尖端能起到拨开船头的作用,但由于刚度越大,使撞击力增大。从防撞效果看,碰撞区钢板厚度存在一个最优值,针对本模型推荐碰撞区钢板厚度采用 10 mm。

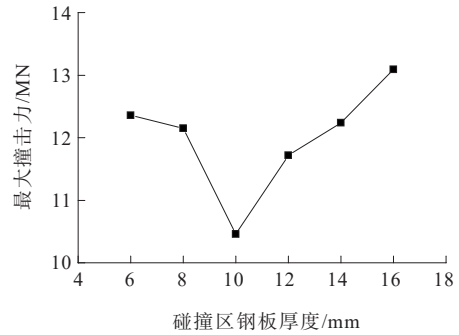


图 16 最大撞击力与碰撞区钢板厚度的关系

Figure 16 Relationship between maximum collision force and steel plate thickness of collision zone

2.6 防撞箱非碰撞区钢板厚度对撞击力的影响

碰撞区钢板厚度为 12 mm,非碰撞钢板厚度分别为 6 mm、8 mm、10 mm、12 mm、14 mm、16 mm 共 6 种工况,各工况下桥墩所受撞击力时程曲线见图 17,最大撞击力与非碰撞区钢板厚度的关系见图 18。

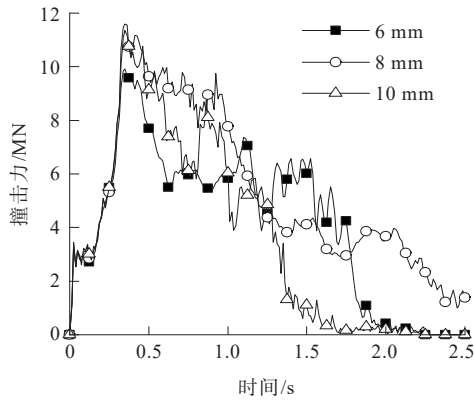
由图 17、18 可知:工况①~⑥下对应弹性阶段峰值力分别为:3.3 MN、3.4 MN、3.4 MN、3.6 MN、3.7 MN、3.7 MN;塑性阶段峰值力分别为:9.9 MN、11.4 MN、11.6 MN、11.4 MN、11.9 MN、11.8 MN,可见,弹性阶段峰值力随着厚度增加略为增大;当非碰撞区钢板厚度在 8 mm 以上时,塑性阶段峰值力基本不变,说明非碰撞区钢板厚度对塑性阶段撞击力影响较小。最大撞击力随着非碰撞区部分钢板厚度增大而呈上升趋势。当钢板厚度大于 8 mm 时,最大撞击力增大幅度逐渐降低,因此非碰撞区钢板厚度宜采用 6~8 mm。

3 结论

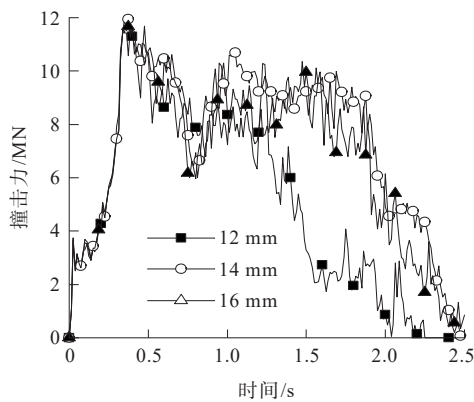
(1) 与不加防撞箱时桥墩所受的撞击力相比,防撞箱一方面延长了撞击作用时间,另一方面能拨开船头减少直接作用于防撞箱上的动能,所以显著降低了桥墩所受撞击力。

(2) 撞击力时程曲线,从变化趋势上大致分为三

个阶段。弹性阶段:撞击力急剧增大;塑性变形阶段,



(a) 钢板厚度 6~10 mm



(b) 钢板厚度 12~16 mm

图 17 非碰撞区不同钢板厚度下撞击力曲线

Figure 17 Collision force curve under different steel plate thicknesses of non-collision zone

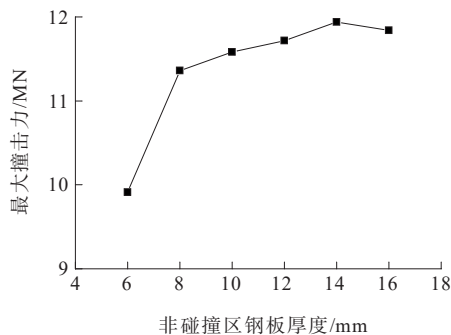


图 18 最大撞击力与非碰撞区钢板厚度的关系

Figure 18 Relationship between maximum collision force and steel plate thickness of non-collision zone

撞击力较快增大;崩溃阶段,理想情况下撞击力缓慢下降,非理想情况下撞击力先缓慢增大后急剧降低。

(3) 浮式防撞箱和桥墩的连接方式对桥墩所受撞击力有影响。将浮式防撞箱内壁节点直接固结、与桥墩外壁节点耦合连接进行模拟,都会降低桥墩所受最大撞击力。浮式防撞箱自由时,其与桥墩间

距越大,桥墩所受撞击力越大,因此在满足浮式防撞箱安装施工方便的同时,应减小间距。

(4) 桥墩所受撞击力随着防撞箱尖舱尖角的减小呈降低趋势。尖端夹角越小,越易拨开船头,使正碰转化为斜碰,显著降低桥墩所受撞击力。当夹角小于 80° 时,降低幅度减小。综合分析可得,防撞箱尖舱角度最佳取值范围为 $80^\circ\sim 100^\circ$ 。

(5) 最大撞击力随着防撞箱整体钢板厚度的增加而增大,从防护效果和经济性两方面考虑,都应该采用较薄的钢板。随着防撞箱碰撞区钢板厚度的增加,桥墩所受最大撞击力先减小后增大,碰撞区钢板厚度存在一个最优值,针对本模型碰撞区钢板厚度宜采用 10 mm。桥墩所受最大撞击力随着非碰撞区钢板厚度增大呈上升趋势,当钢板厚度大于 8 mm 时,其增大幅度逐渐降低,因此非碰撞区钢板厚度宜取 6~8 mm。

参考文献:

References:

[1] 张巍,严少波,张文明,等.薄壁桥墩防撞浮箱的设计与仿真[J].世界桥梁,2007,35(2):38-41.
ZHANG Wei, YAN Shaobo, ZHANG Wenming, et al. Design and simulation of anti-collision steel pontoon for thin-wall bridge pier[J].World Bridges,2007,35(2):38-41.

[2] 单成林,许薛军.夹层板整体曲面形桥墩防撞装置受力性能分析[J].中国公路学报,2014,27(10):46-54.
SHAN Chenglin, XU Xuejun. Analysis of mechanical properties of pier anti-collision device by sandwich plate with overall curved surface[J].China Journal of Highway and Transport,2014,27(10):46-54.

[3] 刘建成,顾永宁.桥墩塑性防撞装置的力学机理[J].上海交通大学学报,2003,37(7):990-994.
LIU Jiancheng, GU Yongning. Mechanism of plastic protection device for ship-bridge collision[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2003,37(7):990-994.

[4] 韩东,钟铁毅,信坤,等.船桥碰撞过程中桥墩塑性防撞装置性能研究[J].铁道建筑,2014,54(3):11-15.
HAN Dong, ZHONG Tieyi, XIN Kun, et al. Study on performance of plastic anti-collision device of pier suited to collision of boat against bridge pier[J]. Railway Engineering,2014,54(3):11-15.

[5] 姜华,耿波,张锡祥.桥墩新型防船撞装置防撞性能研究[J].振动与冲击,2014,33(17):154-160.

- JIANG Hua, GENG Bo, ZHANG Xixiang. A new fender system for bridge pier protection against vessel collision [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(17): 154-160.
- [6] 刘伟庆, 方海, 祝露, 等. 润扬长江公路大桥船撞数值模拟与复合材料防撞系统设计[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2014(12): 5-12.
- LIU Weiqing, FANG Hai, ZHU Lu, et al. Numerical simulation and structural design on composite anti-collision system on Runyang Changjiang River highway bridge[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2014(12): 5-12.
- [7] 冯清海, 刘明虎, 李国亮. 港珠澳大桥青州航道桥塔墩防撞数值模拟与性能分析[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2014, 38(1): 143-146, 235.
- FENG Qinghai, LIU Minghu, LI Guoliang. Numerical simulation and performance analysis for anti-collision equipment of HZM Qingzhou bridge[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2014, 38(1): 143-146, 235.
- [8] 肖波, 李军. 船桥碰撞中桥墩防撞装置性能研究[J]. *水运工程*, 2010(3): 17-20.
- XIAO Bo, LI Jun. Study on pier protective device under collision of ship and bridge[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2010(3): 17-20.
- [9] 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.
- [10] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual: Version 971[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [11] 陈诚. 桥梁设计船撞力及损伤状态仿真研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- CHEN Cheng. Study on design collision force and simulation of damage for bridge subjected to ship impact [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [12] 余葵, 刘洋, 吴俊, 等. 弧形水升降式桥梁防撞装置防撞能力研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(3): 31-35.
- YU Kui, LIU Yang, WU Jun, et al. Study on the crash capability of round bridge anti-collision setting which lifts up and down with water level[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(3): 31-35.
- [13] 陈向东, 金先龙, 杜新光. 基于并行算法的船桥碰撞数值模拟分析[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(9): 82-86, 184.
- CHEN Xiangdong, JIN Xianlong, DU Xinguang. Simulation analysis of ship-bridge collision based on parallel computing[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(9): 82-86, 184.
- [14] 金轩慧. 复合材料防撞套箱的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- JIN Xuanhui. Research of numerical simulation on the anti-collision device made by composite material[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.
- [15] 姜华, 贺拴海, 王君杰. 钢筋混凝土梁冲击试验数值模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(15): 140-145.
- JIANG Hua, HE Shuanhai, WANG Junjie. Numerical simulation of the impact test of reinforced concrete beams [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(15): 140-145.
- [16] 刘建成, 顾永宁. 基于整船整桥模型的船桥碰撞数值仿真[J]. *工程力学*, 2003, 20(5): 155-162.
- LIU Jiancheng, GU Yongning. Simulation of ship-bridge head-on collision based on finite element model of whole ship-bridge[J]. *Engineering Mechanics*, 2003, 20(5): 155-162.
- [17] 胡志强, 顾永宁, 高震, 等. 基于非线性数值模拟的船桥碰撞力快速估算[J]. *工程力学*, 2005, 22(3): 235-240, 234.
- HU Zhiqiang, GU Yongning, GAO Zhen, et al. Fast evaluation of ship-bridge collision force based on nonlinear numerical simulation[J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(3): 235-240, 234.
- [18] 李军, 王君杰, 欧碧峰. 船桥碰撞数值模拟方法研究[J]. *公路*, 2010, 55(10): 14-20.
- LI Jun, WANG Junjie, OU Bifeng. Research on numerical simulation of ship-bridge collision[J]. *Highway*, 2010, 55(10): 14-20.
- [19] European Committee for Standardization. BS EN 1991-1-7: 2006, Eurocode 1: Actions on structures Part 1-7: General actions-accidental actions due to impact and explosions[S]. Brussels: CEN, 2006.
- [20] American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide specifications and commentary for vessel collision design of highway bridges: AASHTO 2009 [S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., 2009.
- [21] 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.