

船艏结构的碰撞损伤性能研究

姜金辉, 王自力

华东船舶工业学院

船艏结构的碰撞损伤性能研究

Study on Bow's Collision Damage Behavior of Ship

姜金辉, 王自力

(华东船舶工业学院)

摘 要：船舶碰撞事故往往会引起被撞船的船体结构严重损坏，并且威胁船上人员的生命安全。在船-船碰撞中被撞船的损伤程度取决于两个方面：一是舷侧结构的碰撞性能；二是撞击船艏结构的相对刚度。船舶的艏部结构刚度一般远远高于舷侧结构的刚度，在船舶碰撞研究时，通常将撞头理想化为刚体，不考虑其损伤变形和能量吸收，这样做实际上过于保守。本文主要研究船艏结构的碰撞损伤特性，将撞击船艏作为可变形结构进行数值仿真研究。

关键词：船舶碰撞，船艏，数值仿真，非线性有限元

Abstract: Ship collision is a dangerous accident that might cause the damage of struck ship's hull and threaten crew's security. There are two aspects struck ship's damage depend on as following: the one is collision behavior of struck ship's side, and the other is the relative rigidity of striking ship. The bow's rigidity is usually much higher than side structure's, and so it is often regarded as a rigid body without distortion and energy absorption. In fact this means is too conservative. Aiming at naval ship, the bow's damage behavior is studied in this paper, considering it's real structure and distortion.

Key words: ship collision, bow of ship, numerical simulation, non-linear FEM

1 前言

船舶碰撞事故往往会引起被撞船的船体结构严重损坏，并且威胁船上人员的生命安全。如果油船遭遇另一艘大型船舶的撞击，还会引起大量的原油泄漏，从而使附近海域的环境受到严重污染。因此船舶的碰撞安全性问题在国际上受到普遍重视。在船-船碰撞中被撞船的损伤程度一般取决于两个方面：一是舷侧结构的碰撞性能；二是撞击船艏结构的相对刚度^[1]。

目前对于船-船相撞的研究中，一般从舷侧结构的角度来研究船舶的碰撞性能和改进船

船舶碰撞性, 比如提出了双壳、中甲板等概念的新型舷侧结构, 很少对碰撞中船舶的变形损伤及吸能进行研究。船舶的艏部结构刚度一般远远高于舷侧结构的刚度, 在船舶碰撞研究时, 通常将艏部结构理想化成刚性体, 不考虑艏部的变形和吸能, 这样做虽然偏安全, 但过于保守。事实上, 碰撞双方的结构都将发生损伤, 其中船舶结构的碰撞损伤特性, 如结构形式、相对刚度和吸能特性是影响碰撞过程中双方结构损伤程度的重要因素。因此对船舶结构的损伤特性进行研究具有重要意义。

本文应用非线性有限元动态响应分析程序 MSC. Dytran^[2]对某船的艏部结构进行了研究, 分析了船舶结构的碰撞的损伤性能。

2 艏部模型的描述

文中研究的艏部模型取自某船。

在研究中, 假定船以 8 米 / 秒 (15.6 节) 速度垂直撞击固定的刚性墙。撞击发生在船艏部的最前端 (见图 1), 计算开始时船艏与刚性墙之间有一段初始间隙。刚性墙可以看作是一大型结构物 (如海洋平台、桥墩、码头等) 的简化模型, 尺寸取为 12 米 \times 15 米 \times 2 米, 有限元模型采用 8 节点体单元, 材料采用刚性材料。

船舶模型取艏柱至 15#肋位处的一段船体, 有限元采用 4 节点壳单元, 材料采用线性强化弹塑性模型, 考虑材料应变率敏感性。



图 1 碰撞模型

Fig. 1 Collision model

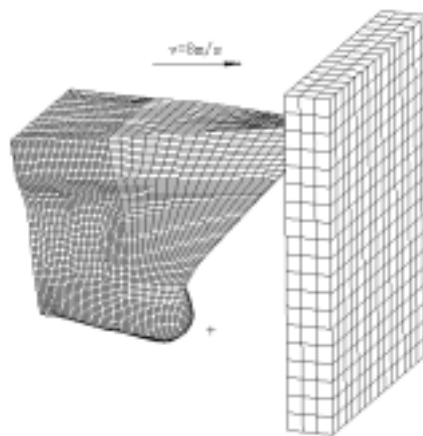


图 2 有限元模型

Fig2 F.E. model of collision

3 计算结果及分析

利用大型非线性有限元动态响应分析程序 MSC. Dytran 对上述碰撞模型进行数值仿真。计算进行至 220,000 步, 可跟踪计算的碰撞持续时间为 0.671 s, 此时艏部的最大变形量约为 4.1 米。计算结果及其分析如下:

3.1 撞击后船舶的运动

船以 8 米 / 秒初速度撞击刚性墙, 从艏部位移曲线可以看出, 位移曲线在前面 0.4 秒时间内斜率保持稳定, 0.4 秒以后曲线的斜率有明显的降低, 这是撞击速度已显著下降的缘故。从艏部速度曲线中可以看出, 由于艏部变形 (主要是塑性变形) 吸收了大量的碰撞动能, 撞

击速度很快减小，同时产生了很大的碰撞力。在大约 0.1 ~ 0.2 秒、0.4 ~ 0.6 秒区间速度下降比较快，而在 0 ~ 0.1 秒和 0.2 ~ 0.4 秒区间速度下降得比较缓慢。这可从碰撞力时间历程曲线得到解释，在速度下降快的区间对应的碰撞力较大，在速度下降慢的区间对应的碰撞力较小。

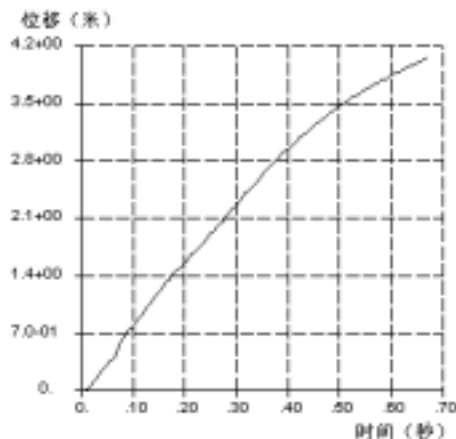


图 3 艏部位移曲线

Fig3 Displacement curve of the bow

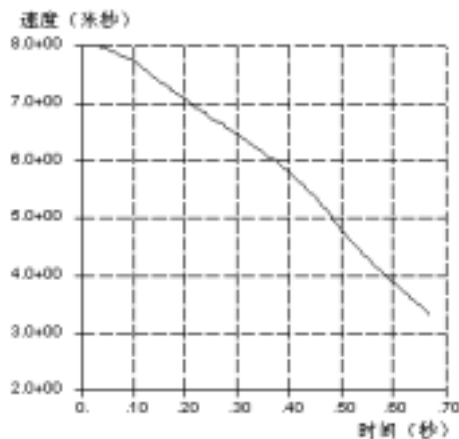


图 4 艏部速度曲线

Fig4 Velocity curve of the bow

计算终止时撞头的速度从初始值 8 米/秒降为了 3.3 米/秒，碰撞过程还没有结束，但动能已经损耗将尽了。计算结束时撞头的剩余动能为 8MJ，占初始动能 47MJ 的 17%，而艏部的最大变形达到了 4.10 米。

$$E_{ini} = \frac{1}{2}mv_{ini}^2 = \frac{1470 \times 8^2 \times 1000}{2} = 47MJ$$

$$E_{end} = \frac{1}{2}mv_{end}^2 = \frac{1470 \times 3.3^2 \times 1000}{2} = 8MJ$$

3.2 艏部结构损伤变形

图 5 给出了艏部结构损伤变形时序结果。从图中可以看出，随着碰撞过程的进行，撞击船艏被刚性墙压溃了，变形具有动态屈曲特征，最后一图还给出了船艏内部结构的变形情况。可以看到，由于上面的部分外伸较长，所以船艏的甲板从上至下依次参与碰撞压溃。离撞击点较近的一、二层甲板被压皱，变形中还包含了弯曲变形模式，上部的船艏外板发生了大的扭曲变形，主要是弯曲变形（包括面内弯曲和面外弯曲）和拉伸变形，甲板纵骨、外板纵骨也出现了屈曲现象；相比之下，离撞击点较远的三、四层甲板、下半部分船艏外板及球鼻艏变形比较小。可以认为，结构的损伤变形基本上集中在撞击区域附近，这与舷侧结构的损伤变形特性相近，但由于艏部结构形式与舷侧结构明显不同，所以艏部碰撞损伤的局部性不如舷侧结构明显。

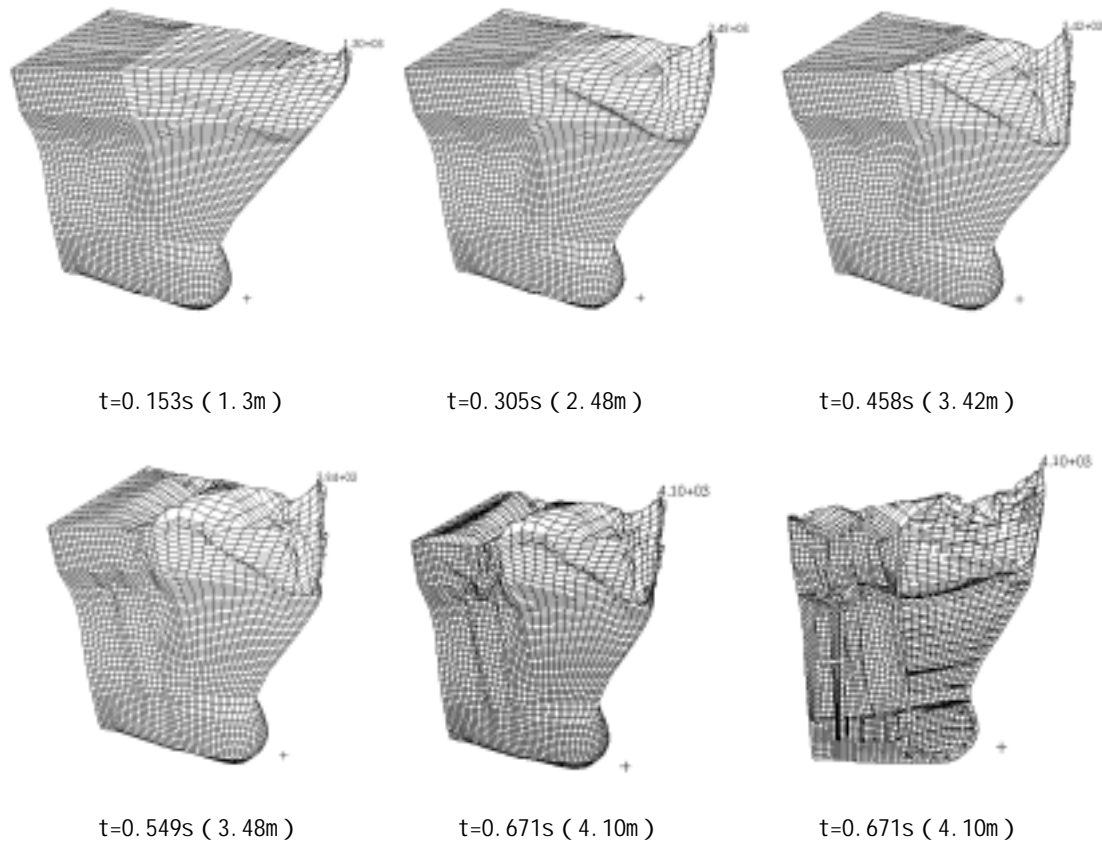


图 5 艏部结构碰撞损伤变形时序结果

Fig. 5 Bow structure deformation sequence of numerical simulation

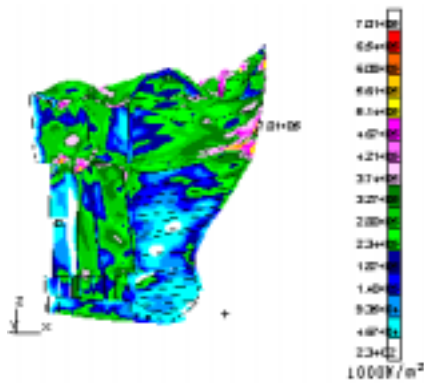


图 6 艏部结构碰撞损伤应力分布图 (t=0.671s)

Fig. 6 Stress of the bow (t=0.671s)

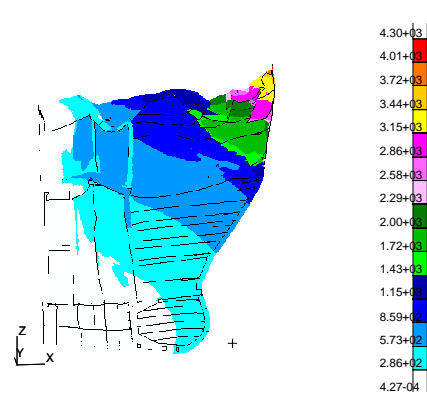


图 7 艏部结构碰撞损伤变形分布图 (t=0.671s)

Fig. 7 Deformation of the bow (t=0.671s)

3.3 艏部的等效应力及应变

图 6 为 0.671 秒时碰撞船艏的应力分布图，图 7 给出了同一时间的损伤变形分布图。从图中可以看出，船艏的碰撞部分的一些单元已经超过了屈服应力 $2.35 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 而进入了塑性状态，而球鼻艏部分的应力在 $10^2 \text{ N/m}^2 \sim 10^4 \text{ N/m}^2$ 数量级之间，还远没有达到屈服。从图 7 的损伤变形图也可以看出，碰撞损伤主要集中在船艏的前端伸出部分，这主要是由于与船艏

相撞的是某一固定的大型结构物,如果船艏与另一艘船舶的舷侧发生碰撞,接触碰撞部分将主要是球鼻艏结构,应力分布和损伤变形也将完全不同。

3.4 碰撞力

图 8 表示了艏部碰撞力—撞深的变化曲线,从图中可以看出,碰撞力具有明显的非线性,随着艏部撞深的增加,出现了多次卸载现象。碰撞开始以后,艏部外板、第一层甲板及其上的加强构件首先发挥了抵抗作用,碰撞力迅速增加;随着第一层甲板和外板发生屈曲,碰撞力有所下降;随后,碰撞区域扩大,参与变形的面积不断增加,变形逐渐扩大到了几乎整个艏部(球鼻艏变形很小),涉及到了第二、三层甲板,纵舱壁以及它们相连的构件,这使得碰撞力又有所增加,特别是当撞击部位的外板发生了较大侧向变形被压溃时,碰撞的接触面积进一步增大,碰撞力迅速增加,再次发挥了强大的抵抗作用。

图 8 基本上反映了艏部结构的碰撞损伤过程,通过查阅对应时刻的结构变形图和应力分布云图,可知曲线上各个峰谷点大致对应于:

- 1——艏部外板开始发生屈曲变形;
- 2——艏尖舱被压溃;
- 3——外板纵骨发生侧向变形,一甲板出现屈曲变形;
- 4——一甲板被压溃;
- 5——外板发生侧向扭曲变形,碰撞接触面积增大;
- 6——二甲板被压溃。

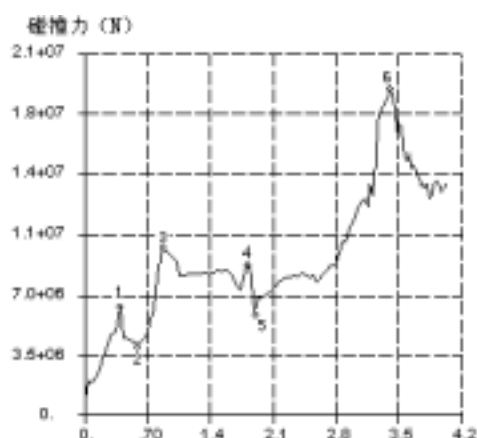


图 8 碰撞力—撞深曲线

Fig.8 Curve of collision force-penetration

3.5 能量吸收

图 9 表示了碰撞过程中艏部构件塑性变形能随撞深的变化曲线,它也反映了船舶在与大型海洋结构物发生垂直碰撞时艏部结构的能量吸收性能。从图中可以看出,艏部的外板和甲板是主要的吸能构件,纵骨吸能较少。在碰撞初期,外板和甲板的能量吸收几乎相同。随着撞深的进一步增加,甲板发生了屈曲,吸能增加有限了,但与外板吸能曲线的趋势基本一致;而外板随着撞深增加,参与变形的范围不断扩大,程度不断加深,吸收能量随之增加,吸能占了总能量的一半,成为了最主要的吸能构件。

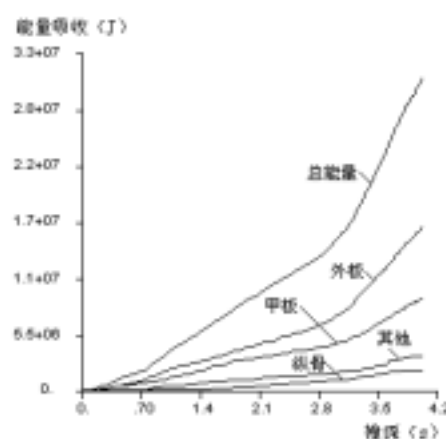


图 9 舰艏能量吸收

Fig.9 Energy absorption curves of the bow

表 1 给出了最大变形量达到 4.10 米时各构件的能量吸收情况,它反映了艏部结构发生碰撞时各个构件的吸能能力。

表 1 构件的吸能能力

Table 1 Energy absorption capacity of the bow's components

序号	构件名称	能量吸收 (MJ)	百分比 (%)
1	外板	16.12	52.4
2	甲板	9.10	29.6
3	纵骨	6.70	6.7
4	其它	3.48	11.3
5	总吸能	30.76	100

4 结论

本文研究了某船碰撞中艏部结构的损伤特性,将一般分析中作刚体处理的艏部用真实的材料特性及结构形式来分析,通过非线性有限元技术对其进行了数值仿真研究,得到了一些艏部变形的规律。

(1) 艏部在与高大结构物发生碰撞时,前部外伸部分将是主要的碰撞接触位置,艏部将发生屈曲及塑性大变形。

(2) 艏部结构的碰撞损伤具有局部性,但不如舷侧结构的局部性明显。

参考文献

- [1] 江华涛. 船舶碰撞与缓冲船首结构研究. [学位]. 上海交通大学, 2002
- [2] MSC. Dytran USER' S MANUAL, Version 4.0, 1997, The Macneal -schwendler Corporation