

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.06.012

## 转筒式钢-复合材料套箱防船撞性能研究\*

陈巍<sup>1</sup>, 耿波<sup>2</sup>, 沈锐利<sup>1</sup>, 李嵩林<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067)

**摘要:** 转筒式钢-复合材料套箱是一种新型防船撞设施。采用PATRAN软件建立该新型防船撞设施及船舶的精细化有限元模型, 并采用LS-DYNA软件进行动力响应分析, 基于“分层耗能”的优化思想对该新型防船撞设施进行参数优化, 并设置了船舶正撞和15°斜撞两种对比计算工况, 选用3000DWT典型代表船舶以4.0 m/s初速度进行数值仿真计算。结果表明: 套箱内部竖向和横向板件布置间距为0.8 m、钢板厚度为8 mm时, 套箱的船撞力折减率为47.3%, 损伤变形量为1.42 m, 综合防船撞性能比其他布置形式更优; 设置外层护舷层和中间钢结构层不同的厚度比例计算工况, 当两者厚度比例为1:1时, 套箱的船撞力折减率为48.9%、损伤变形量为1.27 m、总造价为185万元, 在总造价最低的同时其防船撞性能最优; 碰撞结束后, 正撞工况下船舶的初始动能全部转化为其它形式的能量, 而斜撞工况下仍有50%左右的初始动能停留在船舶上、船舶可继续航行, 碰撞造成的船艏损伤变形量分别为3.8、0.4 m, 则该新型防船撞设施能通过自身旋转拨转船头, 大大降低了碰撞造成的船艏损伤程度。

**关键词:** 转筒式钢-复合材料套箱; 参数优化; 数值仿真; 船撞力折减率; 损伤变形; 拨转船头

**中图分类号:** U443.26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)06-0936-09

## Study on Anti-collision Performance of Rotary Cylinder Typed Steel Composite Boxed Cofferdam

CHEN Wei<sup>1</sup>, GENG Bo<sup>2</sup>, SHEN Ruili<sup>1</sup>, LI Songlin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Chongqing Transportation Research and Design Institute Co. LTD, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** The rotary cylinder steel typed composite boxed cofferdam is a new kind of anti-collision device. The software PATRAN was included to build the refined finite element model of the anti-collision device and ships. In addition, the software LS-DYNA was adopted to conduct dynamic response analysis. The parameters of the device were optimized based on the optimal theory of layer dissipation. In addition, two collision scenarios including front crash and oblique crash were analyzed in this paper. A typical ship of 3000DWT with an initial speed of 4.0 m/s was involved in the numerical simulation. Results show that the boxed cofferdam has a better anti-collision performance when the vertical spacing and transverse spacing of the inner stiffening

\* 收稿日期:2018-12-17;修回日期:2019-04-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0806000)、广东省交通运输厅科技计划项目(2016-02-005)资助

作者简介:陈巍(1991-),男,博士研究生。主要从事桥梁防灾减灾研究。Email:782851112@qq.com

通讯作者:沈锐利(1963-),男,教授,博导,博士。主要从事大跨桥梁结构分析理论与工程实践研究。

Email:rlshen@swjtu.edu.cn

rib are both 0.8m and the thickness of the steel plate is 8.0mm. At that time, the reduction rate of the collision force on the boxed cofferdam is 47.3% and the damage deformation is 1.42 cm. The working conditions with different thickness rates of the outer fender layer and the inner steel structure were conducted. Results indicate that the boxed cofferdam achieves optimal anti-collision performance with the thickness rate is 1 to 1 at the lowest cost of 1.85 million yuan. At this time, the reduction rate of the boxed cofferdam is 48.9% and the damage deformation is 1.27 m. The initial kinetic energy transfers totally to other types under the condition of front crash collision while there is still 50% of the initial kinetic energy in the ship under the condition of oblique crash. The damage deformations at the vessel bow under the two conditions are 3.8 m and 0.4 m, respectively. This new kind of anti-collision device can greatly reduce the vessel bow damage by self-rotation.

**Keywords:** rotary cylinder typed steel composite boxed cofferdam; parameter optimization; numerical simulation; reduction rate of the collision force; damage deformation; adjusting vessel bow

## 引言

近年来我国兴建大量跨越繁忙航道的桥梁,随着通航密度的不断提高,加上桥区环境的改变,导致船撞桥事故屡见不鲜<sup>[1]</sup>,给人们的生命财产安全造成极大的威胁。针对桥梁防船撞问题科研学者开展了大量研究工作,取得了一些研究成果<sup>[2-5]</sup>。

拱式桥是桥梁工程中应用较为广泛的一种桥型,具有受力明确、跨越能力强、施工技术成熟等优点<sup>[6]</sup>。拱式桥主拱圈结构抗力较低,抵抗船舶及漂流物撞击的能力较差,当桥区水位较高时,主拱圈拱脚部位受船舶碰撞的风险较高。历史上已有类似的船撞事故发生,如瑞典哥德堡群岛阿尔莫桥的钢管拱基座被一艘千吨级的货轮撞击,造成钢管拱倒塌,上部结构坍塌在货轮上,事故造成10余人死亡<sup>[1]</sup>。因此,对拱桥主拱圈实施防船撞保护意义重大。主拱圈结构形式较特殊,无法采用传统的一体式防船撞系统对其进行保护,需采用独立式防船撞系统进行防护。

基于该工程背景,本文提出了一种新型独立式防船撞设施,即转筒式防船撞设施对拱桥主拱圈进行防船撞保护,并采用数值仿真分析的方法对该新型防船撞设施进行参数优化,得到防船撞性能最优的结构形式。目前,该新型防船撞设施在实际工程上有所应用,但并没有对其防船撞性能展开深入研究,本文的研究可为其实际工程应用提供支撑。

## 1 有限元模型建立

船舶直接撞击会对桥梁结构造成较大的损伤,影响桥梁结构的安全性能,故不允许开展实船撞击实桥试验来研究船撞问题,即使是模型试验,也因为规模和经费问题开展较少。近年来,数值仿真分析法成为研究船撞问题的主流方法<sup>[7]</sup>。有限元分析软件LS-DYNA具有强大的显示动力分析模块,在结构动力仿真计算领域具有明显的优势<sup>[8]</sup>。

### 1.1 工程背景

广州南沙凤凰二桥主桥是一座上承式混凝土葵花形拱桥,主墩位于主航道中,通过桥区水道的船舶类型较多,易遭受船舶的撞击。因此,需要对主桥受船舶撞击风险较高的桥墩进行有效防撞保护。针对桥墩墩型及通航条件,采取转筒式钢-复合材料套箱对其进行防撞保护。凤凰二桥主桥的桥型布置及防撞设施安装效果如图1~2所示。

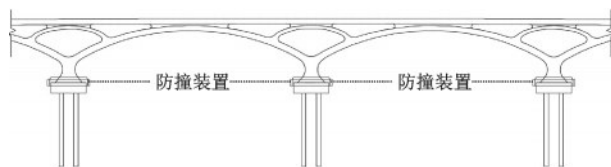


图1 凤凰二桥主桥桥型布置

Fig.1 Main bridge layout of Fenghuang Erqiao

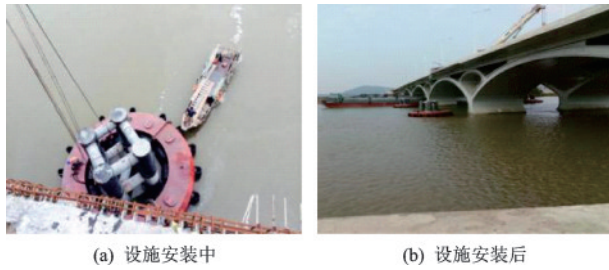


图2 转筒式防船撞设施实际工程应用  
Fig.2 Practical engineering application of the rotating cylinder anti-collision device

### 1.2 转筒式防撞设施简介

转筒式防船撞设施由钢-复合材料套箱和导向柱两部分组成。套箱为圆形浮箱,可随水位变化上下浮动,以适应各种水位条件下的防船撞要求,它由护舷层、钢结构层、垫圈层三层构成,护舷层和垫圈层的材料为FRP复合材料,钢结构层的材料为Q235钢材。导向柱为普通钢管混凝土结构,材料为C30混凝土、HRB400钢筋及Q235钢材。防撞套箱的作用是通过自身的变形吸能来延长碰撞时间,从而减小碰撞造成的结构损伤。导向柱的作用是固定防撞套箱并抵抗由防撞套箱传递来的船舶撞击力。转筒式防船撞设施适用于桥区水位落差较大桥梁的防船撞保护<sup>[9]</sup>,其整体构造及钢-复合材料套箱内部构造如图3所示。

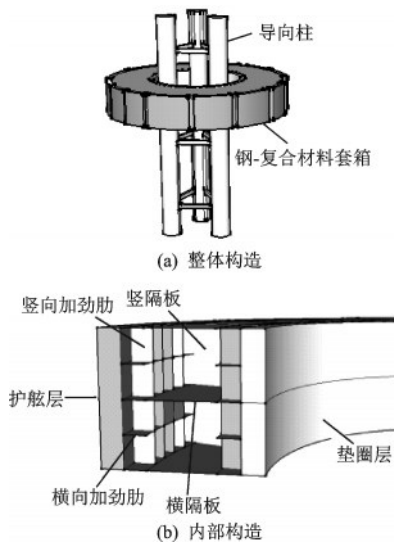


图3 转筒式防船撞设施构造  
Fig.3 Construction of anti-collision device

### 1.3 材料本构参数

船舶与防撞设施的碰撞主要发生在船艏部位,

船身变形很小,对动力响应结果影响较小。故船艏部位及防撞套箱的钢材选用随动强化弹塑性材料本构(MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC),对于船身部分的钢材选用刚体材料本构(MAT\_RIGID),材料本构参数的具体取值见表1。钢材的刚体本构参数取表1前三项。

表1 随动强化弹塑性材料本构参数<sup>[10]</sup>

Table 1 Constitutive parameters of kinematic hardening elasto-plastic material<sup>[10]</sup>

参数	$D/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$E/$ GPa	$PR$	$SIGY/$ GPa	$ETAN/$ GPa	$C$	$P$
取值	7 800	210	0.3	0.238	1.18	40	5.0

注: $D$ 为材料密度; $E$ 为弹性模量; $PR$ 为泊松比; $SIGY$ 为屈服应力; $ETAN$ 为切线模量; $C$ 、 $P$ 为Cowper-Symonds参数

混凝土在碰撞过程中会发生破坏,故材料选用HJC损伤本构(MAT\_JOHNSON\_CONCRETE),具体参数取值见表2。

表2 HJC损伤本构参数<sup>[11]</sup>

Table 2 Constitutive parameters of HJC damage<sup>[11]</sup>

参数	取值	参数	取值
$D/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 500	$C$	0.007
$E/\text{GPa}$	30	$N$	0.61
$PR$	0.17	$FC/\text{MPa}$	15
$A$	0.79	$T/\text{MPa}$	4
$B$	1.6	$EPSO$	1.00E+05
$EF_{\min}$	0.01	$UL$	0.1
$SF_{\max}$	7	$D1$	0.004
$PC/\text{MPa}$	16	$D2$	1
$UC$	0.001	$K1$	8.50E+10
$PL/\text{GPa}$	0.8	$K2$	-1.71E+11

注: $A$ 为标准化的凝聚力强度; $B$ 为压力硬化小数; $EF_{\min}$ 为断裂应变; $SF_{\max}$ 为最大标准化等效应力; $C$ 为应变率小数; $N$ 为压力硬化指数; $FC$ 为静态抗压强度; $T$ 为拉伸强度; $PC$ 为弹性极限静水压力; $UC$ 为 $PC$ 对应的体积应变; $PL$ 为压实静水体积压力; $UL$ 为 $PL$ 对应的体积应变; $D1$ 、 $D2$ 为损伤程度参数; $K1$ 、 $K2$ 表示状态方程参数

针对FRP复合材料的本构参数,D. Rakshit等<sup>[12]</sup>研究了FRP复合材料的断裂韧性及断裂参数。潘晋等<sup>[13]</sup>开展了复合材料性能测试试验,通过材料拉伸及压缩试验测得复合材料的弹性模量为11.3 GPa;金轩慧<sup>[14]</sup>通过复合材料套箱的撞击试验得到复合材料的弹性模量为10 GPa左右、泊松比为0.2左右,复合材料的应力-应变曲线在试验过程中

呈纯弹性变化,其试验结果见表3。参考相关试验结果,本文选用弹性材料本构作为FRP复合材料的本构参数模型,其中材料密度取 $1800\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量取 $10\text{ GPa}$ ,泊松比取 $0.17$ ;HRB400钢筋密度取 $7800\text{ kg/m}^3$ ,泊松比取 $0.3$ ,抗拉强度取 $360\text{ MPa}$ 。

表3 FRP复合材料本构参数试验值<sup>[14]</sup>

Table 3 Experimental values of FRP composite constitutive parameters<sup>[14]</sup>

套箱材料类型	本构模型	弹性模量/GPa	泊松比
复合材料	弹性本构	10	0.2

#### 1.4 模型建立

防船撞设施和船舶主要采用SOLID实体单元、SHELL壳单元及BEAM梁单元模拟。以3000DWT船舶为数值仿真计算的典型代表船舶,船舶、钢-复合材料套箱、导向柱尺寸见表4~6。

表4 船舶尺寸

Table 4 Size of ship

船舶类型	型长/m	型宽/m	型深/m	单位:m
				吃水深度/m
3000DWT散货船	92.00	15.20	6.93	4.00

表5 套箱尺寸

Table 5 Size of boxed cofferdam

套箱材料	加劲肋宽	外径	内径	高度
钢-复合材料	0.2	8.08	4.58	3.00

表6 导向柱尺寸

Table 6 Size of guide column

导向柱材料	钢管壁厚/cm	钢管直径/m	横系梁横截面/m <sup>2</sup>
钢管混凝土	2.0	2.5	$1.0 \times 1.0$

导向柱底部施加固结边界约束,土体对导向柱的侧向约束作用采用土弹簧模拟,土弹簧的刚度值由《公路桥涵地基与基础设计规范》<sup>[15]</sup>中的“m法”计算得到。碰撞过程中涉及大量的接触问题,本文计算中接触对的设置情况见表7,其中各接触面间滑动摩擦系数的取值参考相关文献选取,具体见表8。

碰撞分析的有限元模型如图4所示。

表7 碰撞接触对设置

Table 7 Impact contact setting

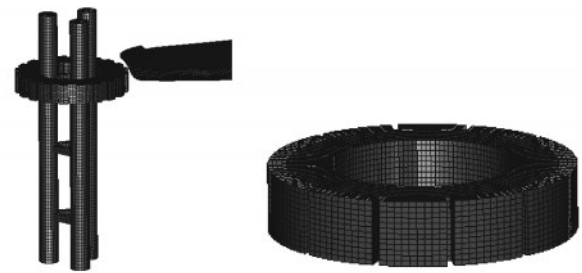
接触形式	船舶内部	船舶—套箱外层	套箱内部	套箱内层—导向柱
自接触	—	—	—	—
面面接触	—	—	—	—

注:表中“—”代表设置接触对

表8 接触面摩擦系数<sup>[3,16]</sup>

Table 8 Friction coefficients of the contact surface<sup>[3,16]</sup>

材料	钢材	FRP	混凝土
钢材	0.30	0.25	0.25
FRP	0.25	0.23	0.22



(a) 船舶撞击转筒式防船撞设施 (b) 钢-复合材料套箱

图4 碰撞分析的有限元模型

Fig.4 Finite element model of the crash

## 2 钢-复合材料套箱参数分析

钢-复合材料套箱的构造形式直接影响其整体刚度及变形吸能的效果,合理的构造形式将显著提高其防船撞性能。从套箱内部钢板的布置间距、各钢板的厚度、FRP复合材料护舷层和钢结构层的厚度比例三个方面对钢-复合材料套箱进行参数优化。采用3000DWT吨位的船舶以 $4.0\text{ m/s}$ 的初速度正撞各形式下的防船撞设施(给定船舶一定的初速度,使其缓慢撞上防撞装置,通过船舶与防撞装置间发生面面接触,从而产生船舶撞击力、能量交换及船舶与防撞装置的损伤变形),对各计算工况下防船撞设施的防船撞性能进行综合评估,最后确定合理的构造形式,完成该新型防船撞设施的参数优化。

### 2.1 竖隔板及竖向加劲肋的布置间距

竖向板件间距布置的过于密集不仅造成材料浪费,还会造成套箱刚度过大、吸能效果差且碰撞

使船艏损伤严重。布置的过于稀疏又会使套箱的整体刚度过小,碰撞造成套箱自身的损伤过大。确定合理的布置间距对套箱的优化至关重要。

本工况数值仿真计算中,外层护舷和内层垫圈厚度取 0.5 m,横隔板及横向加劲肋的布置间距取 0.6 m,钢板的厚度取 8 mm。通过改变竖隔板和竖向加劲肋的布置间距,设置间距为 0.6、0.8、1.0、1.2 m 四种计算工况,计算结果见表 9。

表 9 不同竖向布置间距的计算结果

Table 9 Statistics of different vertical distances

布置间距/m	船撞力峰值/MN	船撞力折减率/%	总吸能/MJ	吸能比/%	套箱变形/m
0.6	11.2	39.8	7.8	22.3	1.19
0.8	10.1	45.7	9.4	26.5	1.25
1.0	9.5	48.9	10.4	29.7	1.90
1.2	9.2	50.5	12.2	34.9	2.00

计算结果中船撞力折减率、套箱吸能比、套箱损伤变形量随竖隔板和竖向加劲肋布置间距的变化情况如图 5 所示。

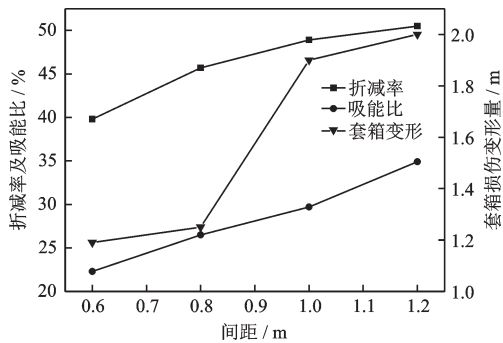


图 5 不同竖向布置间距的计算结果走势

Fig.5 Trend of vertical distance

计算结果显示,随着竖隔板及竖向加劲肋布置间距的增大,防船撞设施的船撞力折减率及变形吸能能力增大。此外,套箱整体刚度减小,碰撞造成的套箱损伤变形量增大。当布置间距超过 1.0 m 时,套箱的变形量超过 1.9 m,钢结构层几乎被压溃。

综合考虑船撞力折减率、套箱吸能情况及损伤变形情况,确定竖向板件的布置间距为 0.8 m。此时套箱的船撞力折减率达到 45.7%,吸能比达到 26.5%,套箱损伤变形量只有 1.25 m,在具备良好船撞力折减率和吸能效果的同时,套箱整体刚度适宜、损伤程度不大,该布置间距最为合理。

## 2.2 横隔板及横向加劲肋的布置间距

横向板件布置间距对防船撞设施防船撞性能的影响情况与竖向板件布置间距类似。通过数值仿真计算确定横隔板和横向加劲肋的布置间距。

本工况数值仿真计算中,外层护舷和内层垫圈厚度取 0.5 m,竖隔板及竖向加劲肋的布置间距取上节中确定的 0.8 m,钢板的厚度取 8 mm。通过改变横隔板和横向加劲肋的布置间距,设置间距为 0.6、0.8、1.0、1.2 m 四种计算工况,计算结果见表 10。

表 10 不同横向布置间距的计算结果

Table 10 Statistics of different transverse distances

布置间距/m	船撞力峰值/MN	船撞力折减率/%	总吸能/MJ	吸能比/%	套箱变形/m
0.6	10.1	45.7	9.4	26.5	1.25
0.8	9.8	47.3	11.6	33.1	1.42
1.0	9.0	51.6	12.3	35.1	1.95
1.2	8.7	53.2	12.9	36.9	2.00

计算结果中船撞力折减率、套箱吸能比、套箱损伤变形量随横隔板和横向加劲肋布置间距的变化情况如图 6 所示。

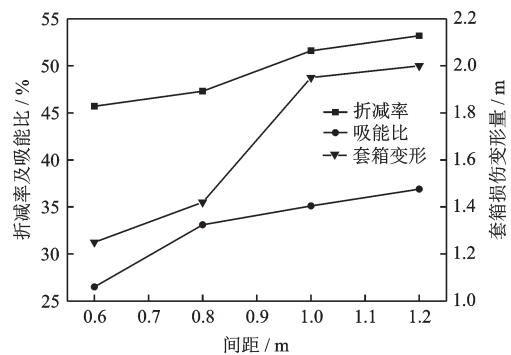


图 6 不同横向布置间距的计算结果走势

Fig.6 Trend of transverse distances

计算结果显示,横隔板及横向加劲肋的布置间距对船撞力折减率、套箱吸能比及自身损伤的影响情况与竖向板件布置间距类似。当布置间距超过 1.0 m 时,套箱的变形量达到 1.95 m,钢结构层几乎被压溃。综合考虑船撞力折减率、套箱吸能情况及损伤变形情况,确定横向板件的布置间距为 0.8 m。此时,套箱的船撞力折减率达到 47.3%,吸能比达到 33.1%,套箱损伤变形量只有 1.42 m,在具备良好的船撞力折减率和吸能效果的同时,套箱整体刚度适

宜、损伤程度不大,该布置间距最为合理。

### 2.3 钢板厚度

确定了套箱内部钢板横向布置间距和竖向布置间距后需要确定套箱各钢板的厚度。保持套箱内部钢板的横向间距0.8 m、竖向间距0.8 m不变,外层护舷和内层垫圈厚度取0.5 m,通过改变钢板的厚度,设置了厚度为4、6、8、10 mm四种计算工况,数值仿真计算结果见表11。

表 11 不同钢板厚度的计算结果

钢板厚度/mm	船撞力峰值/MN	船撞力折减率/%	总吸能/MJ	吸能比/%	套箱变形量/m
4	7.5	59.7	14.20	40.6	2.00
6	8.8	52.7	12.60	36.0	1.82
8	9.8	47.3	11.60	33.1	1.42
10	12.1	34.9	0.28	0.8	0.51

计算结果中船撞力折减率、套箱吸能比、套箱损伤变形量随钢板厚度的变化情况如图7所示。

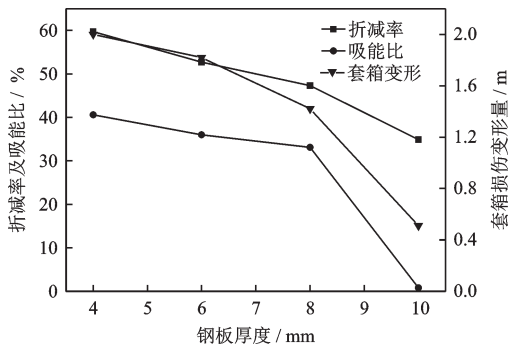


图7 不同钢板厚度的计算结果走势  
Fig.7 Trend of steel plate thickness

计算结果显示,钢板厚度对套箱的防船撞性能影响很大。钢板厚度取4 mm时,船撞力折减率达到59.7%,吸能比达到40.6%,但套箱损伤变形量达到2 m,套箱损伤十分严重;钢板厚度取10 mm时,套箱钢结构层几乎不变形,船撞力折减率只有34.9%,吸能效果很差。可见这两种厚度形式都是不合理的。综合考虑后确定钢板厚度为8 mm,此时,船撞力折减率为47.3%,吸能比为33.1%,套箱损伤变形量为1.42 m,厚度最为合理。

### 2.4 护舷层厚度

保持钢结构层和护舷层总厚度为3.0 m不变,改

变钢结构层和护舷层的相对厚度,从而确定出造价低、船撞力折减效果好、套箱损伤程度小的厚度比例形式。内部加劲肋、加劲板的间距取0.8 m,各钢板厚度取8 mm,内层垫圈对套箱的防船撞性能影响较小,取0.5 m厚度不变。设置钢结构层和复合材料护舷层的厚度比例分别为5:1、7:3、6:4、1:1、4:6、3:7六种工况,即护舷层的厚度分别为0.5、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1 m,数值仿真计算结果见表12。

表 12 不同护舷层厚度的计算结果

护舷层厚度/m	最大船撞力/MN	船撞力折减率/%	套箱变形量/m
0.5	9.80	47.3	1.42
0.9	9.79	47.3	1.18
1.2	9.66	48.1	1.13
1.5	9.51	48.9	1.27
1.8	9.42	49.4	1.36
2.1	9.15	50.8	1.48

统计出每种厚度比例工况中套箱的钢材用量及FRP复合材料用量,钢材按2万元每吨、FRP复合材料按10万元每吨的单价(含加工、运输等费用),可大致计算出套箱的总造价,统计情况见表13。

表 13 套箱总造价

护舷层厚度/m	钢材用量/吨	复合材料用量/吨	总造价/万元
0.5	39.21	11.81	197
0.9	34.82	12.34	193
1.2	31.10	12.48	187
1.5	27.99	12.90	185
1.8	24.91	14.44	194
2.1	21.19	16.14	204

碰撞结束后护舷层的压缩情况见表14。

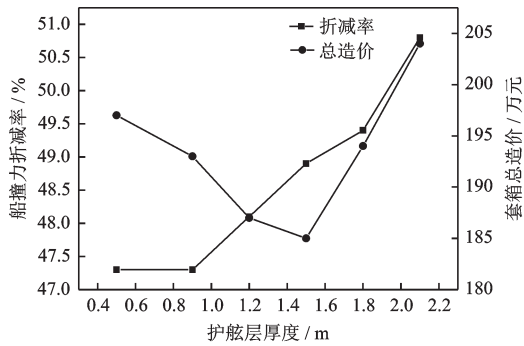
计算结果中船撞力折减率、套箱损伤变形、护舷压缩率、套箱总造价随护舷层厚度的变化情况如图8所示。

计算结果显示,钢结构层和复合材料护舷层的厚度比例为1:1,即护舷层的厚度为1.5 m时,船撞力折减率达到48.9%,套箱总变形量为1.27 m,护舷层的压缩率为84.7%,套箱的总造价为185万。综合考虑船撞力折减率、套箱损伤程度、套箱总造价,

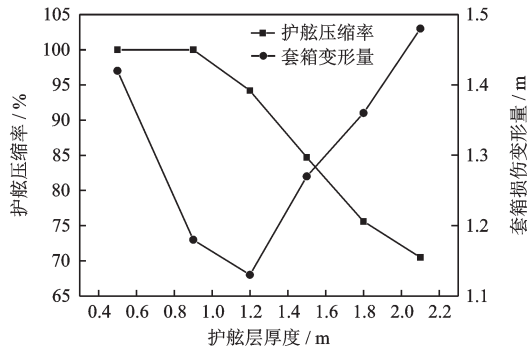
表 14 护舷层压缩量统计

Table 14 Statistics of compression ratio

护舷层厚度/m	套箱最大变形量/m	护舷层变形量/m	钢结构层变形量/m	护舷层压缩率/%
0.5	1.42	0.50	0.92	100.0
0.9	1.18	0.90	0.28	100.0
1.2	1.13	1.13	0	94.2
1.5	1.27	1.27	0	84.7
1.8	1.36	1.36	0	75.6
2.1	1.48	1.48	0	70.5



(a) 船撞力折减率及总造价



(b) 护舷层压缩率及套箱变形量

图 8 不同护舷层厚度的计算结果走势

Fig.8 Trend of fender thickness

确定该比例为钢结构层和复合材料护舷层的厚度比例形式。此外,由护舷层的压缩率可以看出,当护舷层厚度大于1.2 m时,套箱的总变形量小于外层护舷的厚度,说明由护舷层的单独变形吸能就可以达到拦截船舶的效果。当护舷层厚度小于1.2 m时,套箱的总变形量大于护舷层的厚度,护舷层的压缩率达到100%,说明此时需要由护舷层和钢结构层共同变形吸能才能起到拦截船舶的效果,即能量通过层层吸收,从而实现“分层耗能”。

有限元计算中,“分层耗能”是通过防撞设施的吸能情况来体现的,以上述工况中(表7中工况1)的一组吸能曲线作进一步说明。图9为钢结构层的吸

能时程曲线,对比其它计算工况,该工况下钢结构层并未达到最佳吸能状态,文献[17]详细给出了其它工况下防撞设施的吸能情况。参数优化的目标就是提高防船撞设施各层的吸能效果,充分发挥各层材料的吸能能力,使能量经过层层吸收,最终以耗散,这便是“分层耗能”的优化思想。

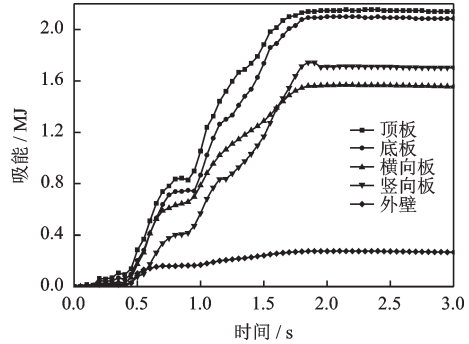


图9 套箱钢结构层吸能时程曲线

Fig.9 Energy absorption time-history curves of the steel structure layer in the boxed cofferdam

### 3 正、斜撞对比分析

转筒式钢-复合材料套箱相对于普通的防撞套箱,其主要创新在于套箱可以通过自身的旋转拨转船头,使船舶远离桥梁结构,降低桥梁结构遭受船舶撞击的风险。碰撞结束后使船舶的初始能量尽可能多的留在船舶上,而不是由船舶及防撞设施变形吸收,这与桥梁防撞设施的“双保护”设计思想相吻合。为展现该新型防撞设施这一独特优势,设置了船舶正撞和15°斜撞两种对比计算工况,正撞、15°斜撞的碰撞示意如图10所示。

碰撞过程中的能量转化时程曲线如图11所示。

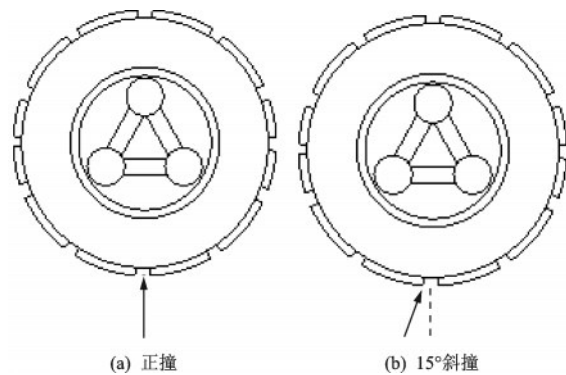


图10 正、斜撞碰撞示意

Fig.10 Collision from frontal and slanting aspects

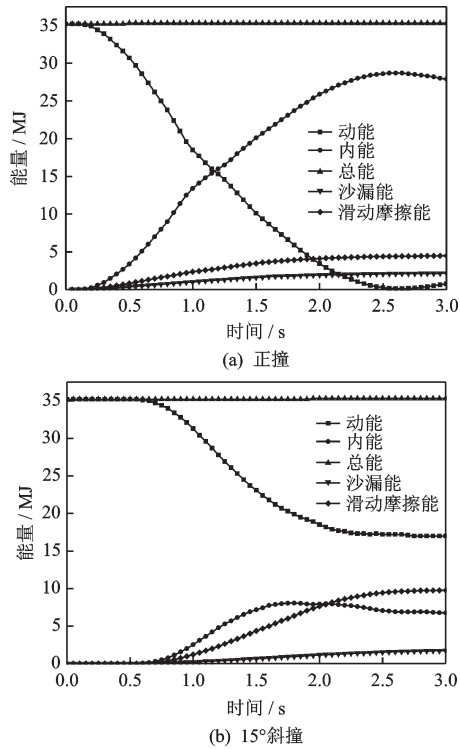


图 11 能量转化时程曲线

Fig.11 Time-history of energy transformation

碰撞过程中的船撞力时程曲线及船舶损伤变形时程曲线如图 12 所示。

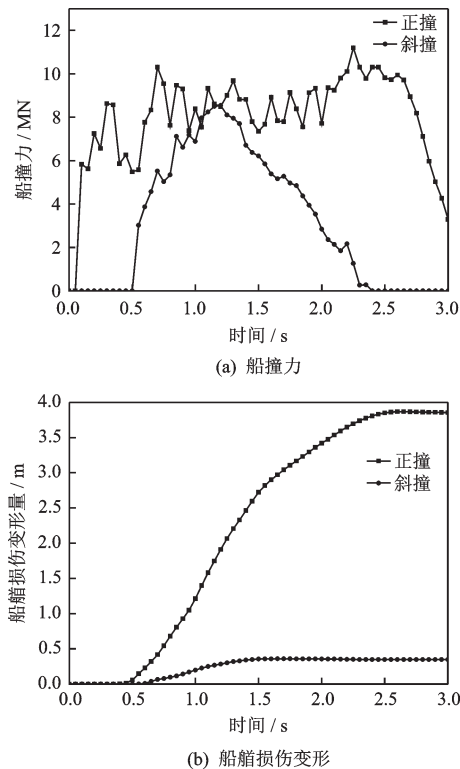


图 12 船撞力及船舶损伤变形时程曲线

Fig.12 Time-history of ship impact force and bow damage

计算结果显示,碰撞结束后正撞计算工况的船舶初始动能全部转化为系统的内能及其他形式的能量,碰撞造成的船舶损伤变形量达到 3.8 m。说明防船撞设施将船舶截停,这与普通防船撞套箱的防撞效果一样。而 15°斜撞计算工况的船舶在碰撞结束后有约 50% 的初始动能留在船舶上,碰撞结束后船舶可继续航行,碰撞造成的船舶损伤变形量只有 0.4 m 左右。由此可见,当船舶以一定的角度撞击转筒式防船撞设施时,防船撞设施能通过自身的旋转拨转船头,有效减小了碰撞对船舶造成的损伤。

## 4 结 论

(1) 通过结构形式优化,最终确定钢-复合材料套箱内部加劲肋、加劲板的布置间距为 0.8 m、各钢板的厚度为 8 mm。此时,转筒式防船撞设施的船撞力折减率为 47.3%,吸能比为 33.1%,相对于优化前(内部加劲肋、加劲板的布置间距为 0.6 m、各钢板的厚度为 8 mm)的船撞力折减率 39.8%、吸能比 22.3%,分别提升了 7.5% 和 10.8%。

(2) 钢-复合材料套箱中钢结构层和护舷层的厚度比例为 1:1,即护舷层厚度为 1.5 m 时,转筒式防船撞设施的船撞力折减率达到 48.9%,套箱总变形量为 1.27 m,护舷层的压缩率为 84.7%,套箱的总造价为 185 万。此时,套箱的总造价最低、综合防船撞性能最优。

(3) 提出“分层耗能”的优化思想,即船舶首先接触第一层防撞结构,通过拨动最外层阻尼元件(防撞护舷)使转筒式防船撞设施发生转动,从而拨动船头方向,减小船舶与防船撞设施的能量交换。当碰撞继续进行,第二层的钢结构层开始变形,钢结构层通过自身的变形可以继续吸收一部分的船舶能量。随着碰撞的进一步深入,第三层复合材料层进一步变形吸能。整个碰撞过程中,船舶的初始能量经过层层吸收,逐步减小,最后达到耗散船舶能量和拨转船头的目的。

(4) 正、斜撞数值仿真计算结果表明,对于有一定撞击角度的船舶撞击,转筒式防船撞设施能通过自身的旋转拨转船头,碰撞结束后有近一半的初始动能留在船舶上,大大降低了碰撞造成的船舶及防船撞设施损伤,这与防船撞设施的“双保护”设计思想相吻合。

## 参考文献:

- [1] 耿波, 王福敏. 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, 2016:1-2.  
Geng B, Wang F M. Technology and engineering practice of bridges under vessel collisions in three gorges reservoir [M]. Beijing: China Communications Press, 2016: 1-2.(in Chinese)
- [2] 樊伟, 刘斌. 高桩承台桥梁驳船撞等效侧向荷载作用模式[J]. 中国公路学报, 2016, 29(7):72-80.  
Fan W, Liu B. Equivalent lateral load pattern on elevated pile-cap bridge subjected to vessel collisions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(7): 72-80.(in Chinese)
- [3] 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(7):155-160.  
Jiang H, Geng B, Zhang X X. A new fender system for bridge pier protection against vessel collision[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(7): 155-160.(in Chinese)
- [4] You Y, Rhee K. Development of the collision ratio to infer the time at which to begin a collision avoidance of a ship[J]. Applied Ocean Research, 2016, 60:164-175.
- [5] Wei F, Wei G, Yang S, et al. Experimental and numerical investigations of a novel steel-UHPFRC composite fender for bridge protection in vessel collisions [J]. Ocean Engineering, 2018, 165:1-21.
- [6] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 297-301.  
Yao L S. Bridge engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2008:297-301.(in Chinese)
- [7] 李军, 王君杰, 欧碧峰. 船桥碰撞数值模拟方法研究[J]. 公路, 2010(10):14-20.  
Li J, Wang J J, Ou B F. Research on numerical simulation of ship-bridge collision [J]. Highway, 2010(10): 14-20.(in Chinese)
- [8] Tian L, Zhu C. Numerical simulation of ship-bridge collision based on LS-DYNA technique[J]. Advanced Materials Research, 2011, 243-249:6 230-6 236.
- [9] 张锡祥, 王智祥, 巫祖烈, 等. 一种新型FRP桥墩防撞浮箱结构[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(3):388-393.  
Zhang X X, Wang Zh X, Wu Z L, et al. A new FRP pier anti-collision pontoon frame [J]. Chongqing Jiaotong University Journal, 2011, 30(3): 388-393.(in Chinese)
- [10] 王佼佼, 石永久, 王元清, 等. 低屈服点钢材LYP100循环加载试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(8):1 401-1 409.  
Wang J J, Shi Y J, Wang Y Q, et al. Experimental study on low yield point steel LYP100 under cyclic loading[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2015, 49(8):1 401-1 409.(in Chinese)
- [11] 巫绪涛, 李耀, 李和平. 混凝土HJC本构模型参数的研究[J]. 应用力学学报, 2010, 27(2):340-344.  
Wu X T, Li Y, Li H P. Research on the material constants of the HJC dynamic constitutive model for concrete [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(2), 340-344.(in Chinese)
- [12] Rakshit D, Chakraborty S. Determination of fracture parameters of FRP composites: a combined experimental and numerical investigation [J]. Journal of Composite Materials, 2015, 49(2):231-241.
- [13] 潘晋, 方涵, 吴亚锋, 等. 桥墩复合材料防车撞结构碰撞性能试验研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(10):14-20.  
Pan J, Fang H, Wu Y F, et al. Experimental study on performance of composite protection structure for bridge pier against vehicle collision [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(10):14-20. (in Chinese)
- [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 X H. Research of numerical simulation on the anti-collision device made by composite material [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [15] 公路桥涵地基与基础设计规范:JTG D63—2007[S]. 北京:人民交通出版社, 2007.  
Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts: JTG D63—2007[S]. Beijing: China Communications Press, 2007.(in Chinese)
- [16] 潘晋, 方涵, 吴亚锋, 等. 桥梁复合材料防车撞吸能结构碰撞性能分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(8):122-127.  
Pan J, Fang H, Wu Y F, et al. Numerical analysis on the impact performance of composite energy absorption structure of bridge pier against vehicle collision [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(8): 122-127. (in Chinese)
- [17] 陈巍. 转筒式防撞设施防船撞性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2018.  
Chen W. The functional study of rotary anti-ship-collision facility [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.(in Chinese)

(本文责编:赵霞)