

不同材料桥墩防护装置性能对比研究

赵彦龙, 王进, 张思齐

西安中交土木科技有限公司, 陕西 西安

收稿日期: 2023年4月27日; 录用日期: 2023年5月4日; 发布日期: 2023年6月21日

摘要

桥墩防护装置是船桥碰撞事故中一种最直接有效的安全防护措施, 可以消耗掉撞击过程中强大的撞击力, 以达到保护船舶和桥梁本体结构的目的。本文对工程应用中常用的橡胶材料、钢材料、复合材料三款防撞材料展开研究, 从材料刚性、冲击力反应、防撞性能三个方面, 分析对比了三种材料的优缺点。结果表明: 适度降低防撞设施的刚度, 根据实际选用防撞材料, 可保证桥墩防护装置充分发挥其防护性能, 保护桥墩本体结构且防撞装置受损情况最小。

关键词

防船撞, 冲击试验, 吸能, 刚度分析, 有限元仿真

Comparative Study on the Performance of Bridge Pier Protective Devices Made of Different Materials

Yanlong Zhao, Jin Wang, Siqi Zhang

CCCC Civil Engineering Science & Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Received: Apr. 27th, 2023; accepted: May 4th, 2023; published: Jun. 21st, 2023

Abstract

Bridge pier protection device is the most direct and effective safety protection measure in ship bridge collision accidents, which can consume the strong impact force during the collision process to achieve the purpose of protecting the ship and bridge structure. This article conducts research on three commonly used anti-collision materials in engineering applications: rubber material, steel material, and composite material. From the perspectives of material rigidity, impact force response, and anti-collision performance, the advantages and disadvantages of these three materials are analyzed

文章引用: 赵彦龙, 王进, 张思齐. 不同材料桥墩防护装置性能对比研究[J]. 力学研究, 2023, 12(2): 97-108.

DOI: 10.12677/ijm.2023.122010

and compared. The results show that moderately reducing the stiffness of anti-collision facilities and selecting anti-collision materials according to actual conditions can ensure that the pier protection device fully exerts its protective performance, protect the structure of the bridge pier body and minimize damage to the anti-collision device.

Keywords

Ship Collision Prevention, Impact Test, Energy Absorption, Stiffness Analysis, Finite Element Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国水上航运事业的发展,船舶通航时受恶劣天气、船舶失控、偏航等各种因素的影响,会与桥梁发生碰撞,严重时会造成巨大的损失。如何正确选择桥梁被动防撞设施保护桥梁是现今工程界的重要研究方向[1]。近年来,学者们主要针对橡胶材料、钢材和复合材料的嵌套使用设计防撞设施[2]。钢-橡胶组合的防撞装置[3]一般为浮式结构,具有较好的自浮能力,被应用于黄石长江公路大桥、广东崖门大桥、奉浦大桥等大型桥梁。自浮型 FRP 复合材料柔性防撞套箱[4]则适用于通航等级提升、水位落差变化大的内河流域桥梁,例如泸州长江大桥、云川金沙江特大桥等。长沙湘江一座斜拉桥过渡墩[5]上则使用了钢-UHPFRC 组合结构防撞装置,黄花园大桥[6]使用了多节段燕尾榫连接的防撞浮箱结构。

根据桥梁地理位置、通航等级等特性,选用合适的结构和材料可以最大程度地降低船舶撞击力,减少撞击事故对船舶、防护设施和桥梁自身造成的损伤。不同材料防护设施的防护性能研究尤为重要。

2. 刚度分析

将结构系统根据动力学性能相似的原理转化为质量和弹簧系统模型,通过建立运动方程进行结构系统激励和响应计算。

在碰撞过程中将桥墩简化为单自由度体系,其质量为 M_1 , 刚度为 k_1 ; 将缓冲装置与船舶简化为另一单自由度体系,其质量为 M_2 , 刚度为 k_2 。因此,配置耗能装置时,船舶撞击桥墩模型动力分析的力学模型如图 1 所示。其中, x_1 为船舶碰撞时荷载作用位置处桥墩的变形值, x_2 为船舶碰撞时荷载作用位置处桥墩变形与缓冲装置变形之和。

根据 D'Alembert 原理建立冲击系统的动力方程为:

$$\begin{cases} M_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = 0 \\ M_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,

$$x_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi), x_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

求解可得,撞击力为:

$$F(t) = k_2 (x_2 - x_1) = \frac{k_2 v_0}{B_1 - B_2} \left[\frac{(B_1 - 1) \sin \omega_1 t}{\omega_1} - \frac{(B_2 - 1) \sin \omega_2 t}{\omega_2} \right] \quad (3)$$

桥墩反力为:

$$F_1(t) = k_1 x_1 = \frac{k_1 v_0}{B_1 - B_2} \left[\frac{\sin \omega_1 t}{\omega_1} - \frac{\sin \omega_2 t}{\omega_2} \right] \quad (4)$$

根据建立的二自由度冲击系统动力方程, 可求解得到撞击力公式和桥墩反力, 同时得到桥墩防护装置刚度 k_2 与撞击力关系, 为设计合理的防护装置提供理论依据。

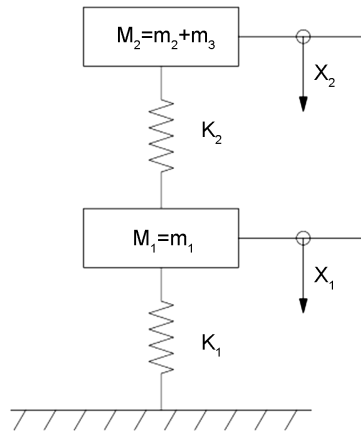


Figure 1. Dynamic analysis mechanical model
图 1. 动力分析力学模型

3. 冲击试验

1) 材料与试块

根据工程应用中常用的防护设施材料, 选用橡胶、钢结构和复合材料三种材料建立试验试块进行冲击试验, 试块规格如图 2 所示, 试块参数如表 1 所示。同时, 制作混凝土试块进行参照对比, 用来验证三种材料制作的防护结构单位体积的冲击响应。试验用材料主要性能如表 2 所示。

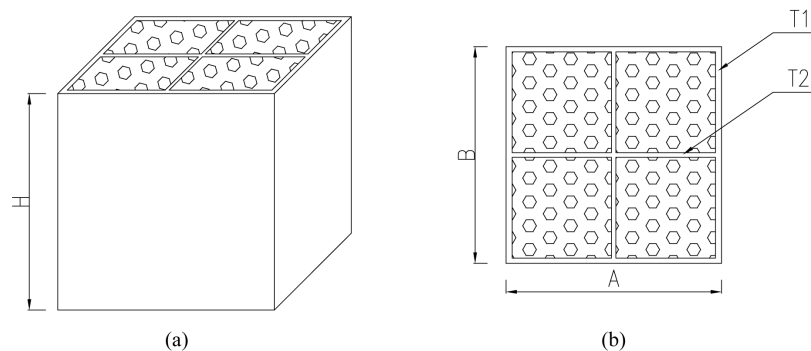


Figure 2. Sample specifications. (a) Overall view; (b) Top view
图 2. 试件规格。(a) 试件全貌图; (b) 试件俯视图

Table 1. Specimen parameters

表 1. 试件参数

长度(mm)	宽度(mm)	高度(mm)	外板厚 T (mm)	内板厚 T2 (mm)
300	300	300	10	5

Table 2. Material properties
表 2. 材料性能

材料	性能项目	单位	指标
钢材	拉伸强度	MPa	235
	拉伸模量	GPa	201
复合材料	拉伸强度	MPa	250
	拉伸模量	GPa	10
	弯曲强度	MPa	200
	剪切强度	MPa	50
填充芯材	平压强度	MPa	0.15
	平压弹性模量	MPa	6
	剪切强度	MPa	0.10
混凝土	抗压强度	MPa	30

2) 实验方案

采用落锤冲击试验机进行冲击试验，锤头重量选用 200 kg，自由落体高度分别使用 1.5 m、2 m、2.5 m 进行试验，试验布置图如图 3 所示。

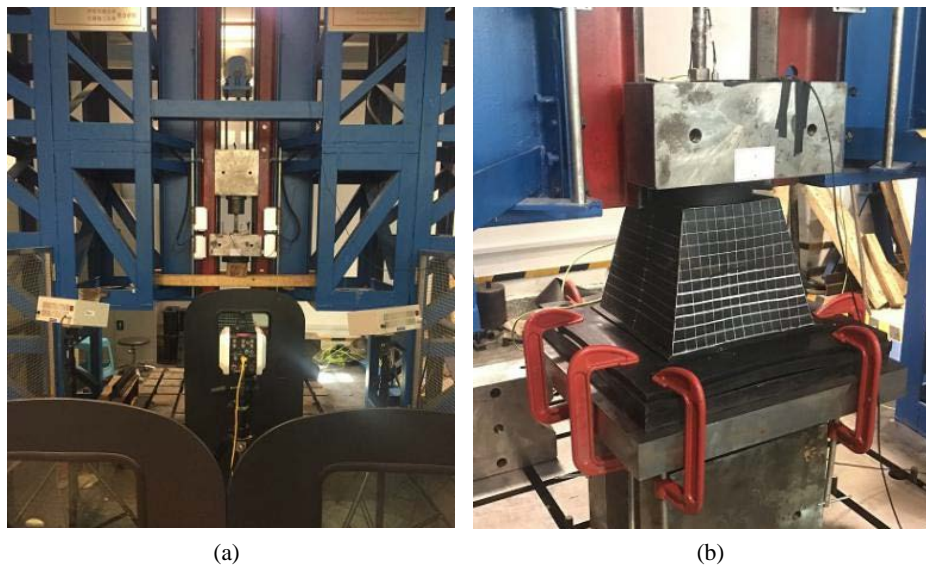


Figure 3. Impact test equipments. (a) Testing machine; (b) Testing fixture
图 3. 冲击试验设备。(a)试验机；(b)试验工装

为了精确测量动态响应数据，在锤头底部接近锤头与梁接触的区域，安装压电式加速度传感器，用于测量冲击载荷；使用力传感器采集实验试块的应变；使用高速摄像机记录冲击过程，进行数据采集。

3) 试验结果与分析

不同试件的冲击试验效果如图 4~7 所示，混凝土试件冲击工况中，混凝土试件从中间开裂并贯穿整个试件；橡胶试件冲头撞击挤压试件至底部后反弹；钢结构试件冲击工况中试件从与冲击头接触位置挤压屈曲变形；复合材料冲击工况中复合材料试件从与冲击头接触位置挤压压溃。

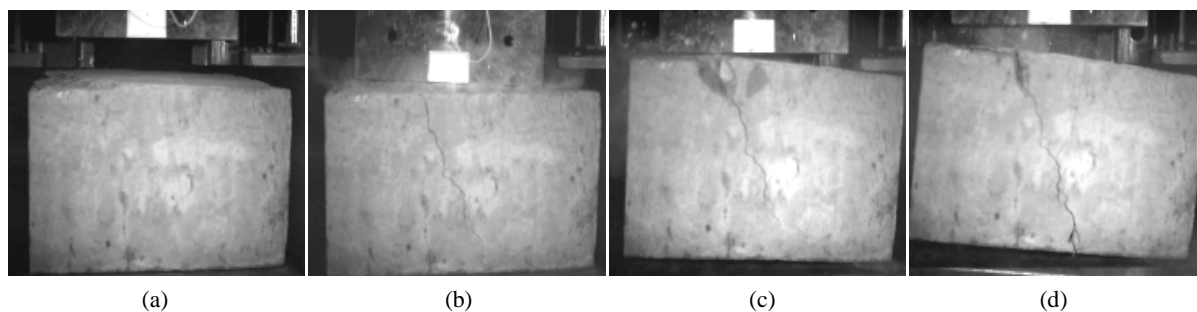


Figure 4. Impact test process of concrete specimens. (a) Starting; (b) Contact; (c) Limit; (d) Unloading

图 4. 混凝土试件冲击试验过程。(a) 起始; (b) 接触; (c) 极限; (d) 卸载

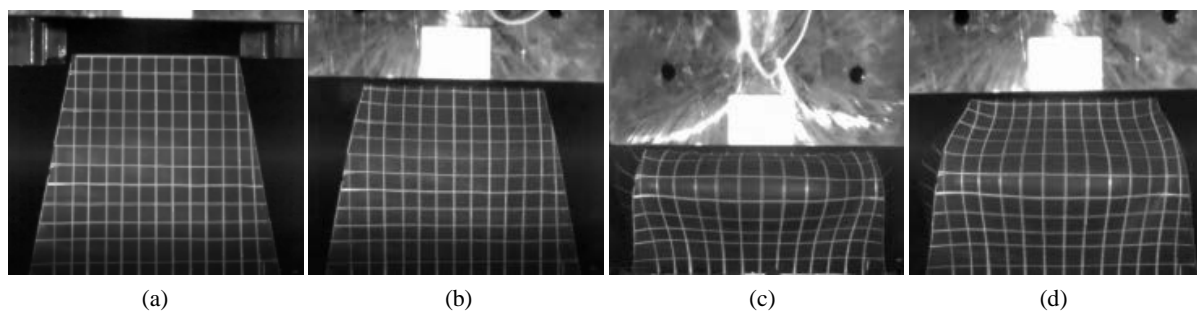


Figure 5. Impact test process of rubber specimens. (a) Starting; (b) Contact; (c) Limit; (d) Unloading

图 5. 橡胶试件冲击试验过程。(a) 起始; (b) 接触; (c) 极限; (d) 卸载

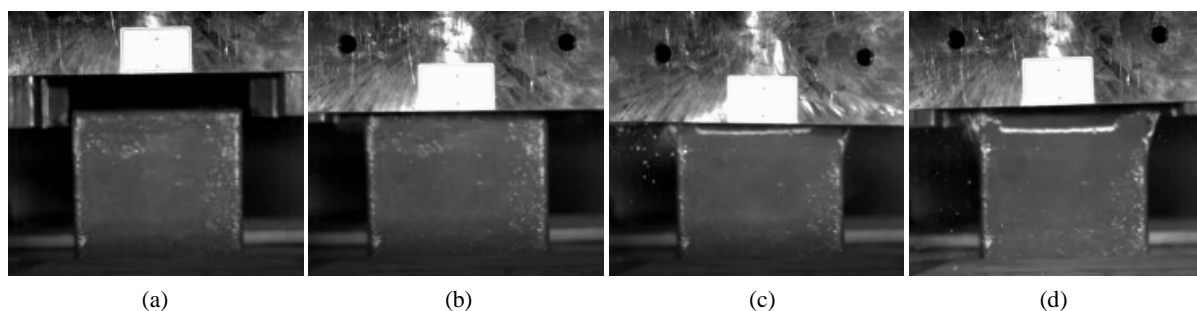


Figure 6. Impact test process of steel structure specimens. (a) Starting; (b) Contact; (c) Limit; (d) Unloading

图 6. 钢结构试件冲击试验过程。(a) 起始; (b) 接触; (c) 极限; (d) 卸载

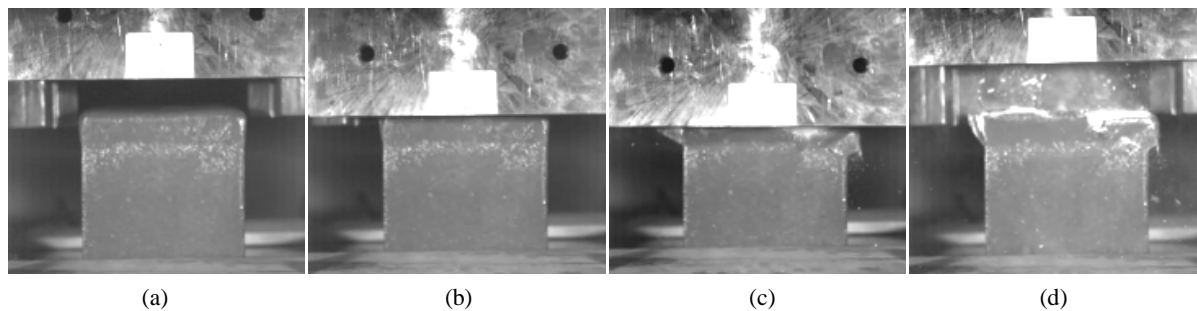


Figure 7. Impact testing process of composite material specimens. (a) Starting; (b) Contact; (c) Limit; (d) Unloading

图 7. 复合材料试件冲击试验过程。(a) 起始; (b) 接触; (c) 极限; (d) 卸载

不同材料试件试验加速度结果如图 8 所示。

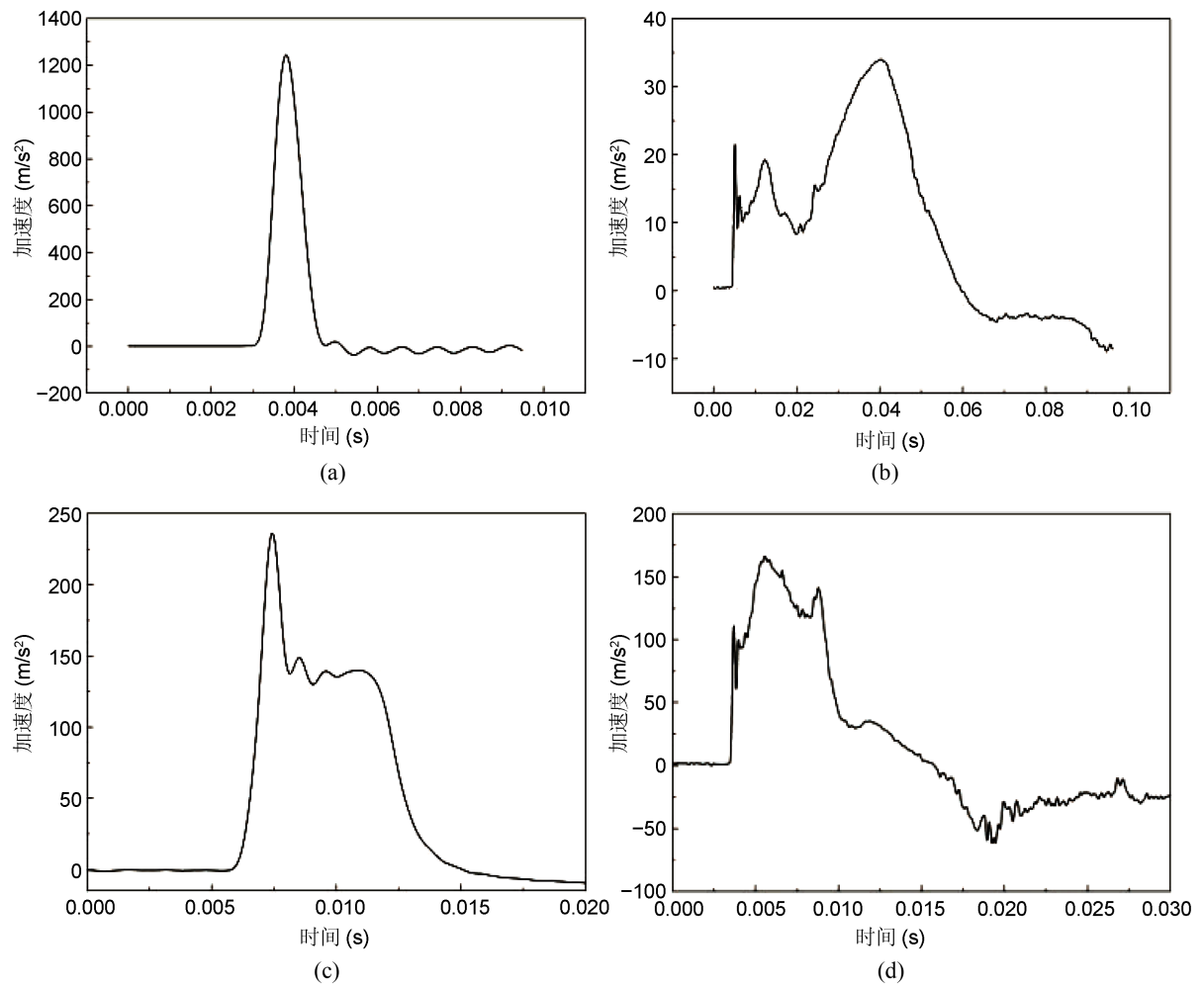


Figure 8. Acceleration results of impact tests on specimens of different materials. (a) Concrete; (b) Rubber; (c) Steel structure; (d) Composite materials

图 8. 不同材料试件冲击试验加速度结果。(a) 混凝土；(b) 橡胶；(c) 钢结构；(d) 复合材料

不同试件冲击试验的最大加速度和试件压缩结果如表 3 所示。其中，混凝土试件的冲击加速度最大，橡胶试件的冲击加速度最小，对应的压缩形变也最大。相同体积下橡胶试件的缓冲效果最好，但其压缩比例已达 75.77%，几乎快达到压缩极限，说明橡胶试件刚度最小，最易达到性能上限。钢材和复合材料试件较橡胶材料其最大加速度大，但其压缩比例小，说明其远未达到性能上限，钢材和复合材料试件比较，复合材料的最大加速度小，压缩比例相差不大，其性能略优于钢材。

Table 3. Acceleration results of impact tests on specimens of different materials

表 3. 不同材料试件冲击试验加速度结果

项目	混凝土	橡胶	钢材	复合材料
峰值加速度(m/s ²)	1238.9	34.2	243.8	197.3
加速度消减率(%)	-	97.24	80.32	84.07
压缩距离(mm)	2.3	227.3	49.1	57.9
压缩比例(%)	0.77	75.77	16.37	19.30

4. 性能分析

1) 有限元模型

采用有限元仿真分析方法对 500 吨级船舶横向撞击桥墩及采用不同材料的防护设施防护效果进行数值模拟计算, 其中船舶、桥墩及防护设施均严格按照对应设计图纸进行有限元建模, 如图 9 和图 10 所示。船舶具体尺寸及船速如表 4 所示。

Table 4. Dimensions and speed of fortified ships

表 4. 设防船型尺寸及船速

设防代表船型	船长(m)	船宽(m)	设计吃水(m)	撞击速度(m/s)
500 t	45.0	10.8	1.6	3

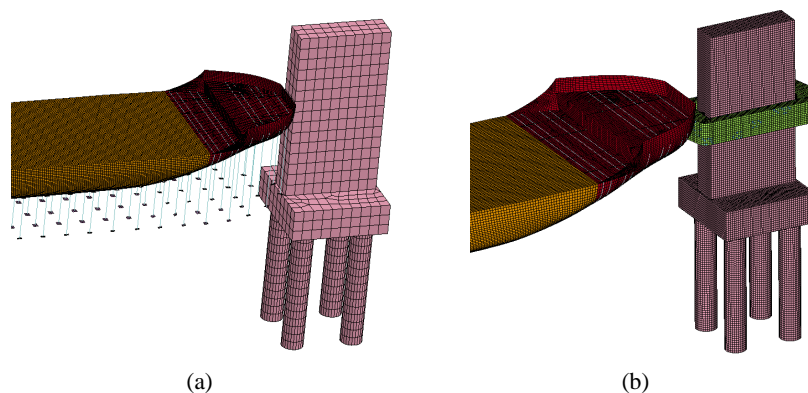


Figure 9. Finite element model for operating conditions of bridge piers and impact protection facilities. (a) Collision with bridge piers; (b) Collision protection facilities

图 9. 撞桥墩和撞击防护设施工况有限元模型。(a) 撞桥墩; (b) 撞防护设施

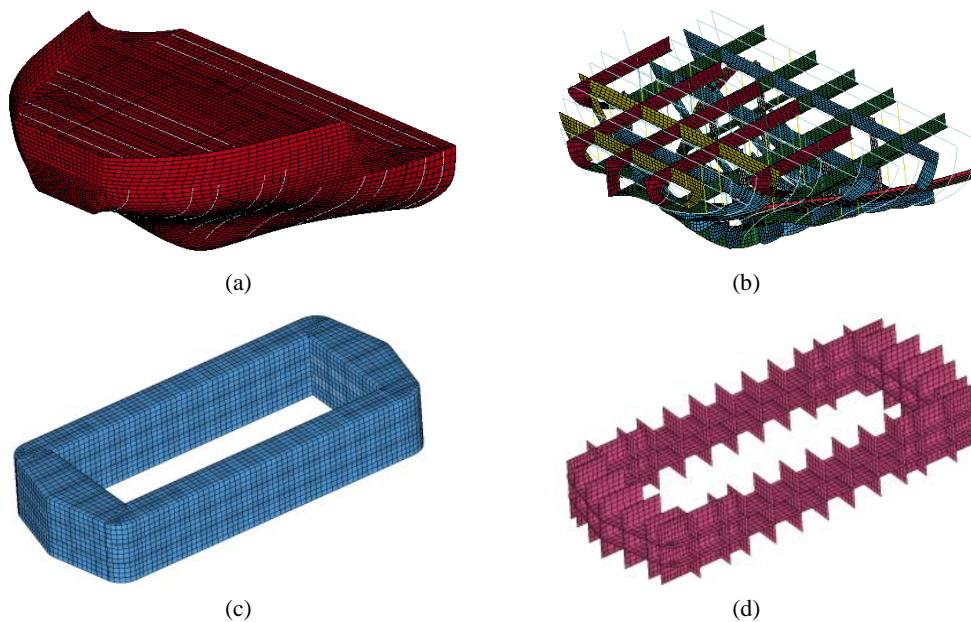
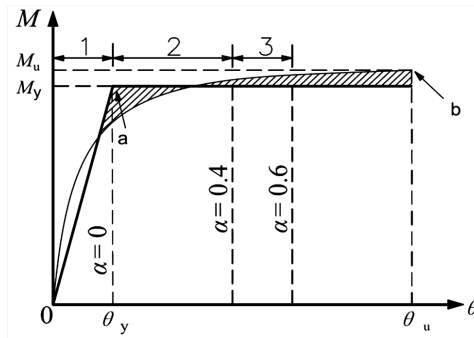


Figure 10. Finite element model of ships and protective facilities. (a) Bow; (b) Bow frame; (c) Protective facilities; (d) Framework of protective facilities

图 10. 船舶及防护设施有限元模型。(a) 船头; (b) 船头骨架; (c) 防护设施; (d) 防护设施骨架

2) 防护需求分析

建立桥墩有限元模型，通过桥墩墩身和桩基的抗弯性能验算及最大位移量，如图 11 所示，桩柱式结构弯矩 - 转角关系对应桥墩最不利受力位置界面抗弯属性，即可判断桥墩的抗弯上限，获得桥墩的抗撞极限，以此确定其防护需求。



a	截面等效屈服点
b	极限变形点
1、2、3	构件的性能等级
M_y	构件截面等效屈服弯矩
M_u	构件截面极限弯矩
θ_y	构件塑性较区等效屈服转角
θ_u	构件塑性较区极限转角
α	构件性能等级系数

Figure 11. Moment-rotation relationship of pile column structure

图 11. 桩柱式结构弯矩 - 转角关系

船舶撞击桥墩工况撞击过程能量变化如图 12 所示，总能量守恒，伪应变能占总能力 1.79%，小于总能量的 5%，证明有限元计算模型可靠。动能最终全部转化未内能，船舶撞停，反映了完整的撞击过程。

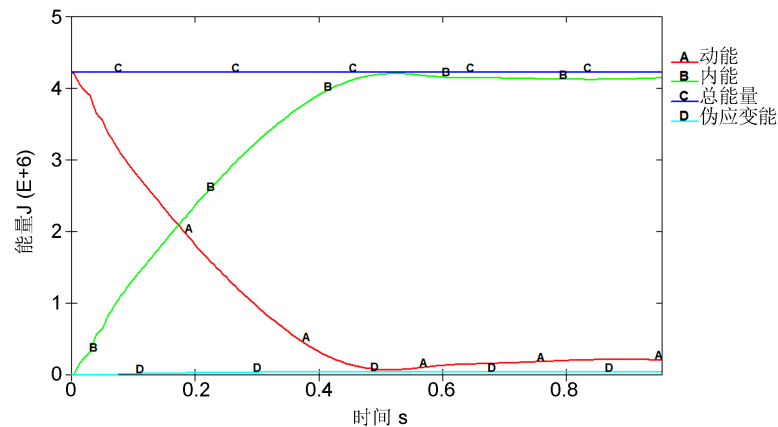


Figure 12. Energy changes during ship impact on bridge piers

图 12. 船舶撞击桥墩撞击过程能量变化

船舶撞击桥墩撞击力如图 13 所示，峰值撞击力未 6.57 MN。

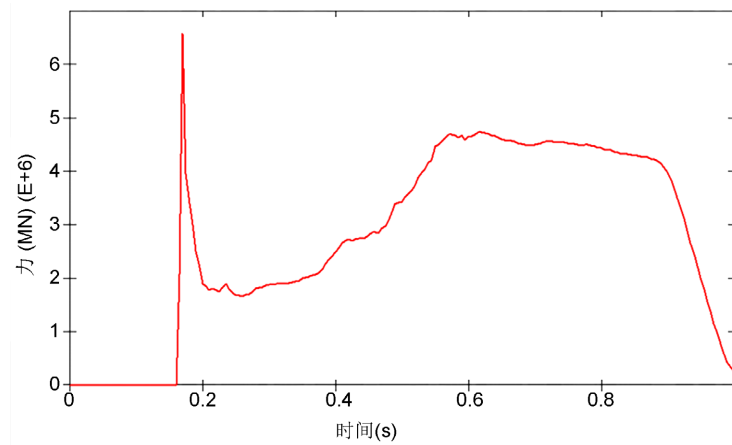


Figure 13. Time history of ship impact force on bridge piers
图 13. 船舶撞击桥墩冲击力历程

根据桥梁设计图纸，采用 MIDAS 桥梁结构设计分析软件，建立主墩分析模型，如图 14 所示。墩身为 30 号混凝土，承台和桩基为 25 号混凝土；采用“M 法”计算得到土弹簧模拟桩土之间的相互作用，桩底固结；将图 13 求得船舶动力荷载施加在船舶与桥墩的最不利碰撞点处。利用动力时程分析方法分析桥墩受船舶撞击的响应，得到桥墩未设防时的抗撞极限。

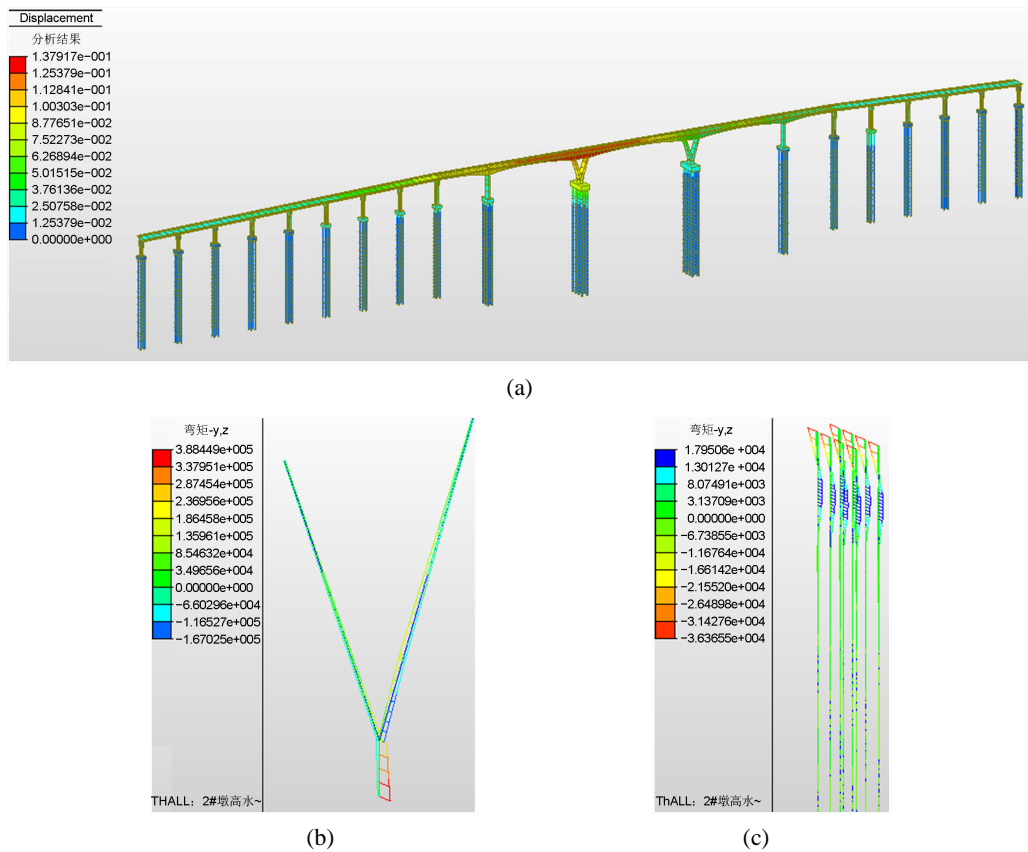


Figure 14. Collision resistance analysis of bridge piers; (a) Impact deformation; (b) Pier shaft bending moment; (c) Pile foundation bending moment

图 14. 桥墩抗撞分析。(a) 撞击变形；(b) 墩身弯矩；(c) 桩基弯矩

桥墩抗力验算结果如表 5 所示，从表中结果可以看出：裸墩承受 500 t 船舶横桥向撞击时，墩顶最大位移为 0.026 m，满足结构安全性要求；墩身最不利截面位置为墩身与承台连接位置，最大计算弯矩为 19959 kN·m，求得安全极限弯矩为 46268.9 kN·m，满足安全要求；桩基最不利截面位置为桩基顶部，最大计算弯矩为 3922 kN·m，求得安全极限弯矩为 2317.0 kN·m，小于最大计算弯矩，不满足安全要求，安全提升需求为 40.92%，根据图 13，船舶撞击桥墩撞击力峰值为 6.57 MN，因此，为了保证桥墩结构安全，防护设施需要将船舶撞击力降低至 3.88 MN。

Table 5. Calculation of protection requirements
表 5. 防护需求计算

位置	计算弯矩 kN·m	安全极限弯矩 kN·m	防护需求 %
桥墩	19959	46268.9	0
桩基	3922	2317.0	40.92

3) 防护效果分析

船舶撞击未设防桥墩船身受损效果如图 15 所示，船舶撞击不同材料防护设施的受损效果如图 16 和图 17 所示。

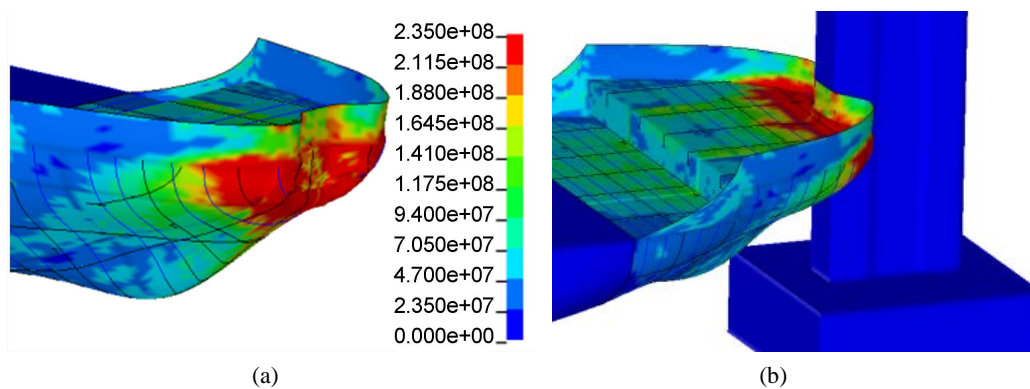


Figure 15. Damage effect of ship collision with bridge pier. (a) Pier shaft bending moment; (b) Pile foundation bending moment

图 15. 船撞桥墩受损效果。(a) 墩身弯矩；(b) 桩基弯矩

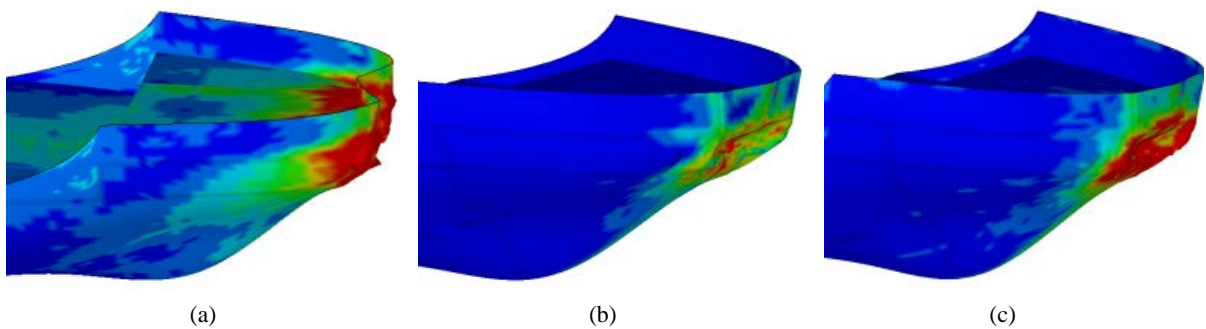


Figure 16. Damage effect of ship collision by preventing bridge pier. (a) Rubber material; (b) Steel; (c) Composite material

图 16. 船撞受防桥墩受损效果。(a) 橡胶材料；(b) 钢材；(c) 复合材料

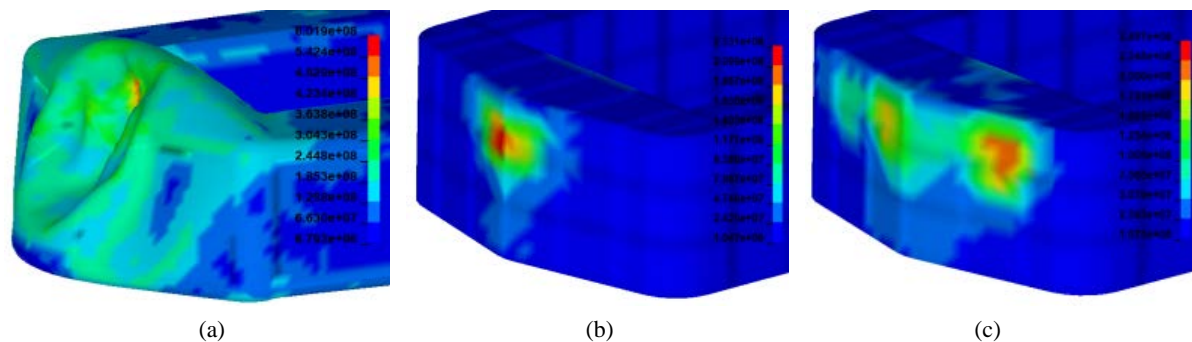


Figure 17. Damage effect of ship collision protection facilities. (a) Rubber material; (b) Steel; (c) Composite material
图 17. 船撞防护设施受损效果。(a) 橡胶材料; (b) 钢材; (c) 复合材料

不同撞击工况的受损结果统计如表 6 所示, 从船舶受损的消减角度判断防护能力, 橡胶材料、钢材和复合材料防护设施的防护能力分别为 5.79%、33.71%和 41.20%, 其中, 复合材料防护效果最优。同时, 根据不同材料防护设施撞深分析, 橡胶材料防护设施在撞击过程中完全压缩, 过早达到了防护能力上限, 使得船舶保留了过多剩余动能, 造成船舶继续撞向桥墩而变形严重。钢材和复合材料防护设施撞深相对较小, 防护能力储备空间充足。

Table 6. Statistics of damage under different working conditions

表 6. 不同工况受损统计

工况	船舶撞深 mm	防护效果%
撞桥墩	874.5	-
橡胶材料防护	823.9	5.79
钢材防护	579.7	33.71
复合材料防护	514.2	41.20

图 18 为不同工况下的船舶撞击力对比, 具体撞击力数值对比统计见表 7。

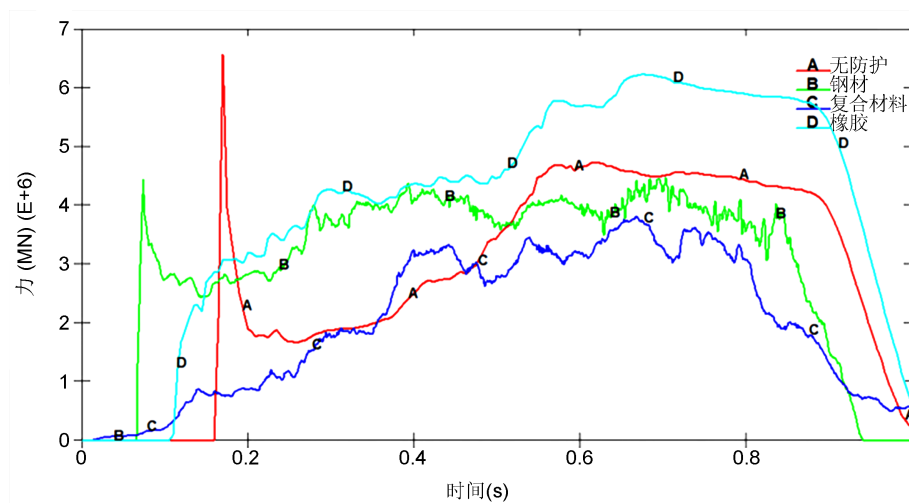


Figure 18. Comparison of ship impact forces under different working conditions

图 18. 不同工况船舶撞击力对比

Table 7. Statistics of damage under different working conditions
表 7. 不同工况受损统计

工况	峰值撞击力 kN	防护效果 %
撞桥墩	6673.2	-
橡胶材料防护	6275.3	5.96
钢材防护	4423.1	32.22
复合材料防护	3691.7	44.68

不同撞击工况的受损结果统计如表 7 所示，从船舶撞击力的消减角度判断防护能力，橡胶材料、钢材和复合材料防护设施的防护能力分别为 5.96%、32.22%和 44.68%，其中，复合材料防护效果最优。

5. 结论

综合分析冲击试验与仿真实验的结果，从刚性分析和冲击力度两方面，对当前市场上的防护材料进行分析，得到如下结论：

1) 船舶船体、防撞装置的刚度与撞击力、桥墩反力成正比，即当船舶和缓冲装置的刚度增大时，撞击力和桥墩反力均增大，并快速到达峰值，反之，则同时减小。故可适度减小防撞装置的刚度，降低碰撞过程中对桥墩的损伤。

2) 三种防撞材料性能各有特点，可在应用中按实际情况选择不同的防撞材料。在相同体积下，混凝土试件与橡胶试件相比，橡胶试件的缓冲效果最好，但压缩形变较大；钢材试件与复合材料试件相比，压缩比相差不大，但复合材料的最大加速度小。

3) 以 500 吨级别的船舶横向撞击桥墩为例，分析不同材料的防护效果。根据试验结果，复合材料防撞设施防护效果最优且防撞设施受损程度最小。

参考文献

- [1] 廖志聪. 桥梁复合材料防撞方案探讨[J]. 江西建材, 2017(16): 181+182.
- [2] 潘晋, 张小强, 许明财, 等. 船-桥梁浮式钢套筒碰撞数值模拟中的流场处理方法对比研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(7): 125-129.
- [3] 荆国强, 李清岭, 马海英, 贾晓龙, 周锐根, 王君杰. 钢-UHPC 组合式防撞浮箱防撞性能研究[J]. 公路交通技术, 2023, 39(1): 75-81+89. <https://doi.org/10.13607/j.cnki.gljt.2023.01.012>
- [4] 郑植, 耿波, 袁佩, 李嵩林, 胡正涛. 桥墩复合材料防船撞装置新型连接试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 66-73.
- [5] Fan, W., Guo, W., Sun, Y., Chen, B.S. and Shao, X.D. (2018) Experimental and Numerical Investigations of a Novel Steel-UHPFRC Composite Fender for Bridge Protection in Vessel Collisions. *Ocean Engineering*, **165**, 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.07.028>
- [6] 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. <https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2014.17.028>