

桥墩复合材料柔性防撞护舷试验

郑植^{1,2}, 袁佩¹, 金轩慧³, 魏思斯¹, 耿波¹

(1. 招商局重庆交通科研设计院有限公司 桥梁工程结构动力学国家重点实验室, 重庆 400067; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 3. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100029)

摘要: 针对既有防护结构不能实现多目标船型柔性防护的问题, 提出了一种可防护中小型船舶的柔性护舷, 该护舷可与既有防护结构搭配使用。对 3 种不同护舷开展了准静态压缩试验, 确定了最优构造形式, 通过足尺冲击试验和数值模拟对最优构造护舷的防护性能进行分析。结果表明: 压缩试验下, 不同试件的破坏模式相近, 均出现外面板剪断, 基体开裂, 剪断处纤维断裂; 压缩结束各试件回弹率高达 85% 以上; 添加耗能芯材的试件 3 是最优构造形式。落锤冲击试验下, 撞击力折减率达到 97%, 撞后护舷变形完全恢复, 护舷以弹性耗能的方式耗散能量; 驳船撞击下, 护舷吸收了 63% 的碰撞能量, 且能大幅减轻船舶损伤, 此时护舷主要以耗能芯材的压溃吸收碰撞能量。

关键词: 交通运输系统工程; 复合材料; 柔性护舷; 压缩试验; 冲击试验; 数值模拟

中图分类号: U417.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)09-2581-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211227

Experimental on composite flexible anti-collision fender of bridge pier

ZHENG Zhi^{1,2}, YUAN Pei¹, JIN Xuan-hui³, WEI Si-si¹, GENG Bo¹

(1. National Key Laboratory of Structural Dynamics of Bridge Engineering, China Merchants Chongqing Communications Technology Research and Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. China Academy of Building Research Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing protective structure can not achieve multi-objective ship-type flexible protection, a flexible fender which can protect small and medium-sized ships is proposed. The fender can be used with the existing protective structure. To determine the optimal form, the quasi-static compression tests of three different flexible fenders are carried out. And the protective performance of the optimal structural fender is analyzed through full scale impact test and numerical simulation. The results indicate that the failure modes of different specimens are similar under compression test. The outer plate shear failure, matrix cracking and fiber fracture occurred in all specimens. At the end of compression, the springback rate of each specimen was as high as 85%. Specimen 3 with energy dissipation core material is

收稿日期: 2021-11-16.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0806000); 重庆市自然科学基金项目(CSTB2022NSCQ-MSX1658).

作者简介: 郑植(1992-), 男, 助理研究员, 博士研究生. 研究方向: 工程结构抗冲击与防护. E-mail: zhengzhi@cqu.edu.cn

通信作者: 耿波(1979-), 男, 研究员, 博士. 研究方向: 工程结构抗冲击与防护. E-mail: gengbo01@163.com

the optimal structure. For the drop weight impact test, the reduction rate of impact force reaches 97%. Fender deformation recovers completely after impact, and fender dissipates energy in the form of elastic energy dissipation. Under barge impact, the fender absorbs 63% of the collision energy and greatly reduces ship damage. In this condition, the fender mainly absorbs the collision energy with the collapse of the energy dissipating core material.

Key words: engineering of communications and transportation system; composite materials; flexible fender; compression test; impact test; numerical simulation

0 引言

为避免船舶撞击桥墩引发严重后果,主要采用防船撞设施对桥墩进行保护。桥墩防撞设施种类繁多,国际桥梁和结构工程协会将其分为防护板系统、支撑桩系统、系缆桩系统、人工岛或暗礁保护以及浮动保护系统 5 大类^[1]。我国新颁布的《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T3360-02-2020)则将防船撞设施概括地分为一体式、独立式和附着式 3 大类,并给出了不同类型防撞设施的选用原则^[2]。一体式防护多采用混凝土结构或钢结构将桥墩基础结合在一起,通过扩大截面增加桥墩抗力,如厦漳跨海大桥采用的一体化钢套筒,可抵御 5000 t 船舶撞击^[3];独立式防护常采用多根混凝土桩通过单层或多层系梁相连将桥墩与船舶隔离,通常可抵御 3000 t 以上船舶撞击。而附着式防撞浮式结构因受水位变化影响小、施工便捷等优点得到了更为广泛的运用。其中,张锡祥等^[4]提出一种多节段拼装的复合材料防撞浮箱结构,开展了节段足尺冲击试验,证明其具有较好的缓冲折减性能,可有效防护 3000 t 船舶撞击,其成果已应用在黄花园大桥上。文献[5,6]提出一种自浮式复合材料筒形防撞装置,采用纵横格构腹板增强耗能夹芯材料制作,可防护 5000 t 船舶撞击,并在武汉鹦鹉洲长江大桥等多个高等级航道上进行了应用。Wang 等^[7,8]提出一种内外钢围中间填充橡胶钢丝圈的防护结构,通过理论分析、实船撞击试验及数值模拟验证了该防撞设施能防护 50 000 t 级货船撞击,并在湛江海湾大桥上进行了运用。Fan 等^[9]提出一种新型钢-UHPC 波折钢板组合结构防撞装置,结合试验与数值模拟验证了能够防护 3000 t 散货船撞击,并成功应用于湘江一斜拉桥过渡墩上。文献[10,11]设计了将 18 个内衬框架式耗能元件连接在一起的装配式钢-UHPC 防船撞装置,通过数值模拟验证了

该防撞设施可防护 5000 t 货船撞击。

由于碰撞的随机性和突然性,很难预料到什么吨位的船与桥梁发生撞击。为了桥梁安全运营,上述研究主要关注如何有效防护大吨位船舶,而对大量中小型船舶撞击关注较少,导致对于已采用一体式或独立式防护进而具备整体抗撞能力的桥梁,其刚度与大吨位目标船舶匹配,但对于中小型船舶而言就显得刚度过大,产生的撞击力也大,船舶损伤也更为严重,达不到“和谐防护”的理念;另一方面,尽管防护结构整体上不会出现安全问题,但其局部结构极有可能遭到中小型船舶撞击出现不易修复的损伤,进而影响既有防护结构的耐久性和后续抗撞能力。

基于此,本文提出了一种复合材料柔性护舷,通过准静态压缩试验确定了最优构造形式;开展了足尺试件冲击试验及船撞数值模拟分析其防护性能,验证了该型护舷可有效应对中小型船舶撞击。

1 试件制作

为研究基体材料及内部填充物的布置对柔性护舷的影响,设计了 3 个足尺试件进行准静态压缩试验,各试件构造如图 1 所示。通过压缩试验

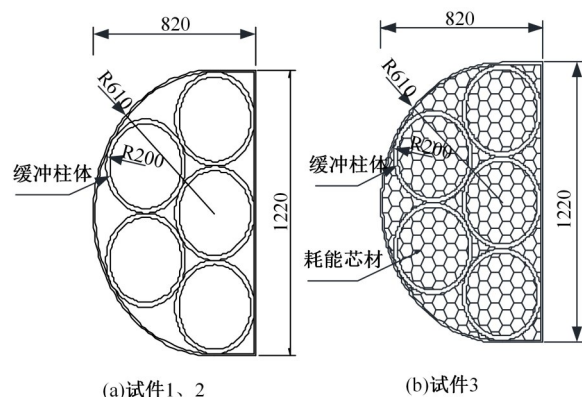


图 1 各试件构造(单位:mm)

Fig. 1 Specimen structure (unit: mm)

确定最优布置形式,以开展动态足尺冲击试验。其中,试件1基体材料采用聚氨酯,内部填充圆柱形缓冲圈;试件2基体材料采用乙烯基树脂,内部填充圆柱形缓冲圈;试件3基体材料采用乙烯基树脂,内部填充缓冲柱体与耗能芯材。试件外壳厚度为10 mm,缓冲柱体厚度为5 mm。

采用真空导入工艺制作试验模型,制备过程如图2所示。首先,加工模具,并对模具内表面抛光、打蜡。然后,依次铺设纤维布,脱模布;铺设并

固定导流管,用以导入基体材料。随后,再铺设导流网,以加快基体浸入速度。接着,铺设真空袋,并检查气密性;进行真空导流,导流过程需控制导流速度,使得基体均匀浸透增强材料;在预定时间内基体材料发生固化,与增强材料紧密结合,待树脂充分固化后进行脱模。最后,向内部紧密填满缓冲耗能材料,盖上盖板密封。

2 准静态压缩试验

2.1 试验方案

准静态压缩试验采用3000 t大型压力试验机进行位移连续加载,直至结构破坏,加载速度为2 mm/min,每级加载后记录试验荷载及模型变形情况,如图3所示。

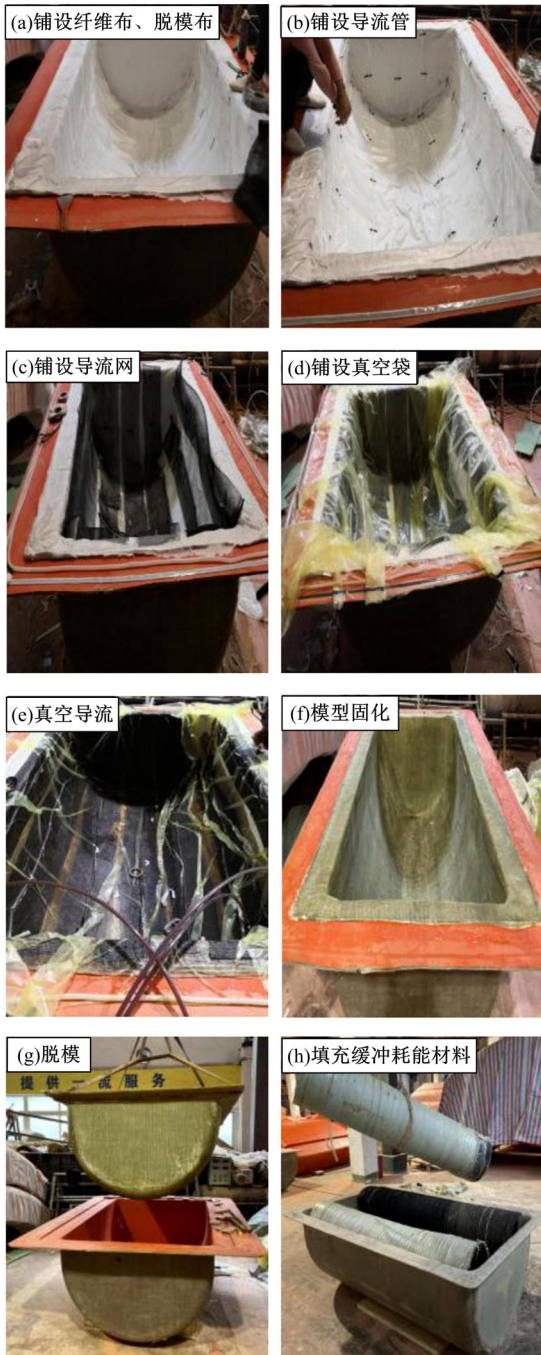


图2 试件制备过程

Fig. 2 Specimen preparation process



图3 柔性护舷足尺压缩试验

Fig. 3 Full-scale compression test of flexible fender

2.2 结果分析

根据加载工况进行准静态压缩试验。试验过程中,实时观察试件变形与破坏,各试件破坏模式如图 4 所示。可以发现,不同试件破坏模式相近,均出现外面板剪断、基体开裂、剪断处纤维断裂的现象。压缩结束后,各试件均发生卸载回弹,回弹率高达 85% 以上,说明该护舷具有高弹性的特点。

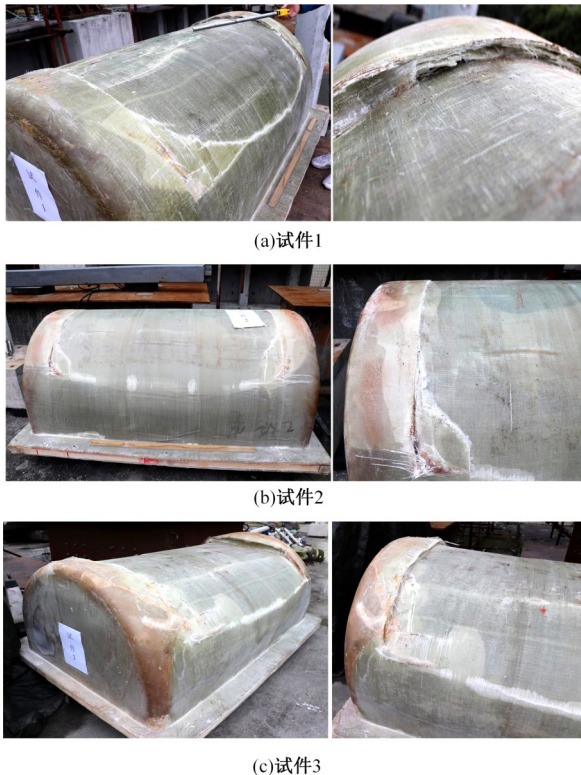


图 4 最终破坏状态

Fig. 4 Final failure state

试件的荷载-位移曲线如图 5 所示,可以发现,在压缩过程中各试件均表现出弹性状态。基体材料对护舷的压缩性能影响显著,当选用聚氨酯树脂作为基体材料时,试件 1 的压缩反力仅为 348 kN,等效压缩刚度仅为 892 kN/m。而采用乙烯基树脂作为基体材料时,与试件 1 相比,试件 2 的压缩反力达到 530 kN,等效压缩刚度达到 1337 kN/m,分别提高了 152%、150%。内部填充的耗能芯材对压缩性能也有较大影响,然而受试验机行程限制,芯材还未达到致密化阶段,其压缩性能还未得以充分发挥。当达到压力试验机最大行程时,与未填耗能芯材的试件 2 相比,试件 3 的压缩反力为 614 kN,等效压缩刚度为 1675 kN/m,分别提高了 116% 和 125%。由于护舷迎撞面尺寸受限,且船艏刚度远高于护舷,因此选择刚度越大的

构造形式,其在完全压溃时吸收的能量越多,缓冲折减能力越好,故试件 3 是最优的结构形式。

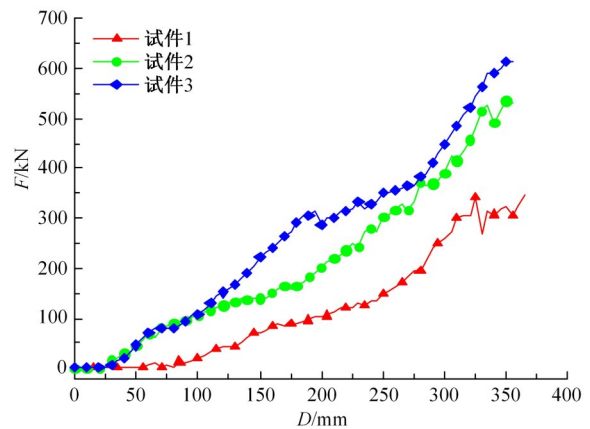


图 5 荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve

3 动态冲击试验

3.1 试验方案

最优构造下护舷动态冲击试验采用落锤自由落体冲击完成,落锤提升支架采用 HW200×200×8/12 工字钢焊接而成,高度为 5.7 m,净宽度为 1.8 m,并在支架两侧设置爬升用斜撑。落锤采用外包钢板并在内部浇筑混凝土制作,钢板采用 Q235 钢,厚度为 10 mm,混凝土采用 C40。落锤长度为 0.8 m、宽度为 0.8 m、高度为 1 m,总质量为 1.7 t。试验梁尺寸为 500 mm×800 mm,长 3 m,采用 C40 混凝土浇筑。试验工况为落锤以 4.9 m/s 的速度撞击护舷,此时落锤提升高度为 1.2 m,冲击能量为 20.4 kJ。为分析护舷的缓冲折减能力,进行了无护舷防护的冲击试验对比,结果如图 6 所示。碰撞力通过加速度传感器测试,在落锤顶部截面中心安装 1 个加速度传感器。采用 DH5920 动态信号采集系统拾取加速度信号,采样频率为 100 kHz。

3.2 结果分析

有、无防护下的碰撞力对比结果如图 7 所示。未设置护舷时撞击力高达 8874 kN,出现在 0.007 s 时刻;有护舷防护下,撞击力峰值下降到 233 kN,出现在 0.6 s 时刻,撞击力折减率达到 97%。与无防护工况相比,有护舷防护时,撞击响应时间由 0.03 s 延长到 4 s,撞击时间延长了 133%。

撞击点处梁底动位移对比结果如图 8 所示。无防护时梁底最大位移为 14 mm,设置护舷防护时减小到 1.8 mm,位移折减率达到 87%。结合

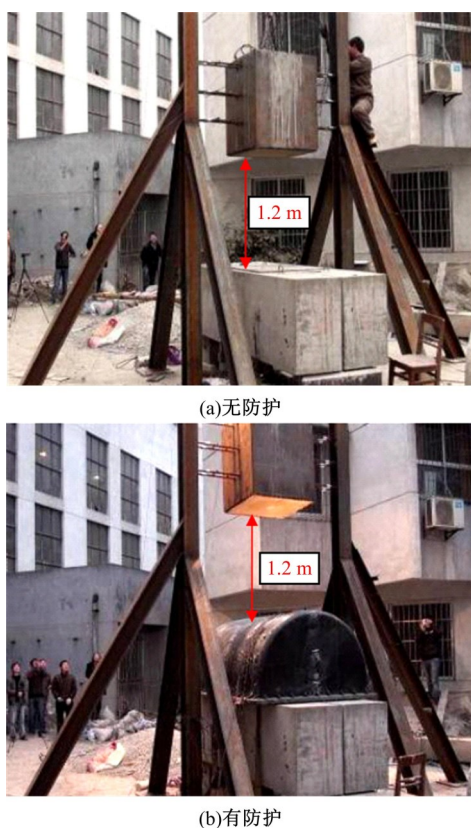


图 6 柔性护舷足尺冲击试验

Fig. 6 Full scale impact test of flexible fender

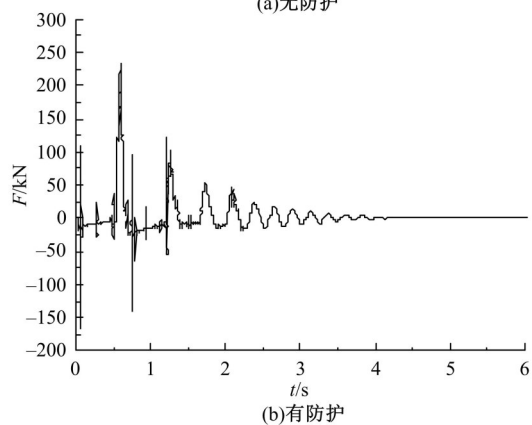
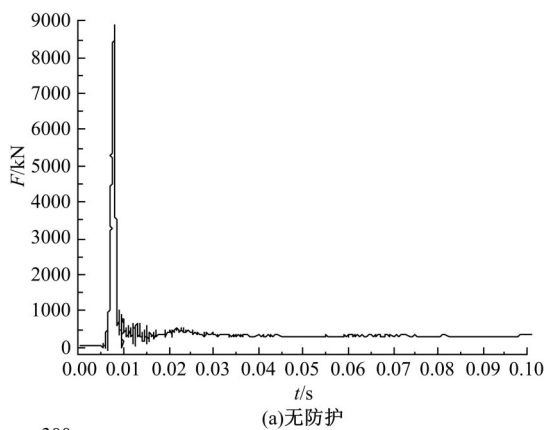


图 7 碰撞力试验对比

Fig. 7 Collision force comparison for the test

图 8 和图 9 可以看出:在首次接触护舷时刻,碰撞力和梁底响应均达到峰值,此时护舷被压缩到最大,随后护舷变形恢复,将落锤反弹至一定高度进而再次撞击护舷,这一过程多次重复直至碰撞结

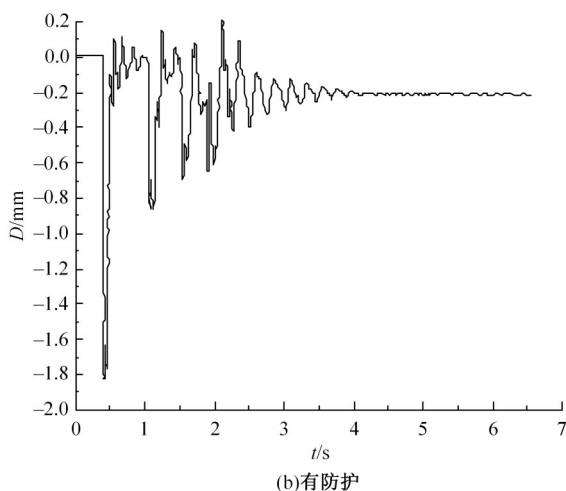
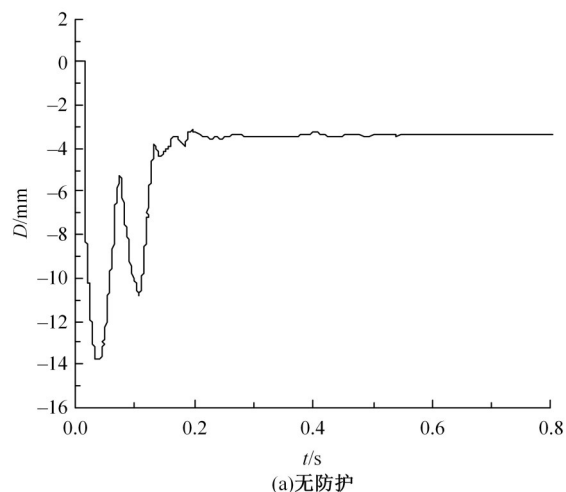


图 8 撞击点处梁底位移对比

Fig. 8 Bottom displacement comparison at impact point

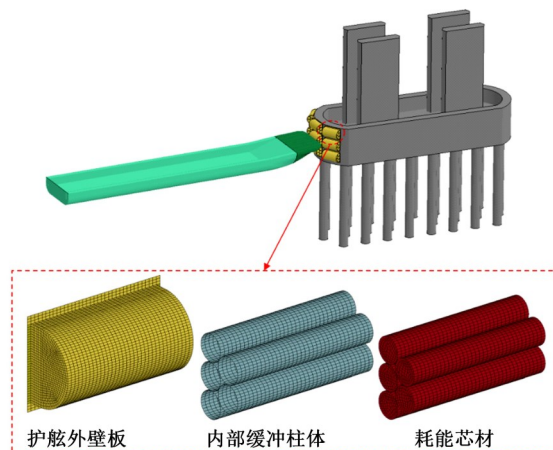


图 9 碰撞系统有限元模型

Fig. 9 Finite element model of collision system

束。护舷未发生破坏,仍处于弹性状态,碰撞能量以弹性耗能的方式进行耗散。

4 船桥碰撞数值模拟分析

4.1 碰撞有限元模型

限于冲击试验加载能量有限,为进一步研究柔性护舷的实际防护能力,对内河某航道桥通航孔主墩采用的同类型护舷进行碰撞模拟分析。该桥已在主墩承台上设置混凝土防撞墙,能有效防护大吨位船舶撞击。而面对中小型驳船时,已有防撞设施刚度较大,碰撞能量几乎全部由船舶吸收。为较为经济地实现“船、桥双保护”,直接在防撞墙上设置柔性护舷。

建立碰撞系统有限元模型,其中船舶参考某 800 t 机动驳船型线数据和结构形式建立,船长度为 56 m,宽度为 10 m,高度为 4 m。全船采用壳单元划分,为精确反映碰撞过程,同时提高计算效率,船舶单元尺寸控制在 100 mm 以内,向船身过渡的网格划分逐渐稀疏,单元尺寸控制在 400 mm 以内。整船有限元模型共计 55 794 个单元,其中船艏部分 30 431 个单元。主墩墩身、承台、桩基均采用实体单元进行划分。柔性护舷外板、壁板、缓冲圈均采用壳单元模拟,内部耗能元件采用实体单元模拟,网格尺寸为 100 mm,以便与船舶单元尺寸匹配。为缩短计算时间,其他不与船舶发生直接接触的部分采用尺寸较大的单元划分,碰撞系统有限元模型如图 9 所示。

4.2 材料本构模型

船艏钢材采用 Cowper-Symonds 本构模型描述受应变率影响的塑性行为,通过定义关键字 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 实现^[12]。船用钢材料参数如下所示^[13]:密度为 7850 kg/m³;弹性模量为 210 GPa;屈服强度为 235 MPa;切线模量为 1.18 GPa;泊松比为 0.3;失效应变为 0.34;应变率常数 C 为 40.4、 P 为 5。船身中后部远离碰撞接触区,几乎不发生变形,为提高计算效率,采用刚体模型,通过定义关键字 *MAT_RIGID 实现。

桥墩混凝土材料采用连续盖帽本构模型模拟,通过关键字 *MAT_CSCM 实现。CSC 模型常被用于低速冲击模拟,能够准确估计 RC 构件的冲击响应^[14,15]。详细参数取值如表 1 所示^[16]。

护舷复合材料采用基于 Chang-chang 失效准则的损伤模型,该模型在复合材料结构受冲击的

表 1 CSC 模型本构参数

Table 1 CSC constitutive parameters

参 数	数值
密度 $\rho_{\text{CSC}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2500
剪切模量 $G/10^{10}$ Pa	1.166
体积模量 $K/10^{10}$ Pa	1.277
三轴压缩面常数 $\alpha/10^7$ Pa	1.471
三轴压缩面线性参数 θ	0.3016
三轴压缩面非线性常数 $\lambda/10^7$ Pa	1.051
三轴压缩面指数 $\beta/10^{-8}$ Pa ⁻¹	1.929
硬化系数 N_H	1
硬化率 C_H	0
扭转面常数 α_1	0.7473
扭转面线性参数 $\theta_1/10^{-9}$ Pa ⁻¹	1.108
扭转面非线性参数 λ_1	0.17
扭转面指数 $\beta_1/10^{-8}$ Pa ⁻¹	6.896
三轴延伸面常数 α_2	0.66
单轴压应力速率效应参数 $\eta_{oc}/10^{-4}$	1.022
单轴拉应力速率效应参数 $\eta_{ot}/10^{-5}$	6.32
最大压应力 OVERC/ 10^7 Pa	2.211
三轴延伸面线性参数 $\theta_2/10^{-9}$ Pa ⁻¹	1.336
三轴延伸面非线性参数 λ_2	0.16
三轴延伸面指数 $\beta_2/10^{-8}$ Pa ⁻¹	6.896
帽盖面长宽比 R	5
帽盖初始位置 $X_b/10^7$ Pa	9.129
最大塑性体积压实率 W	0.05
线性参数 $D_1/10^{-10}$ Pa ⁻¹	2.5
二次形参数 $D_2/10^{-10}$ Pa ⁻²	3.492
韧性形状软化参数 B	300
单轴拉伸断裂能 GFT(Pa·m)	7213
纯剪应力下的断裂能 GFS(Pa·m)	72.13
剪-压过渡参数 PWRC	5
剪-拉过渡参数 PWRT	1
压缩软化参数 PMOD	3.5
单轴压应力的速率效应功率 $N_c/10^{-4}$	1.022
单轴拉应力的速率效应功率 N_t	0.48
最大拉应力 OVERT/ 10^7 Pa	2.211

力学行为模拟方面准确度较高^[17,18]。通过定义关键字 *MAT_COMPOSITE_DAMAGE 实现,参数取值如表 2 所示。

耗能芯材密度为 40 kg/m³,弹性模量为 2.48 MPa,通过关键字 *MAT_CRUSHABLE_FOAM 模拟,可直接输入试验得到的应力-应变曲线定义材料特性。由于碰撞中芯材受压,进行了压缩性能试验,将工程上运用的成品截取制作成边长为 50 mm 立方体试件,统一编号后进行试验,试验结果如图 10 所示。

表 2 复合材料参数

Table 2 Composite material parameters

参 数	数值
密度 $\rho_F / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1800
a 方向弹性模量 E_a / GPa	20
b 方向弹性模量 E_b / GPa	20
ab 方向剪切模量 G_{ab} / GPa	4.32
bc 方向剪切模量 G_{bc} / GPa	4.32
ca 方向剪切模量 G_{ca} / GPa	4.32
a 方向拉伸强度 X_t	460
b 方向拉伸强度 Y_t / MPa	460
a 方向压缩强度 X_c / MPa	130
b 方向压缩强度 Y_c / MPa	130
剪切强度 S_c / MPa	70
泊松比 μ	0.07

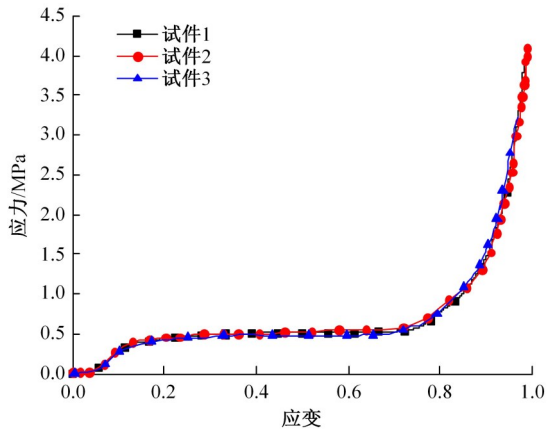


图 10 耗能芯材压缩本构

Fig. 10 Compression constitutive of core material

4.3 可靠性验证

为验证有限元模型的可靠性,对护舷的落锤冲击试验进行了数值模拟对比分析,碰撞过程落锤冲击力时程曲线对比如图 11 所示,护舷撞击点处变形与受撞过程的动态对比分别如图 12、图 13

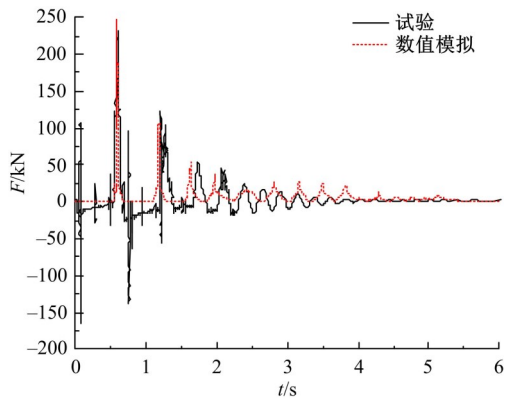


图 11 数值模拟与冲击试验碰撞力对比

Fig. 11 Impact force comparison between simulation and test

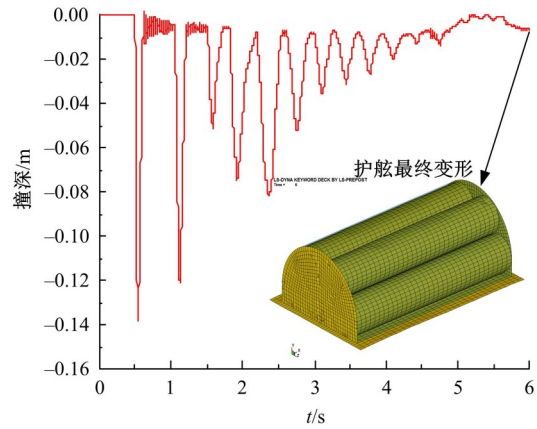
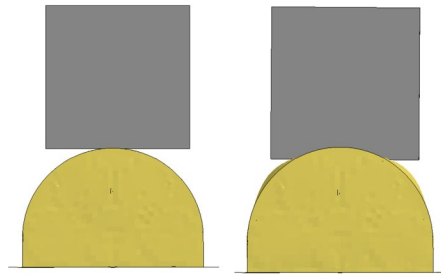


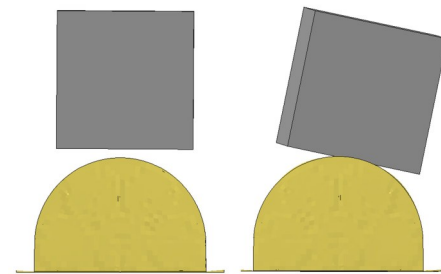
图 12 护舷撞击点处变形

Fig. 12 Deformation at the impact point of the fender



(a)接触瞬间

(b)最大压缩



(c)反弹

(d)碰撞结束

图 13 护舷受撞过程对比

Fig. 13 Collision process comparison of the fender

所示。护舷受撞处最大变形为 0.14 m, 出现在 0.6 s 时刻, 与试验中峰值撞击力出现时刻对应。碰撞结束变形基本恢复, 数值模拟与试验结果整体趋势基本一致, 吻合度较好, 说明本文有限元模型可以较好地模拟护舷受撞过程, 可靠性能得以保证。

4.4 结果分析

船舶以 3 m/s 速度与承台护舷发生正面碰撞, 碰撞能量为 3.6 MJ。碰撞过程的能量转化曲线如图 14 所示, 动能逐渐转化为船舶和护舷内能、界面滑移能、沙漏能。系统总能量基本守恒, 沙漏能占比在 5% 以内, 可认为数值模拟结果可靠。碰撞过程中有无防护下撞击力对比见图 15, 撞击混凝土防撞墙的碰撞力峰值为 7.24 MN, 柔性护舷防护下碰撞力为 6 MN, 折减了 17%。

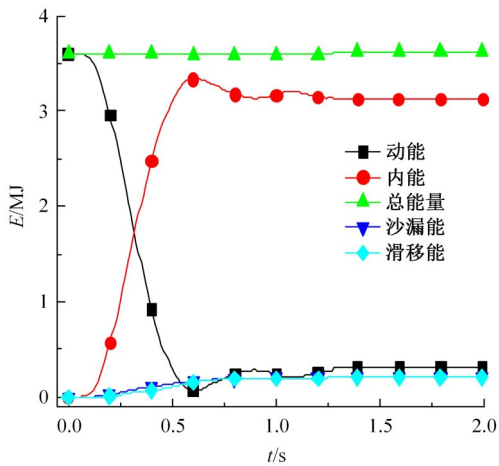


图 14 碰撞系统能量时程

Fig. 14 Energy time history of collision system

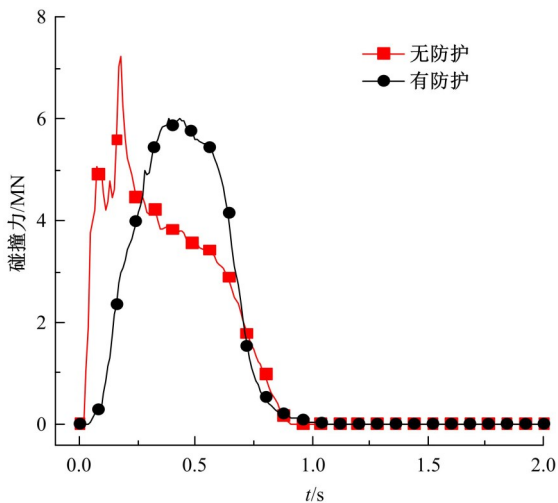


图 15 碰撞力对比

Fig. 15 Impact force comparison

船舶与护舷内能对比如图 16 所示, 无防护下碰撞能量基本转化为船舶内能, 设置护舷后, 护舷吸收了 2.28 MJ 能量, 使船舶内能降低到 0.72 MJ, 折减了 75%。撞深对比如图 17 所示, 无防护下船舶最终撞深为 0.7 m, 有护舷防护下仅为 0.1 m, 下降了 86%。由于内能与撞深的平方成正比, 有无护舷的两种工况下船舶刚度差异并不大, 撞深折减率的平方为 74%, 与内能折减率基本一致。

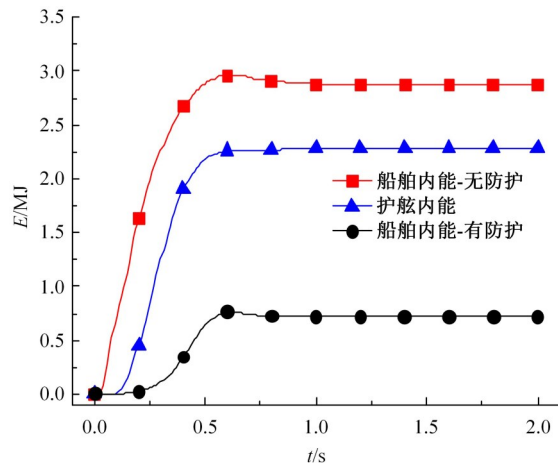


图 16 内能对比

Fig. 16 Internal energy comparison

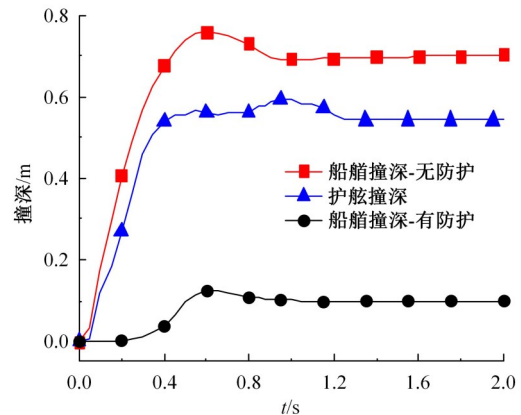


图 17 撞深对比

Fig. 17 Impact depth comparison

图 18 为有、无护舷防护下船舶损伤对比, 船舶有效应力分布区域尽管差别不大, 但在柔性护舷防护下船舶损伤程度明显减小, 原本应由船舶承担的能量转移至护舷上。该型护舷可有效防护 800 t 驳船撞击, 防护能量为 3.6 MJ。此时护舷已明显破坏, 外壁板、背板断裂, 耗能芯材被压溃, 如图 19 所示。目前, 该型护舷已在重庆千厮门嘉陵江大桥、涪陵乌江大桥等多个工程进行应用, 运营状况良好, 如图 20 所示。该型护舷具有占用空间小、经济性高及安装更换便捷的优点, 同时耐久性

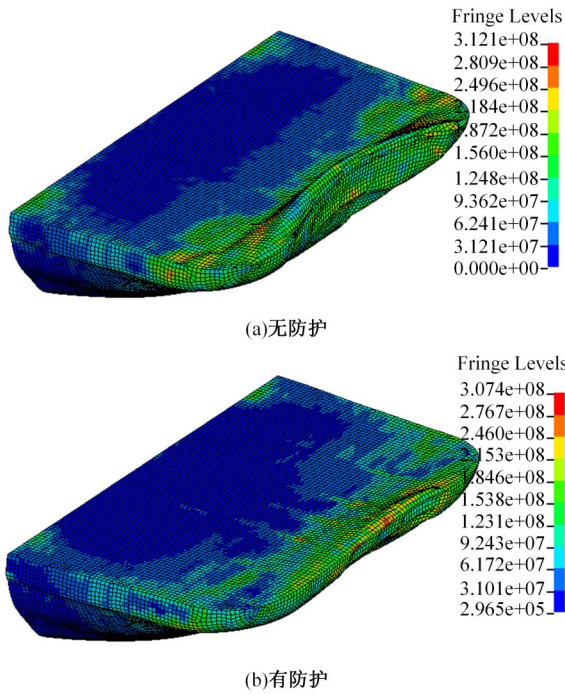


图 18 船艏损伤对比

Fig. 18 Damage comparison of bow

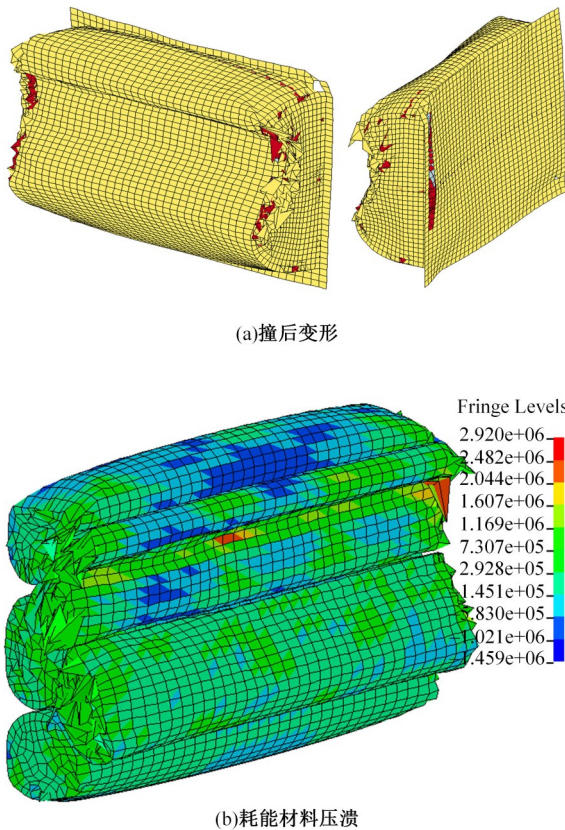


图 19 护舷破坏(单位:Pa)

Fig. 19 Fender damage(unit:Pa)

较传统橡胶护舷更好,可与既有防护结构搭配使用,以调节防护结构过大刚度,从而实现多目标型的柔性防护。



(a)千厮门嘉陵江大桥



(b)乌江大桥

图 20 柔性护舷工程应用

Fig. 20 Engineering application of flexible fender

5 结 论

(1)采用乙烯基树脂作为基体材料时,护舷压缩性能优于聚氨酯树脂,压缩反力和压缩刚度分别提高了152%、150%。在填充耗能芯材后,护舷压缩性能可再次提高125%,是最优的结构形式。

(2)足尺冲击试验下,冲击能量为20.4 kJ,护舷的撞击力折减率达到97%,梁底位移折减率达到87%。护舷受撞处最大变形为0.14 m,随后基本恢复,此时护舷以弹性耗能的方式耗散碰撞能量。

(3)在面对内河800 t驳船撞击时,护舷吸收了63%的碰撞能量,降低峰值船撞力17%左右,且能够大幅减轻船舶损伤,船艏撞深下降了86%,此时护舷主要以耗能芯材的压溃吸收碰撞能量。

(4)该柔性护舷可应用于低等级航道主墩,或与高等级航道桥墩的既有防护结构联合使用,以防护中小型船舶撞击。

参考文献:

[1] Larsen O D . Ship Collision with Bridges: The Interaction Between Vessel Traffic and Bridge Structures [M]. Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering, 1993.

- [2] JTG/T 3360-02—2020. 公路桥梁抗撞设计规范[S].
- [3] 王君杰, 耿波. 桥梁船撞概率风险评估与措施[M]. 中国: 人民交通出版社, 2010.
- [4] 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, 510.
Zhang Xi-xiang, Wang Zhi-xiang, Wu Zu-lie, et al. A late model FRP floating pontoon protection structure for bridge piers in the ship collision[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(3): 388-393, 510.
- [5] Fang Hai, Mao Yi-feng, Liu Wei-qing, et al. Manufacturing and evaluation of large-scale composite bumper system for bridge pier protection against ship collision[J]. Composite Structures, 2016(158): 187-198.
- [6] 方海, 王健, 祝露, 等. 武汉鹦鹉洲长江大桥中塔墩防撞装置研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(1): 20-25.
Fang Hai, Wang Jian, Zhu Lu, et al. Study of collision protection devices for central pylon pier of Yingwuzhou Changjiang river bridge in Wuhan[J]. Bridge Construction, 2020, 50(1): 20-25.
- [7] Wang Li-li, Yang Li-ming, Huang De-jin, et al. An impact dynamics analysis on a new crashworthy device against ship-bridge collision[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(8): 895-904.
- [8] Wang J J, Song Y C, Wang W, et al. Evaluation of flexible floating anti-collision device subjected to ship impact using finite-element method[J]. Ocean Engineering, 2019, 178: 321-330.
- [9] Fan Wei, Guo Wei, Sun Yang, et al. Experimental and numerical investigations of a novel steel-UHP-FRC composite fender for bridge protection in vessel collisions[J]. Ocean Engineering, 2018, 165: 1-21.
- [10] 周凌宇, 濮星旭, 卫军. 装配式 UHPC 防撞耗能装置的性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2019, 50(4): 923-930.
Zhou Ling-yu, Pu Xing-xu, Wei Jun. Precast UHPC protection system for bridge pier against ship collision[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2019, 50(4): 923-930.
- [11] 李华永, 周凌宇, 王强, 等. 新型装配式钢-UHPC 防撞装置关键参数及其性能研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2021, 52(2): 519-528.
Li Hua-yong, Zhou Ling-yu, Wang Qiang, et al. Research on key parameters and performance of new fabricated steel-UHPC anti-ship collision device[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(2): 519-528.
- [12] LSTC. Keyword User's Manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [13] 郑植, 耿波, 袁佩, 等. 桥墩复合材料防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.
Zheng Zhi, Geng Bo, Yuan Pei, et al. Experimental study on a new connection of composite materials anti-collision device for piers[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(5): 66-73.
- [14] Fan W, Yuan W C. Numerical simulation and analytical modeling of pile-supported structures subjected to ship collisions including soil-structure interaction[J]. Ocean Engineering, 2014, 91(15): 11-27.
- [15] Liu B, Fan W, Guo W, et al. Experimental investigation on and improved FE modeling of axially-loaded circular RC columns under lateral impact loading[J]. Engineering Structures, 2017, 152(1): 619-642.
- [16] Xie R, Fan W, Liu B, et al. Dynamic behavior and vulnerability analysis of bridge columns with different cross-sectional shapes under rockfall impacts[J]. Structures, 2020, 26: 471-486.
- [17] Zhu L, Liu W, Fang H, et al. Design and simulation of innovative foam-filled lattice composite bumper system for bridge protection in ship collisions[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 157: 24-35.
- [18] Wang J J, Song Y C, Wang W, et al. Evaluation of composite crashworthy device for pier protection against barge impact[J]. Ocean Engineering, 2018, 169: 144-158.