

文章编号: 1007-7294(2025)04-0629-16

基于梯形泡沫铝复合夹层结构的 新型船-桥碰撞防护装置损伤特性研究

刘 昆¹, 张子阳², 王加夏¹, 俞同强¹

(1. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212003; 2. 上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

摘要: 随着交通运输业的高速发展, 船-桥碰撞事故时有发生并带来相关人员生命、财产损失, 船-桥防撞设施在保护桥梁结构的同时也能降低船舶的损伤。针对传统钢制套箱刚度大、防护位置固定等不足, 本文基于梯形泡沫铝复合夹层结构设计自浮式新型船-桥防撞装置, 通过有限元软件 LS-DYNA 建立考虑了桩-水-土耦合的船-防撞装置-桥墩碰撞模型, 开展典型碰撞载荷作用的船-防撞装置-桥墩损伤特性研究, 评估了不同的船速、碰撞角度等因素下防撞装置的耐撞性能。结果表明, 该防撞装置具备优异的缓冲、吸能特性, 能有效降低碰撞力峰值, 延长碰撞作用时间, 在减小桥墩损伤的同时可以有效减小船艏结构损伤。

关键词: 船-桥碰撞; 梯形泡沫铝复合夹层结构; 防撞装置; 流固耦合; 损伤特性

中图分类号: U447 U663.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.04.011

Damage characteristics of new ship-bridge collision protection device with trapezoidal aluminum foam composite sandwich structure

LIU Kun¹, ZHANG Zi-yang², WANG Jia-xia¹, YU Tong-qiang¹

(1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: With the rapid development of the transportation industry, ship-bridge collision accidents occur from time to time and bring about loss of life and property. Ship-bridge anticollision facilities can reduce the damage of ships while protecting the bridge structure. In view of the shortcomings of traditional steel box, such as high stiffness and unchangeable protection position, a new self-floating ship-bridge anti-collision device is designed based on gradient foam aluminum composite sandwich structure. A ship-anticollision device-bridge pier collision model considering pile-water-soil coupling effect was established by finite element software LS-DYNA. The damage characteristics of ship-anticollision device-pier under typical collision loads were studied, and the crashworthiness of anticollision device under cases with different ship speed and ship collision angle were evaluated. The results show that the anticollision device has excellent buffering and energy absorption characteristics, which can effectively reduce the peak value of collision force, prolong the collision time, reduce the damage of pier and effectively reduce the damage of bow structure.

Key words: ship-bridge collision; gradient aluminum foam composite sandwich structure; vessel collision protection device; fluid-structure interaction; damage characteristics

收稿日期: 2024-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52171311; 52271279)

作者简介: 刘 昆(1984-), 男, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: kunliu@just.edu.cn; 张子阳(1998-), 男, 硕士研究生。

0 引言

船舶与桥梁的桥墩碰撞(简称船-桥碰撞)是一种复杂的非线性动态响应过程,它具有非常明显的动力特性^[1]。船-桥相撞往往会导致桥梁和船舶结构严重受损,对相关人员生命和财产安全构成巨大风险。根据美国州级公路与运输官员协会(AASHTO)^[2]的数据,从1960年到2002年,船舶碰撞导致全球31座主要桥梁倒塌,造成342人死亡。1959年至2008年,中国武汉长江大桥发生了近100起船舶与桥梁碰撞事故^[3]。因此,有必要多方面考虑船桥碰撞场景的特点,开展新型防撞装置的设计以及船-防撞装置-桥梁碰撞损伤特性研究,这对指导船舶、桥梁、防撞装置结构的设计具有实际意义。

船舶碰撞的研究方法主要有试验法、简化解析方法和非线性有限元法^[4]。Brink-Kjer等^[5]对船-防撞人工岛碰撞过程开展了缩尺试验,其结果表明,建立防撞人工岛可显著降低传递给桥墩的水平力。虽然通过试验法可以直接得到船-防撞设施碰撞过程的各项数据,但是试验的成本高、耗时长。Kim等^[6]曾采用简化动力的方法,分析了船舶与桥墩碰撞角度等不确定因素对重力式防撞墩耐撞性能的影响,结果表明,在防撞设施的安全设计中考虑碰撞角度等不确定因素,会显著降低船桥碰撞的风险。然而,简单能量或等效静力分析的方法普遍忽略了船-防撞设施碰撞时的动力相互作用特点以及损伤变形模式等,而实际上在二者的动力相互作用下双方均存在能量耗散,因此为了更加合理地开展防撞结构设计,需要分析船-防撞结构碰撞动力相互作用及损伤变形特性。近年来,我国广泛运用套箱式护舷防撞设施^[7-9],并且主要采用目前发展较为成熟的非线性有限元技术来进行分析,这种数值计算方法能够较为准确地模拟船舶与套箱式等防撞结构的相互作用过程,可以有效分析船-防撞结构-桥墩结构损伤特性。许明财等^[10]通过LS-DYNA有限元软件,对Y形夹层结构形式的船桥碰撞防护装置进行了耐撞性能及结构损伤特性研究,结果表明,相比于传统的钢制套箱,新型夹层结构具有更好的耐撞性,具有良好的防撞效果。此外,泡沫铝材料^[11]作为新型轻质抗碰撞材料具有缓冲、吸能等特性,被广泛应用于防撞装置的填充材料。其中,泡沫铝复合夹层板在海工结构物防护领域中的研究越来越受到重视。赵鑫磊等^[12]为了提升海上风机的耐撞性能,设计了泡沫铝夹芯板结构防护装置,采用LS-DYNA模拟船舶与海上风机碰撞过程,结果表明,泡沫铝夹芯板能显著降低海上风机的结构损伤。此外,泡沫铝复合夹层板在舰船防护领域同样具备较好的应用前景^[13]。然而,在桥梁等大型水中构筑物的防护领域中,泡沫铝复合夹层结构防撞装置的研究较少。因此,具备轻质、缓冲、吸能特性的新型泡沫铝复合夹层结构的套箱式护舷碰撞防护装置,亟待进一步研究。

本文通过LS-DYNA软件建立考虑了桩-水-土耦合的船舶-防撞装置-桥墩的碰撞数值模型,设计梯形波纹泡沫铝复合夹层结构的新型防撞装置,通过与模型试验的对比,验证针对梯形波纹泡沫铝复合夹层结构材料碰撞模型的有效性,在此基础上开展典型碰撞载荷作用下的船-防撞装置-桥墩损伤特性研究,评估不同的船速、船撞角度等因素下防撞装置的耐撞性能。

1 基于梯形波纹泡沫铝复合夹层板的桥墩防撞装置设计

本文设计的基于梯形波纹泡沫铝复合夹层板的新型防撞装置如图1所示,该防撞装置由76个模块化箱体组成,单个箱体封闭后可实现自浮,箱体顶盖可拆卸,采用注水压载或者金属块配重等形式使各箱体吃水相同。浮箱外壁材料为304不锈钢,内部耗能填充元件选择具备强缓冲、高吸能属性的泡沫铝材料。防撞装置采用装配式模块化设计,分为3种箱体:梯形防撞箱、连接箱和侧壁防撞箱(如图1(b)所示)。梯形防撞箱的单个箱体为厚度13 mm、纵桥向最大长度1.2 m、最小长度0.4 m、横桥向最大长度0.4 m的梯形薄壁空间结构,用泡沫铝材料相间填充于其空腔。连接箱可根据被保护桥墩尺寸来调整箱体尺寸与其他两种箱体连接,箱体厚度和梯形防撞箱保持一致。侧壁防撞箱单个箱体的长为1.1~1.2 m,宽为0.4 m,高为2.5 m,厚度为13 mm。

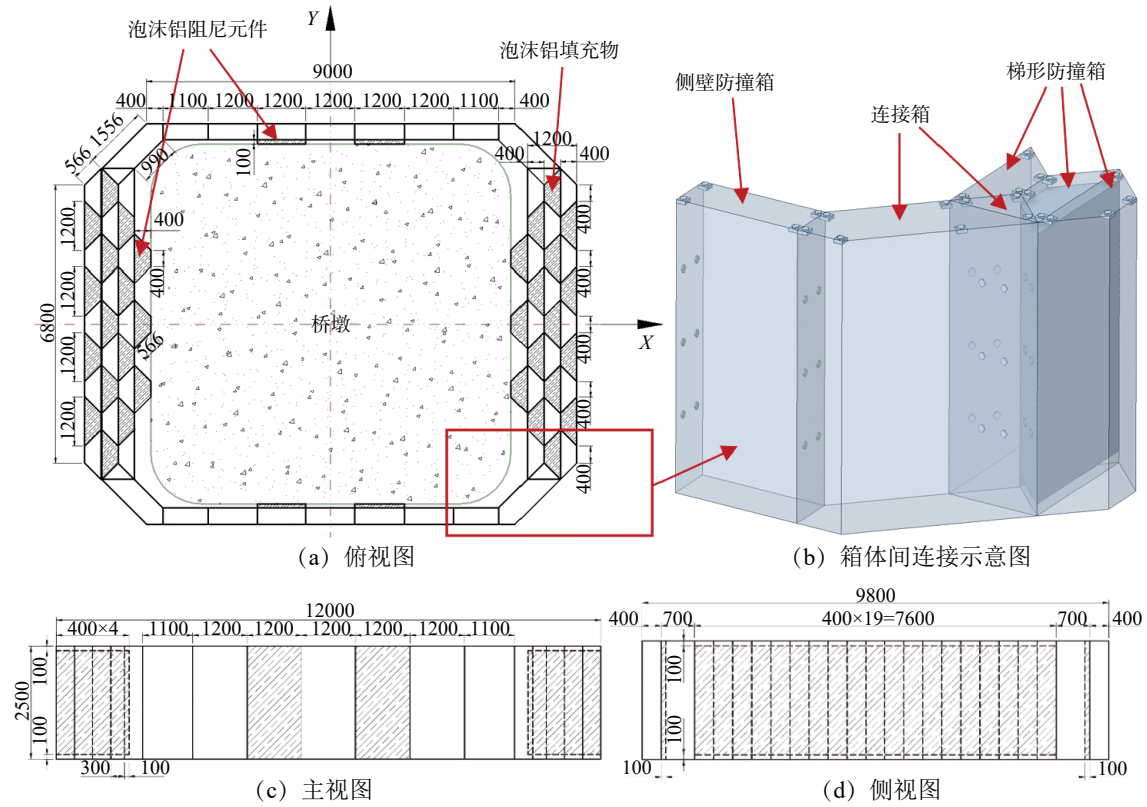


图 1 梯形波纹泡沫铝复合夹层结构防撞装置 (单位: mm)

Fig.1 Impact protection device with trapezoid corrugated aluminum foam composite sandwich structure

2 数值模型

2.1 S-ALE 算法理论

LS-DYNA 中的 S-ALE 耦合算法能同步计算结构的损伤变形及船体/防撞装置外流体的作用,如图 2 所示,这种算法可以使结构和流体网格重叠,能克服单元严重畸变引起的数值计算困难,并实现流体-结构耦合的动态分析,有较高的计算效率和精度^[14]。

在这里引入相对速度 w , 定义 $w = v - u$, 式中 v 为物质速度, u 为网格的速度, S-ALE 算法的控制方程可以由下列守恒方程给定。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - w_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$v \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho w_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma_{ij} v_{i,j} + \rho b_i v_i - \rho w_j \frac{\partial E}{\partial x_j} \quad (3)$$

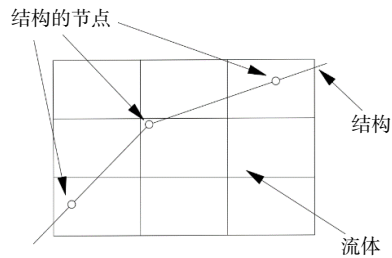


图 2 S-ALE 耦合算法原理

Fig.2 Schematic diagram of S-ALE coupling algorithm

式中, ρ 是密度; b_i 是力; E 是能量; σ_{ij} 是应力张量; $\sigma = -P + \tau$, 其中, τ 是剪应力, P 是压力。

2.2 船桥碰撞有限元理论

船桥碰撞动力学方程^[15] 可以表示为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F^{ext} \tag{4}$$

式中, M 为质量矩阵, C 为阻尼矩阵, K 为刚度矩阵, \ddot{x} 为加速度向量, \dot{x} 为速度向量, x 为位移向量, F^{ext} 为负载。

2.3 船-防撞装置-桥墩碰撞场景有限元模型

本文采用 S-ALE 算法建立流体参数化模型, 总尺寸为 70 m×30 m×8 m, 单元类型为 ALE 单元, 选择 *MAT_NULL 材料模型, 通过状态方程分别表征空气和水的流体力学参量的函数关系^[16], 空气和水的相关参数见表 1。为了更准确、真实地模拟船-防撞装置-桥碰撞过程中的流体特征, 在耦合流体和固体单元的同时, 需要对流体进行静水压力和体积初始化, 以得到准确的水压力。由于重力作用, 水层存在初始静水压力, 导致压力振动随深度增大。因此, 必须设置初始阻尼以减小振动, 临界质量加权阻尼系数为 300 N·s/m。另外, 船体内需要填充空气 ALE 材料组, 以防止船体出现渗漏问题, 从而保证计算的准确性。由于远离碰撞区水域几乎不受碰撞过程产生的作用力影响, 因此通过 *BOUNDARY_SPC_SET 设定无反射边界条件来模拟无限区域水体, 如图 3(a)所示。

表 1 水域和空气域材料参数^[16]

Tab.1 Parameters of materials in water and air domains^[16]

流体类型	材料模型/状态方程	参数/单位	数值	
空气	*MAT_NULL	密度 $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.1845	
		截断压力 P / Pa	-10	
		粘性系数 $\eta / (\text{Pa}\cdot\text{s})$	1.844×10^{-5}	
		C4	0.4	
		C5	0.4	
		*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL (#2)	E0/Pa	$2.533\ 125 \times 10^5$
水	*MAT_NULL	密度 $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	998.21	
		截断压力 P / Pa	-100	
		粘性系数 $\eta / (\text{Pa}\cdot\text{s})$	8.684×10^{-5}	
		C0/Pa	$1.013\ 25 \times 10^5$	
		*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL (#2)	C1/Pa	2.25×10^9

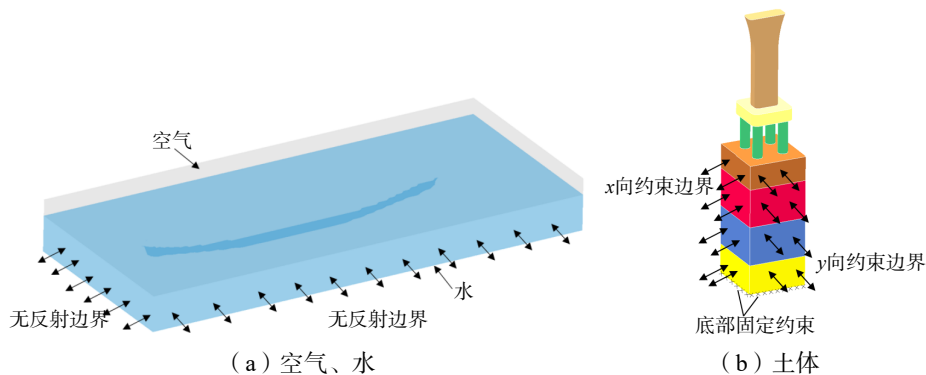


图 3 边界条件示意图

Fig.3 Boundary condition diagram

撞击船以一艘 1000DWT 内河船舶为代表船型建立有限元模型，船舶主尺度见表 2。有限元模型中的外板、甲板、舱壁等构件单元类型为 SHELL163，纵骨、肋骨等内部构件单位类型为 BEAM161，艏部加密区网格大小为 0.05 m，非加密区网格大小为 0.2–0.3 m，共计 72 073 个单元。船体采用 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 材料模型，表 2 中材料参数及 Q235 真实应力应变曲线^[17]作为仿真输入，并通过 Cowper-Symonds 本构方程考虑其应变率，取 $C=40, P=5$ ^[17]。

表 2 船舶主尺度及材料参数

Tab.2 Main dimensions and material parameters of ship

总长 L/m	型宽 B/m	型深 D/m	吃水 T/m	材料	密度 $\rho / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	失效应变
51.3	8.1	4.7	2.7	Q235	7850	206	0.3	0.25

针对图 1 防撞装置结构尺寸参数建立有限元模型，碰撞区域网格做加密处理，大小为 0.05 m，其余大小为 0.1 m，网格数量为 339 305 个，表 3 给出了有限元模型参数。由于船-防撞装置相撞是瞬时动力响应的过程，因此单个箱体之间以及泡沫铝填充物/阻尼元件与不锈钢箱体之间共节点耦合，不考虑单个构件之间相对滑移滞后的现象^[18]，忽略螺栓的连接作用。另外，除表 3 给出的基本材料参数外，还需要将图 4、图 5 分别给出的 304 不锈钢^[19–20]、泡沫铝材料^[21] 真实应力应变曲线作为仿真输入。

表 3 防撞装置有限元模型参数

Tab.3 Parameters of finite element model of impact protection device

部件	不锈钢箱体	泡沫铝填充/阻尼材料
材料模型	*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY	* MAT_CRUSHABLE_FOAM
材料参数	密度 7900 kg/m^3	密度 510 kg/m^3
	弹性模量 200 GPa	弹性模量 0.2 GPa
	泊松比 0.3	泊松比 0.33
	屈服强度 339.2 MPa	泊松比 0.33
失效应变 0.36		
单元类型	SHELL163	SOLID164

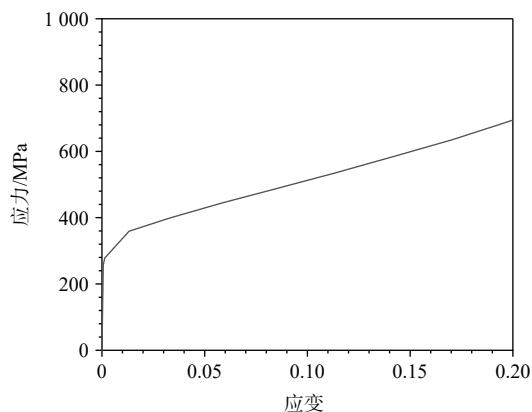


图 4 304 不锈钢真实应力-应变曲线^[19–20]

Fig.4 True stress-strain curves of 304 stainless steel

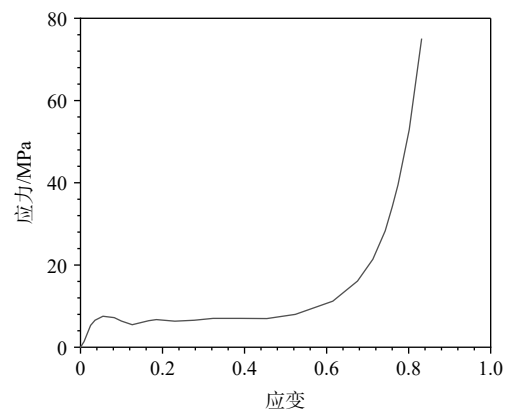


图 5 泡沫铝材料真实应力-应变曲线^[21]

Fig.5 True stress-strain curves of aluminum foam material

根据该桥梁实际地质资料，本文对桥墩桩基周围河床以下 27 m 内的四层土体进行建模，土体选择 *MAT_DRUCKER_PRAGER 材料模型，单元类型为 SOLID164，网格大小为 0.4 m，单元数为 61 415 个。桩-土相互作用通过面面自动接触算法定义，摩擦系数为 0.45^[22–23]。通过 *BOUNDARY_SPC_SET 关键字对土体四周沿法线方向约束，底部固定约束，如图 3(b)所示。土体材料参数见表 4^[22–23]。

表4 土体参数^[22-23]Tab.4 Soil parameters^[22-23]

土层	名称	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	摩擦角 $\varphi/^\circ$	粘聚力 C/GPa
1	砾砂	2050	40	0.29	32	0.005
2	中风化泥质粉砂岩	1950	600	0.3	42	0.78
3	微风化泥质粉砂岩	2050	750	0.35	45	1.5
4	未风化泥质粉砂岩	2250	1000	0.35	45	2

本文对某公路桥主通航孔桥墩建立有限元模型, 网格大小为 0.1 m, 数量为 554 308 个, 材料模型及参数见表 5。另外, 通过 Cowper-Symonds 本构方程考虑钢筋材料应变率, 取 $C=40, P=5$ ^[17]。混凝土采用 CSCM 模型^[24-25], 混凝土失效通过 *MAT_ADD_EROSION 关键字来实现, 失效应变为 0.15^[26-27]。考虑到碰撞时间很短, 钢筋与混凝土之间通常采用完全粘结, 因此采用 *CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID 耦合二者的相互作用。此外, 通过对上部结构重量估算, 在墩顶施加的恒载为 1.81 MPa。

表5 桥墩有限元模型参数

Tab.5 Parameters of finite element model for pier

部件	混凝土	钢筋
材料模型	*MAT_CSCM_CONCRETE	*MAT_PLASTIC_KINEMATIC
材料参数	密度 2400 kg/m ³ 圆柱体单轴抗压强度 38.4 MPa 最大骨料粒径 13.57 mm	密度 7800 kg/m ³ 弹性模量 200 GPa 泊松比 0.3 纵向受拉钢筋屈服强度 450 MPa 架立筋、箍筋屈服强度 360 MPa 失效应变 0.15
单元类型	SOLID164	BEAM161

船舶与防撞装置之间预留碰撞距离为 0.03 m, 船-防撞装置、防撞装置泡沫铝阻尼元件-桥墩均通过面面自动接触算法实现相互作用, 动、静摩擦系数均为 0.3^[28]。船-防撞装置-桥墩碰撞场景有限元模型如图 6 所示, 船-桥碰撞场景除未考虑防撞装置外, 其余均不变。

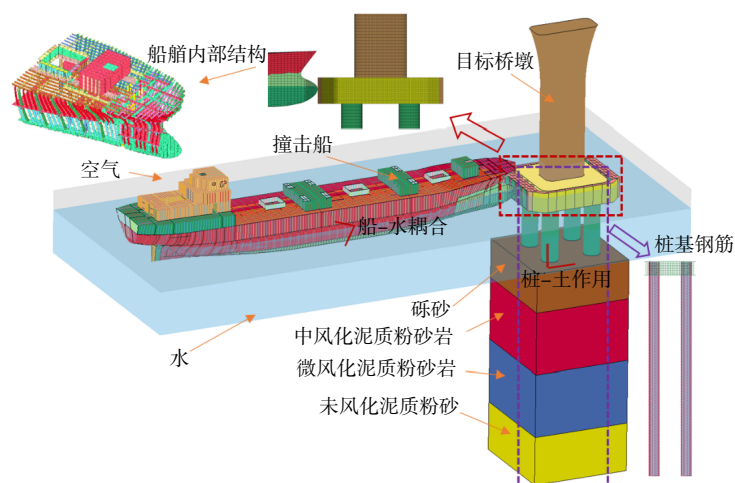


图6 船-防撞装置-桥墩碰撞场景有限元模型

Fig.6 Finite element model of collision scene of ship-impact protection device-pier

3 数值方法验证

3.1 有限元模型

为了验证本文建立的数值模型的有效性,本文参照文献[21]所述梯形波纹泡沫铝复合夹层板落锤碰撞试验进行数值模拟,分析梯形波纹泡沫铝复合夹层结构的横向碰撞行为,其有限元模型如图 7 所示。在上述模型中,泡沫铝填充物、落锤单元类型为 SOLID164,上下面板、芯层、夹具单元类型为 SHELL163,模型中 SHELL163 单元已显示厚度。上下面板、芯层及泡沫铝填充物与 2.3 节防撞装置有限元模型材料参数保持一致。由于碰撞过程中,锤头及夹具未发生变形,因此采用*MAT_RIGID 刚体材料模型,弹性模量为 210 GP,泊松比为 0.3,并通过调整材料密度把锤头质量控制为 13.268 kg。实体单元和壳单元的网格尺寸均为 1 mm,整体有限元模型总共 118 632 个单元。

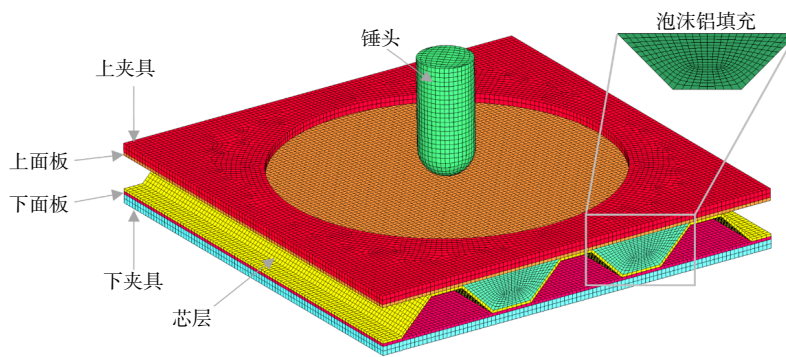


图 7 梯形波纹泡沫铝复合夹层板有限元模型

Fig.7 Finite element model of trapezoid corrugated aluminum foam composite sandwich plate

有限元计算工况的碰撞参数设定与文献[21]的试验加载方案保持一致,考虑到碰撞时间短,上下面板、泡沫铝填充物及芯层之间采用共节点耦合,上下夹具与上下面板之间为绑扎接触,锤头与夹层板之间的碰撞采用面面自动接触,动、静摩擦系数均为 0.3。

3.2 仿真计算及对比

损伤变形模式、碰撞力、塑性变形等指标可以反映夹层板结构碰撞损伤特性^[29-30]。因此,本文通过这三种参量的对比,来验证数值仿真方法的可行性。

图 8 给出了碰撞高度为 20 mm,夹层板试件产生最大塑性变形时破坏形态的试验结果^[21]和本文仿真结果的对比情况。由图可知,发生破坏的部位主要集中在试件的中心区域,破坏模式大致相同。由于上下夹具的约束对称,试件的破坏也大致对称。上面板以局部变形为主,边缘区域均没有大变形现象出现。波纹芯层均出现了不同程度的压缩,中心区域呈明显的“M 形”破坏模式。下面板中心区域略微出现塑性变形,这主要是由于芯层的挤压作用导致的。泡沫铝填充物靠近中心区域出现严重压缩变形,远离中心区域压缩变形不明显。因此,通过数值方法可以有效地表征该结构的损伤变形模式。

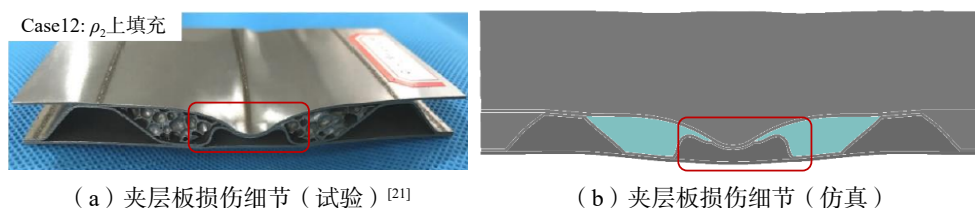


图 8 夹层板变形损伤细节对比

Fig.8 Comparison of deformation damages of sandwich plate

图9(a)给出了试验^[21]与本文仿真工况的碰撞力时程曲线,两者碰撞力时程曲线的趋势大致相同,且碰撞力峰值的相对误差在6.6%左右,相应的数值详见表6。产生这种误差的原因主要是由于碰撞载荷产生后,试验中泡沫铝填充材料出现了部分压溃失效现象,而仿真中未考虑其失效。图9(b)为数值计算的上、下面板中心区域位移时程曲线,可以看到,上面板位移量明显大于下面板,这是由于芯层和泡沫铝填充物吸收了大多数碰撞产生的能量,上面板塑性段变形量为8.84 mm,与试验所得的8.8 mm相对误差仅为0.45%;下面板塑性变形的仿真值为1.95 mm,与试验值1.85 mm相对误差为5.4%,误差也算相对较小。总体而言,碰撞力模拟曲线在数值大小和变化规律上均与试验曲线接近,因此利用本文的数值模型研究梯形波纹泡沫铝复合夹层结构在碰撞荷载作用下的结构响应是可行的。

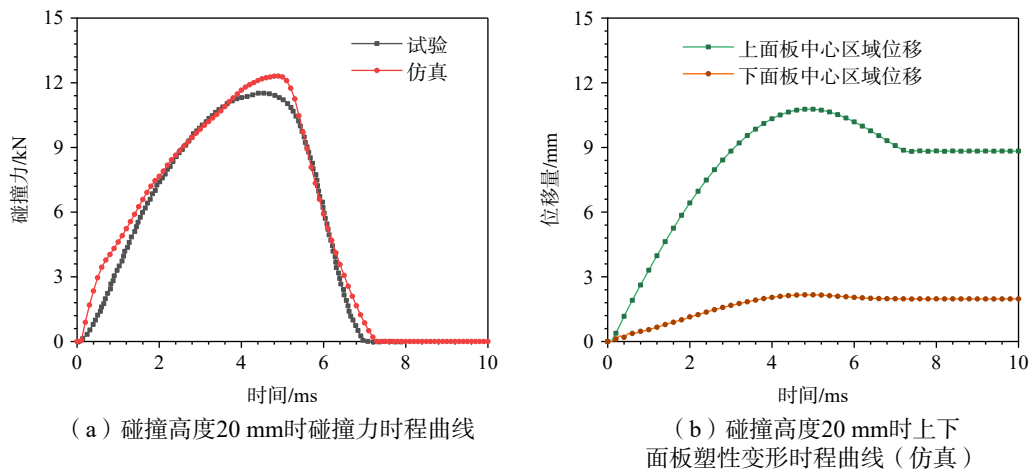


图9 碰撞力及面板塑性变形时程曲线

Fig.9 Time history curve of impact force and panel plastic deformation

表6 梯形波纹泡沫铝复合夹层板碰撞试验与仿真结果对比

Tab.6 Comparison of collision test and simulation results of trapezoid corrugated aluminum foam composite sandwich plate

冲击高度/ mm	冲击速度/ (m·s ⁻¹)	碰撞力			上面板塑性变形			下面板塑性变形		
		试验值/kN	仿真值/kN	误差/%	试验值/mm	仿真值/mm	误差/%	试验值/mm	仿真值/mm	误差/%
20	3.363	11.54	12.3	6.6	8.8	8.84	0.45	1.85	1.95	5.4

4 典型碰撞载荷作用下船-防撞装置-桥墩结构损伤特性分析

从安全方面考虑,船舶迎面正撞桥墩/防撞装置为横桥向最不利工况,因此取船撞速度为5 m/s,碰撞角度为90°的撞击工况作为典型碰撞场景。

4.1 船舶结构损伤特性分析

图10、11给出了在有/无防撞装置下,碰撞力达到最大时刻的船舶结构应力和塑性应变云图。整体上看,船体损伤均集中在艏部撞击区域,塑性变形主要发生在艏部外板、横纵舱壁以及甲板附近,球鼻艏外板出现明显损伤,主要表现为压溃失效现象,具有明显的局部性,有/无防撞装置工况下艏部最大撞深分别为0.300 m/0.782 m,显然防撞装置有效降低了船艏的损伤。图12为各构件吸能曲线,可以看到两种工况下艏部外板在压溃过程中均为主要吸能构件,其次是连接外板的纵舱壁、横舱壁及甲板,其他构件吸收的能量较小,但是两种工况下船舶总能量有较大差异,这主要是因为碰撞过程中防撞装置吸收了较多能量。图13、14分别给出了船速的时程曲线和碰撞力时程曲线,由于船艏结构在碰撞过程

中发生破坏, 撞击力时程曲线均呈现出多个波峰、波谷, 具有较强的非线性波动特性, 有/无防撞装置时碰撞力峰值分别为 9.279 MN、17.514 MN, 换言之, 在加装防撞装置之后, 碰撞力降低了 47.02%, 且延长了碰撞作用时间。碰撞发生一段时间之后, 碰撞力降低至零, 这是由于船舶动能逐步转化为内能, 船速逐渐下降, 撞击船即将反弹远离桥墩/防撞装置。因此, 该防撞装置具有优越的吸能、缓冲特性, 可以有效降低船体损伤。

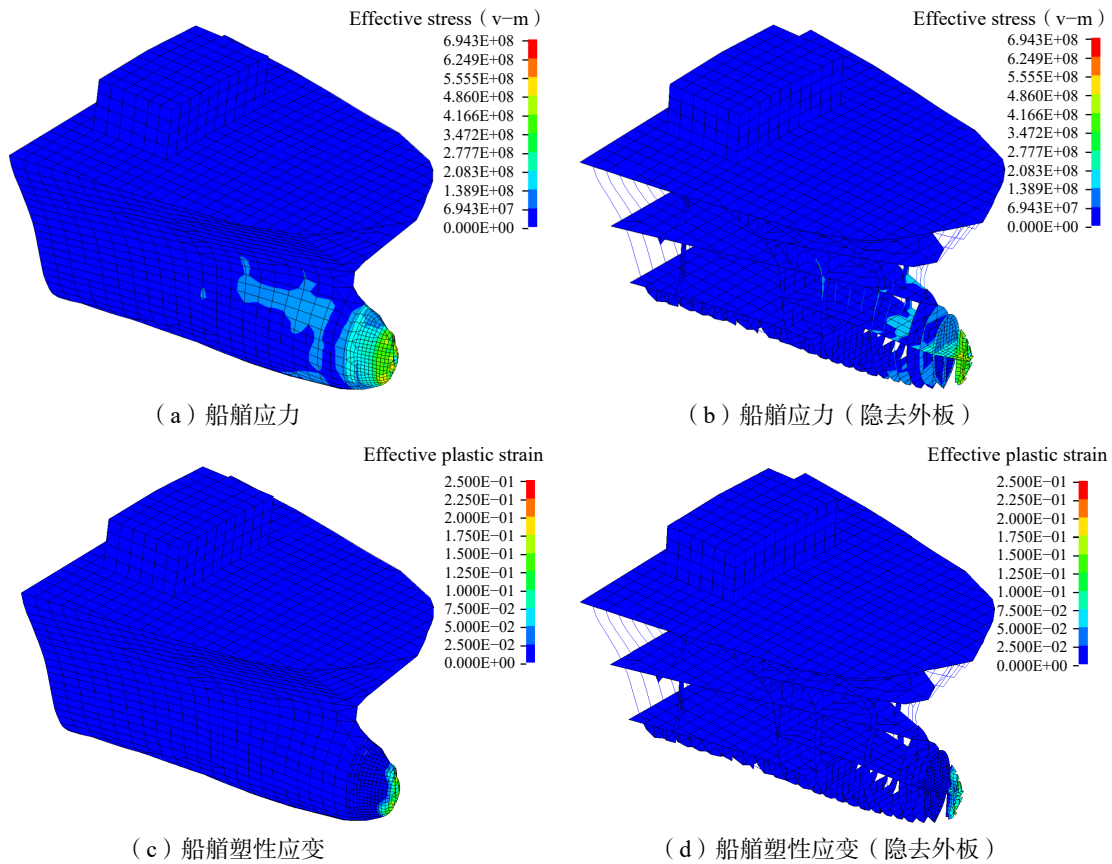
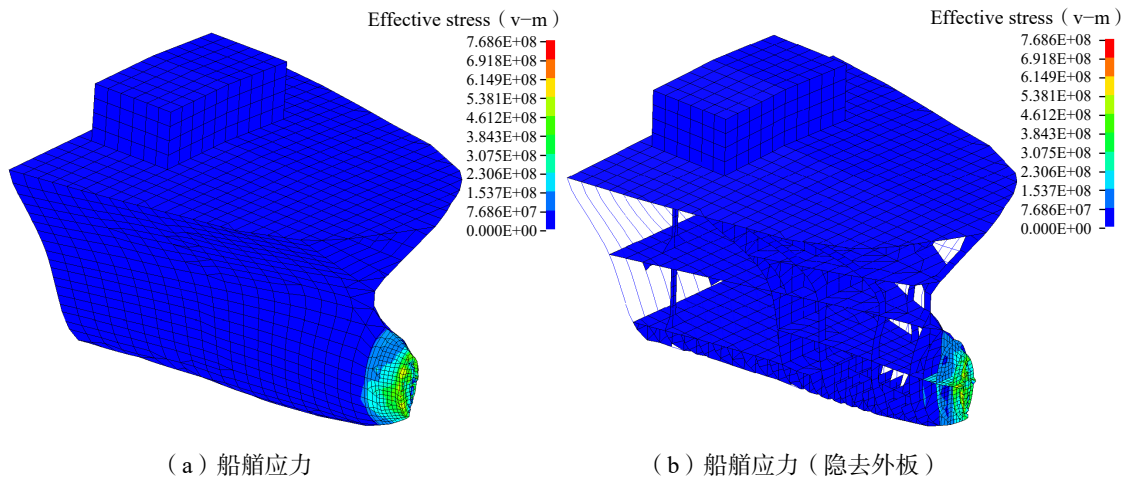


图 10 船舶应力应变云图 (有防撞装置)

Fig.10 Stress and strain nephogram of ship bow (with impact protection device)



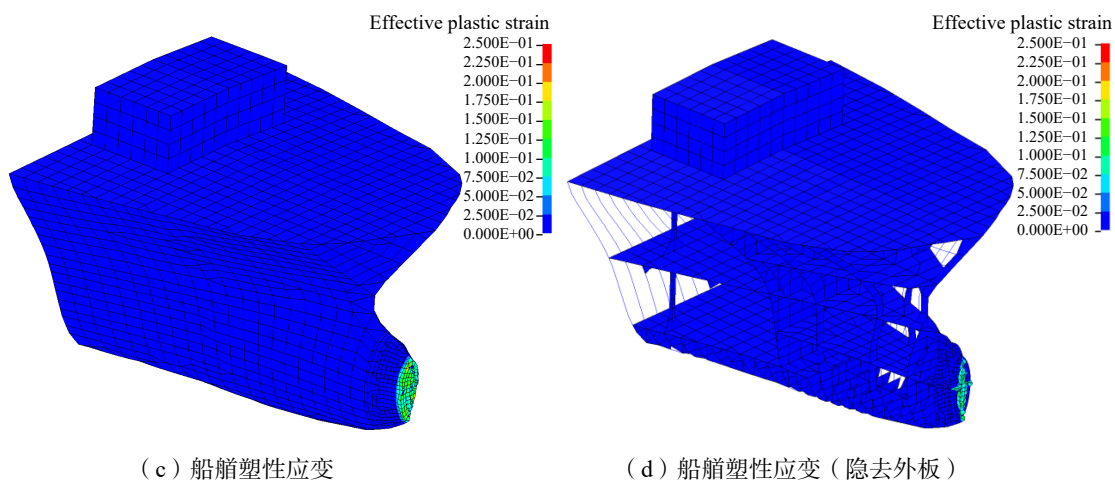


图 11 船舶应力应变云图 (无防撞装置)

Fig.11 Stress and strain nephogram of ship bow (without impact protection device)

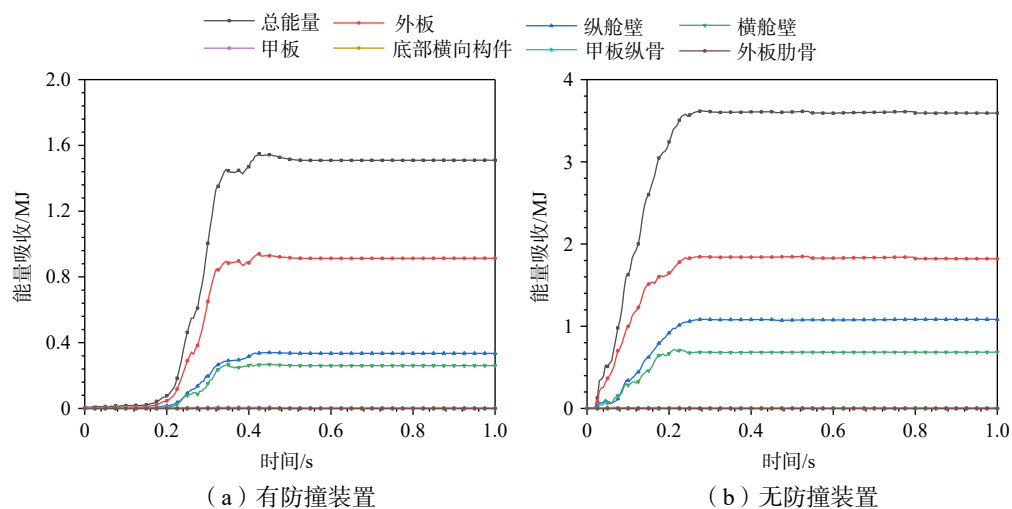


图 12 船舶各构件吸能曲线

Fig.12 Energy absorption curve of each component of ship bow structure

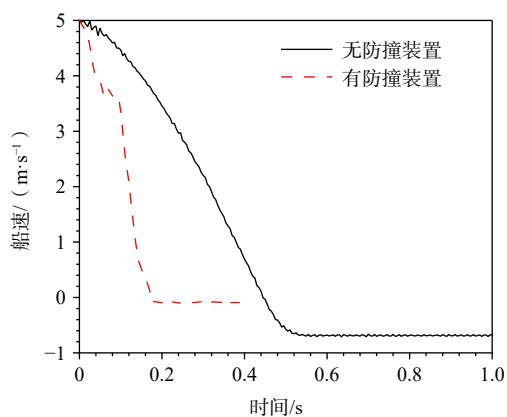


图 13 船速时程曲线

Fig.13 Time history curve of ship speed

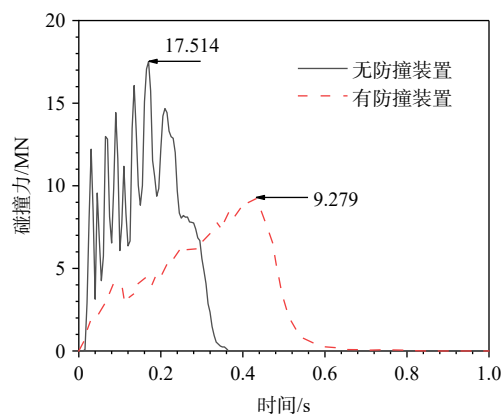


图 14 碰撞力时程曲线

Fig.14 Time history curve of collision force

4.2 防撞装置损伤特性分析

图 15 给出了碰撞结束时刻防撞装置的应力、应变云图。整体上看,最大应力和应变主要集中在碰撞区域,具有明显的局部性。除了迎撞面部分箱体出现了较为严重的损伤之外,箱体与桥墩之间的泡沫铝阻尼元件也有较为严重的压缩变形,其余箱体损伤程度并不明显,因此只需要及时更换部分受损的箱体即可。图 16~17 为该防撞装置各部分吸能及最大撞深的时程曲线,可以看到,防撞装置整体吸收了 9.612 MJ 的能量,其中迎/背撞面防撞箱、泡沫铝填充/阻尼元件吸收了主要能量,调整箱及侧壁防撞箱吸能较少,防撞装置塑性段最大撞深达到了 1.057 m,撞击区域三层箱体均出现了较为严重的损伤。

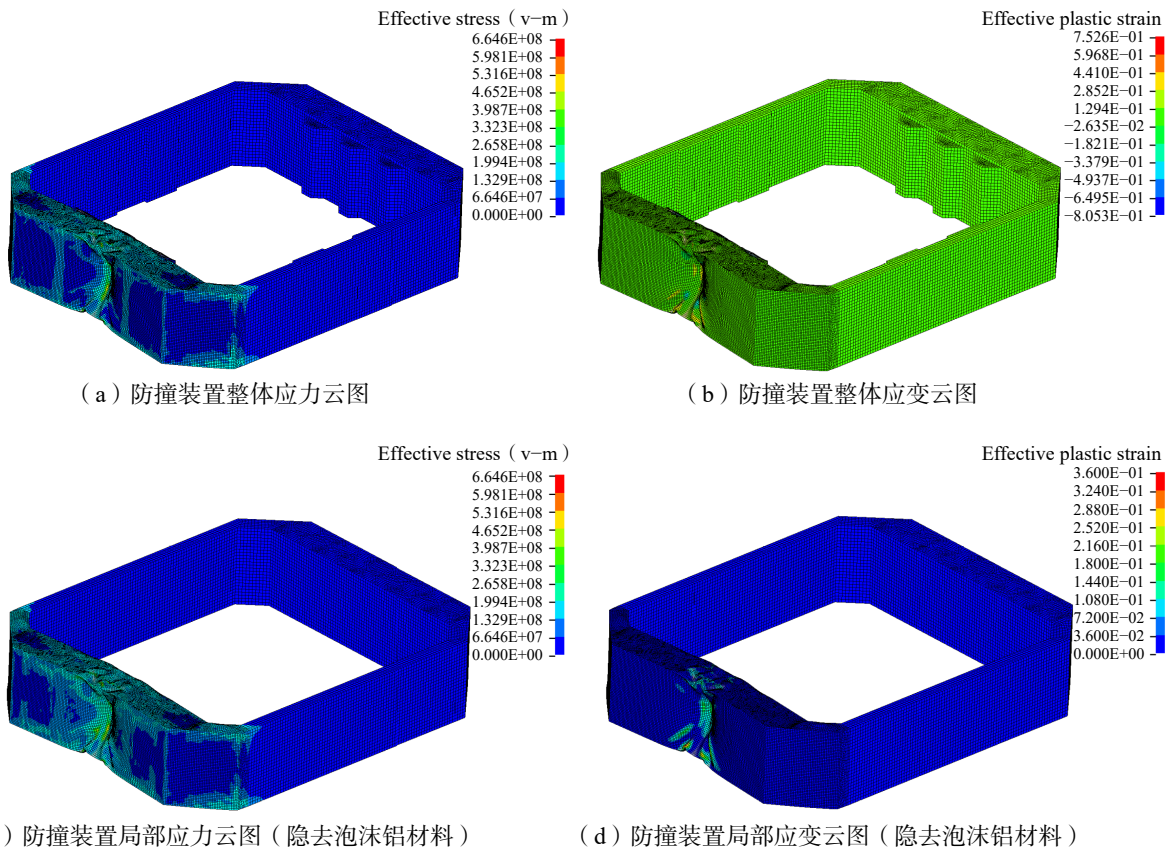


图 15 防撞装置应力应变云图

Fig.15 Stress and strain cloud diagram of impact protection device

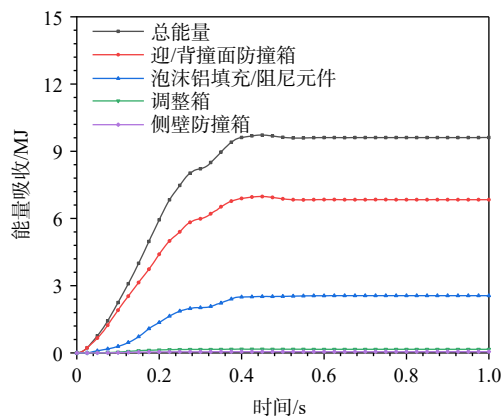


图 16 防撞装置各部分吸能时程曲线

Fig.16 Energy absorption time history curve of each part of the impact protection device

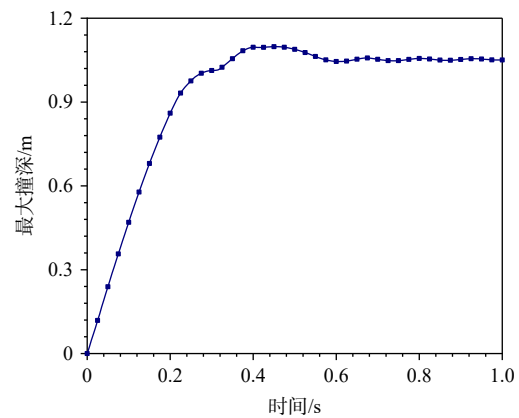


图 17 防撞装置最大撞深时程曲线

Fig.17 Time history curve of maximum collision depth of impact protection device

4.3 桥墩桩基结构损伤特性分析

图 18(a)、(b)给出了碰撞力达到最大时刻无防撞装置工况下桥墩整体的应力、应变云图。由图可知,船-桥相撞产生的最大应力主要集中在碰撞周围、结构交接处区域,具有明显的局部性,撞击产生的裂纹也由撞击区域向墩身方向延展。桥墩混凝土局部最大应力为 35.26 MPa,并且出现了部分弯剪破坏,这是由于承台与墩身、承台交接部位结构较为薄弱,船舶撞击后,薄弱位置达到了失效应变,因此桥墩需要安装防撞装置,避免桥梁因受撞击发生垮塌造成重大人员伤亡及经济损失。图 18(c)、(d)为安装防撞装置之后碰撞力达到最大时刻应力应变云图,可以看到应力主要分布于泡沫铝阻尼元件与桥墩接触区域,桥墩整体应力仅为 1.358 MPa,且未出现塑性变形。因此,该防撞装置可以明显降低桥墩的损伤。

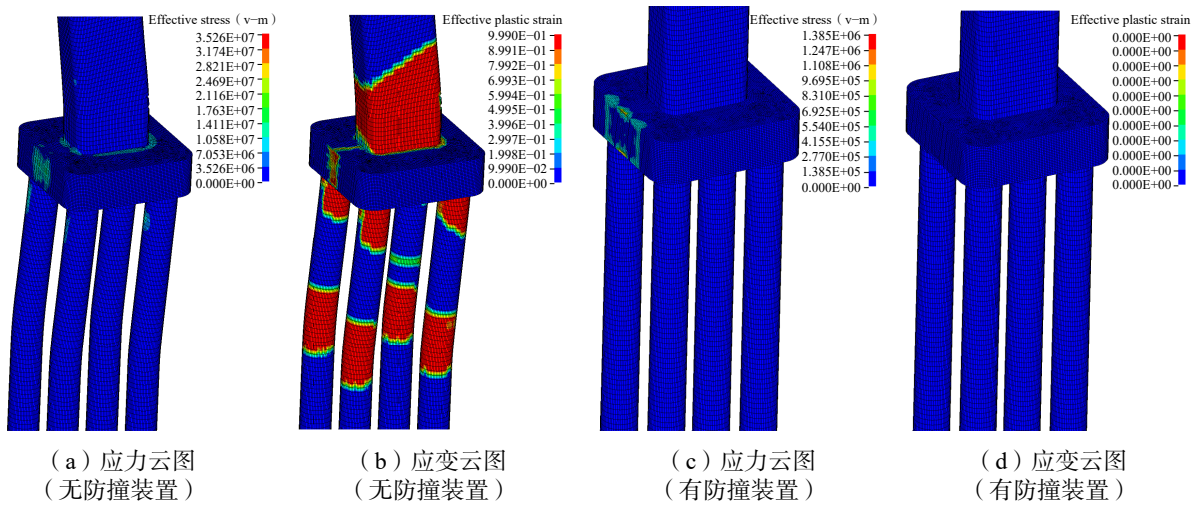


图 18 桥墩应力应变云图

Fig.18 Cloud map of stress/strain for pier

5 参数敏感性分析

本文基于 AIS 数据从而获得准确的船舶航行参数分布情况^[31],包括船撞速度、偏航角度等。据统计,该流域船舶偏航角度大概率分布在 60°~90°之间,桥区通航船舶的速度大概率分布在 2~5 m/s。因此本文选取 60°、75°、90°三种碰撞角度,2、3、4、5 m/s 四种碰撞速度,组合共计 12 种工况,对设计的防撞装置性能进一步分析和评估,船撞的角度如图 19 所示。由规范可知,防船撞力计算公式^[32]为

$$F = 0.015M^{0.7}V \tag{5}$$

式中, F 为设防船撞力,单位为 MN; M 为满载排水量,单位为 t; V 为船舶撞击速度,单位为 m/s。

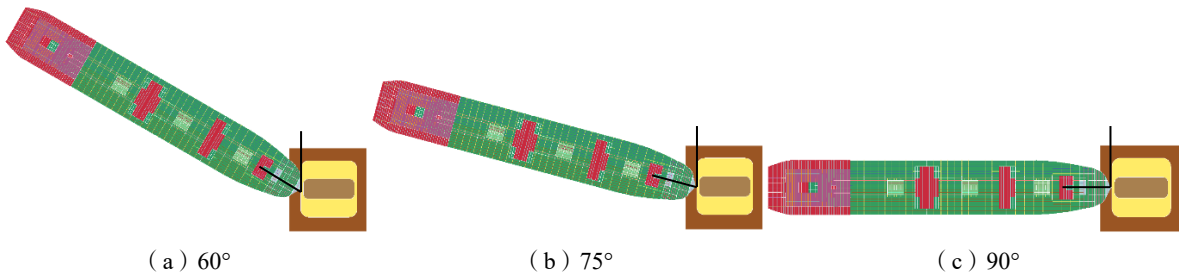


图 19 船桥碰撞角度

Fig.19 Angle between ship and bridge pier before collision

表 7 给出了不同船撞速度下该规范规定的设防船撞力大小。

表 7 不同船撞速度下有/无防撞装置性能指标对比

Tab.7 Performance comparison between cases with / without impact protection device under different ship collision speeds

速度 / (m·s ⁻¹)	无防撞装置碰撞力峰值/MN	有防撞装置碰撞力峰值/MN	碰撞力降低值/%	规范中的设防船撞力/MN	无防撞装置船艏最大撞深/m	有防撞装置船艏最大撞深/m	船艏最大撞深降低值/%
2	10.585	3.383	68.04	3.777	0.202	0	100.00
3	12.799	5.304	58.56	5.665	0.302	0	100.00
4	15.202	6.754	55.57	7.554	0.462	0.049	89.51
5	17.514	9.279	47.02	9.442	0.782	0.300	61.70

5.1 碰撞角度的影响

图 20~21 分别给出了船撞速度为 5 m/s 时,有/无防撞装置的工况在不同船撞角度下的碰撞力时程曲线和船艏最大撞深曲线,相应的性能指标对比如表 8 所示。总体上看,船撞速度相同的状态下,在 60°~90°船撞角度区间内,相比于无防护的工况,加装防撞装置后碰撞力峰值降低了 43%~53%,碰撞时船艏产生的最大撞深也降低了 61%~79%,因此该防撞装置在不同船撞角度下的性能均表现良好。

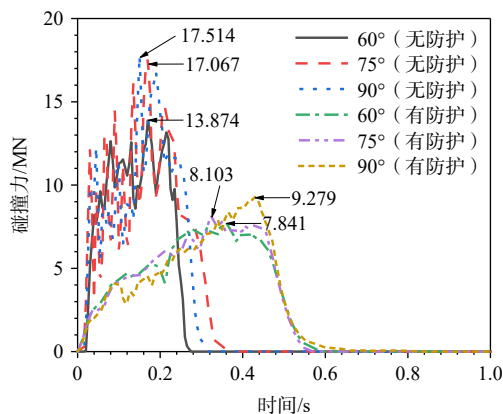


图 20 不同船撞角度下碰撞力时程曲线

Fig.20 Collision force time history curves under different ship-collision angles

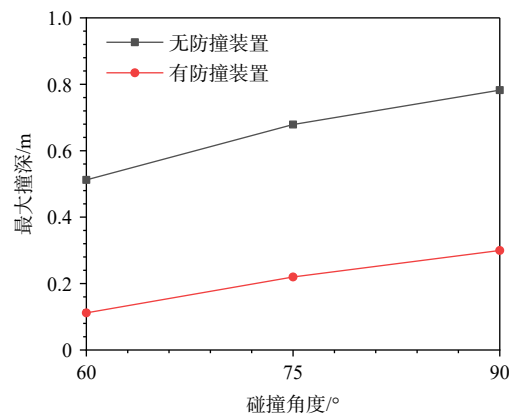


图 21 不同船撞角度下船艏撞深曲线

Fig.21 Maximum crash depth on ship bow for different collision angles

表 8 不同船撞角度下有/无防撞装置性能指标对比

Tab.8 Comparison of impact characteristics for different collision angles with/without impact protection device

船撞角度	碰撞力峰值/MN			船艏最大撞深/m		
	60°	75°	90°	60°	75°	90°
无防撞装置	13.874	17.067	17.514	0.512	0.679	0.782
有防撞装置	7.841	8.103	9.279	0.112	0.220	0.300
降低/%	43.49	52.52	47.02	78.20	67.61	61.70

5.2 碰撞速度的影响

图 22~23 为 90°船撞角度时,不同船撞速度下的碰撞力时程曲线(5 m/s 工况船撞力时程曲线见图 13)和船艏最大撞深曲线,相应的性能指标对比如表 8 所示。总体上看,船撞角度相同的状态下,在 2~5 m/s 船撞速度区间内,相比于无防护的工况,防撞装置由于其优良的耐撞性能,峰值碰撞力降低了 47%~68%,且碰撞力峰值也均低于规范规定的设防船撞力,船艏最大撞深也降低了至少 61.7%,各项指

标均表现优异,尤其在 2–3 m/s 速度区间内,船艏未发生明显损伤。近年来,国内外学者针对船–桥碰撞问题设计了新型船桥防撞装置,如钢-UHPC 防撞结构^[33]、新型柔性防撞装置^[34]和 Y 形夹层结构^[10],这些新型撞击保护装置与无防护工况相比,最大碰撞力分别减少了 40%–50%、56% 和 40.2%,对比上述数据可知,本文提出的基于梯形泡沫铝复合夹层结构设计的新船桥防撞装置与上述新型撞击保护装置相比,其耐撞性能更优(最大碰撞力可降低 47%–68%)。

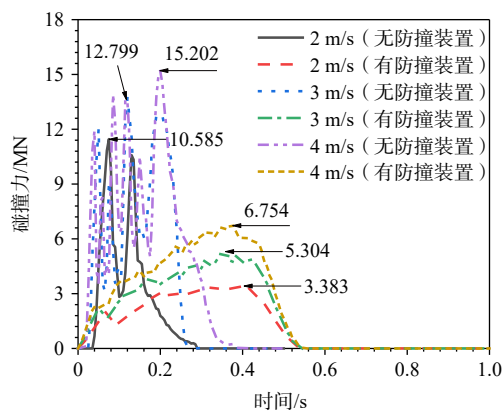


图 22 不同船速下的碰撞力时程曲线

Fig.22 Time history curves of collision force at different ship speeds

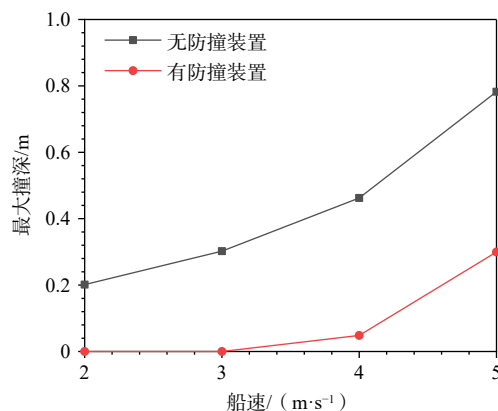


图 23 不同船撞速度下的船舶撞深曲线

Fig.23 Maximum crash depth on ship bow for different speeds

6 结 论

本文建立了考虑桩–水–土耦合的船桥碰撞有限元分析方法,设计了梯形泡沫铝复合夹层结构防撞装置,验证了梯形波纹泡沫铝复合夹层结构材料碰撞数值模型的有效性,研究和分析了典型碰撞载荷作用下的船–防撞装置–桥墩损伤特性,评估了不同船速、船撞角度等因素下防撞装置的耐撞性能,得到以下结论:

(1) 本文设计的防撞装置安装简易、便于后期维护。该防撞装置具有可模块化生产、高效现场安装、耐腐蚀性能较好、维护成本较低、更换方便的特点,可为轻质多功能防护结构的设计提供一定的参考价值。

(2) 该防撞装置具有良好的耐撞、吸能、缓冲特性。设置防撞装置后,能有效延长碰撞持续时间、降低碰撞力峰值和船舶撞深,在不同船撞角度和速度下,撞击力峰值能有效降低 43%–68%,船舶撞深至少降低 61.7%。

(3) 该防撞装置可以有效降低船舶和桥墩的直接损伤。在最不利工况中,安装防撞装置的桥墩在碰撞载荷作用下未发生塑性变形,同时与无防撞装置的工况相比,船舶船部压溃程度明显降低,可以有效提高船舶和桥墩结构的安全系数。

(4) 有限元分析结果表明,设置防撞装置后,船舶正撞工况下的船撞力远小于规范中的设防船撞力,碰撞角度越小,不仅船撞力明显减小,船舶损伤也越小,且防撞装置碰撞损伤变形和破坏主要集中在撞击区域,非撞击区域损伤不明显,重复利用率高。泡沫铝填充材料优异的性能决定了新型防撞装置较好的防撞耗能能力,低密度则使得该复合结构具有较轻的重量。

参 考 文 献:

- [1] Pu Q H, Liu J W, Guo H Y, et al. Finite element analysis of long-span rail-cum-road cable-stayed bridge subjected to ship collision[J]. Advances in Structural Engineering, 2019, 22(11): 2530–2542.

- [2] Specifications L B D[R]. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC, USA, 2012.
- [3] Ma W, Zhu Y, Grifoll M, et al. Evaluation of the effectiveness of active and passive safety measures in preventing ship-bridge collision[J]. *Sensors*, 2022, 22(8): 2857.
- [4] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(2): 1-97.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(2): 1-97. (in Chinese)
- [5] Brink-Kjær O. Modelling of ship collision against protected structures[J]. *IABSE Reports*, 1983, 41: 147-164.
- [6] Kim H J, Lim J, Park W, et al. Risk assessment of dolphin protected bridge pier considering collision point analysis[C]//Civil Engineering Topics, Volume 4: Proceedings of the 29th IMAC, A Conference on Structural Dynamics, 2011. Springer New York, 2011: 163-172.
- [7] 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.
- [8] Fan W, Guo W, Sun Y, 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.
- [9] 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.
- [10] 许明财, 蔡 昆, 汪 衡, 等. 桥墩防船撞 Y 形夹层结构耐撞性研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2017, 41(6): 910-913.
Xu M C, Cai K, Wang H, et al. Study on crashworthiness of Y-shape sandwich structure for protecting bridge piers against vessel collision[J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering)*, 2017, 41(6): 910-913. (in Chinese)
- [11] 张红英, 欧阳八生, 朱国军. 泡沫铝材料的研究与应用[J]. *粉末冶金技术*, 2021, 39(1): 69-75.
Zhang H, Ouyang B S, Zhu G J. Research and application of aluminum foam materials[J]. *Powder Metallurgy Technology*, 2021, 39(1): 69-75. (in Chinese)
- [12] 赵鑫磊, 李 春, 韩志伟. 海上风力机泡沫铝夹芯板防护装置结构抗撞特性研究[J]. *机械强度*, 2021, 43(4): 888-896.
Zhao X L, Li C, Han Z W. Study on the anti-collision characteristics of aluminum foam sandwich plate protection device in offshore wind turbine.[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2021, 43(4): 888-896. (in Chinese)
- [13] 徐宏建. 冲击载荷下阶梯梯度泡沫铝夹芯结构动态失效研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
Xu H J. Dynamic failure of step-graded sandwich beams with aluminum foam cores to impulsive loading[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)
- [14] 石原赫. 浮冰多次碰撞下船体结构损伤机理研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
Shi Y H. Research on the damage mechanism of hull structures under multiple ice floes collision[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [15] 张爱锋, 刘少康, 姚苗苗, 等. 船桥碰撞结构损伤及船撞力影响因素分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(3): 121-127.
Zhang A F, Liu S K, Yao M M, et al. Influencing factors of structural damage and ship impact force in ship-bridge collision[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2021, 40(3): 121-127. (in Chinese)
- [16] Ye X, Fan W, Sha Y, et al. Fluid-structure interaction analysis of oblique ship-bridge collisions[J]. *Engineering Structures*, 2023, 274: 115129.
- [17] 柯 力. 钢质夹层板上层建筑结构防护性能优化及抗爆试验研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.
Ke L. Optimization of protective performance and experimental study on impact resistance of corrugated steel sandwich panels applied to superstructure[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [18] 李华永, 周凌宇, 王 强, 等. 新型装配式钢-UHPC 防船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 Y H, Zhou L Y, Wang Q, 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. (in Chinese)
- [19] Zhang P, Cheng Y, Liu J, et al. Experimental and numerical investigations on laser-welded corrugated-core sandwich panels subjected to air blast loading[J]. *Marine Structures*, 2015, 40: 225–246.
- [20] Carney K S, Pereira J M, Revilock D M, et al. Jet engine fan blade containment using an alternate geometry[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(5): 720–728.
- [21] 陈 凯. 钢质梯形波纹(杂交)夹层板低速碰撞性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
Chen K. Research on low-velocity impact performance of steel trapezoidal corrugated (hybrid) sandwich panels[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [22] 吉 喆, 岳凯乐, 王贵春. 考虑桩土作用的桥墩受船舶撞击动力响应分析[J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2020, 52(4): 116–122.
Ji Z, Yue K L, Wang G C. Analysis on dynamic responses of bridge pier subjected to ship collision considering the pile-soil interaction[J]. *Journal of Zhengzhou University(Natural Science Edition)*, 2020, 52(4): 116–122. (in Chinese)
- [23] 王贵春, 吉喆, 李武生, 等. 考虑桩土作用的船桥碰撞动力性能及影响因素分析[J]. *桥梁建设*, 2021, 51(4): 17–24.
Wang G C, Ji Z, Li W S, et al. Analysis of ship-bridge collision dynamic property and influential factors considering pile-soil interaction[J]. *Bridge Construction*, 2021, 51(4): 17–24. (in Chinese)
- [24] Yi W J, Zhao D B, Kunnath S K. Simplified approach for assessing shear resistance of reinforced concrete beams under impact loads[J]. *ACI Structural Journal*, 2017, 114(3): 789–791.
- [25] Liu T, Xiao Y. Impact behavior of CFRP-strip-wrapped RC beams without stirrups[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2017, 21(5): 04017035.
- [26] Shi Y, Li Z X, Hao H. A new method for progressive collapse analysis of RC frames under blast loading[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(6): 1691–1703.
- [27] Cui J, Shi Y, Li Z X, et al. Failure analysis and damage assessment of RC columns under close-in explosions[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2015, 29(5): B4015003.
- [28] 潘 晋, 张小强, 许明财, 等. 船-桥梁浮式钢套箱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): 124–129+151.
Pan J, Zhang X Q, Xu M C, et al. Two fluid field processing method's results comparison for numerical simulation of collision between a ship and a floating anti-collision steel box[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(7): 124–129+151. (in Chinese)
- [29] 刘 昆, 王 哲, 王自力. 波纹夹层板冲击响应理论计算方法研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(2): 90–97.
Liu K, Wang Z, Wang Z L. Theoretical calculation method for the impact responses of corrugated sandwich panels[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(2): 90–97. (in Chinese)
- [30] 李 遥, 刘 昆, 沈超明, 等. 准静态压缩载荷作用下 U 型折叠式夹层板芯层变形机理研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(8): 223–230+269.
Li Y, Liu K, Shen C M, et al. A study on the deformation mechanism of U-type corrugated cores sandwich panels subjected to quasi-static compression load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(8): 223–230+269. (in Chinese)
- [31] 潘 晋, 黄义飞, 夏 天, 等. 基于 AIS 数据的桥梁防船撞结构冲击响应分析[J]. *桥梁建设*, 2020, 50(1): 32–37.
Pan J, Huang Y F, Xia T, et al. Analysis of impact responses of vessel collision protection structure for bridges based on AIS data[J]. *Bridge Construction*, 2020, 50(1): 32–37. (in Chinese)
- [32] 交通运输部. 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥梁抗撞设计规范: JTG/T 3360-02-2020[S]. 北京. 2020.
CCCC Highway Consultant Co., Ltd., Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for collision design of highway bridges: JTG/T 3360-02-2020[S]. Beijing, 2020. (in Chinese)
- [33] Fan, Wei, et al. Experimental and numerical investigations of a novel steel-UHPFRC composite fender for bridge protection in vessel collisions[J]. *Ocean engineering* 165 (2018): 1–21.
- [34] 王 飞, 吕忠达, 赵 卓, 等. 基于刚柔匹配的桥梁柔性防撞装置研究[J]. *桥梁建设*, 2021, 51(1): 82–87.
Wang F, Lü Z D, Zhao Z, et al. Research on flexible anti-collision device for bridges based on rigid-flexible matching[J]. *Bridge Construction*, 2021, 51(1): 82–87. (in Chinese)