

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230228003

# 泡沫铝基耗能装置在铁路桥墩防撞中的应用研究\*

吕文达<sup>1</sup>, 唐鹏<sup>2</sup>, 王东昀<sup>1</sup>, 李林<sup>1</sup>, 王东坡<sup>2</sup>, 闫帅星<sup>2</sup>

(1. 兰州铁道设计院有限公司, 甘肃 兰州 730030;

2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:** 随着公路、铁路、城市立交桥的大量建设, 跨线桥数量剧增, 桥墩被汽车撞击的可能性大大增加。因此, 针对目前铁路桥墩防撞防护装置的不足, 提出了一款泡沫铝基组合耗能装置的结构型式。该研究结合了静力压缩试验、落锤冲击试验以及有限元数值模拟, 研究了防撞装置缓冲材料的物理力学性能及车辆撞击防撞装置的冲击动力学响应。结果表明, 泡沫铝-聚氨酯-泡沫铝三层组合结构型式中工况3~4吸能效果最佳, 其吸能密度(EA)、比吸能(SEA)以及吸能效率(EEA)值分别为  $3 \times 10^3$  kJ/m<sup>3</sup>、12.21 kJ/kg、28.57%。在数值模拟中, 无防撞装置工况下, 车辆撞击力最大值为 5 332.99 kN, 桥墩吸收的能量为 22.05 kJ, 最大应力为 124.46 MPa, 墩身产生明显损伤; 在有防撞装置工况下, 车辆撞击力最大值为 2 674.41 kN, 降低了 49.85%; 桥墩最大应力为 6.96 MPa, 降低了 94.41%。结果表明该防撞装置组合结构对桥墩起到了良好的防护效果。

**关键词:** 车辆冲击; 桥墩防护; 泡沫铝; 静力压缩; 落锤冲击; 有限元模拟

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)05-1041-10

## Application of Aluminum Foam-Based Energy Dissipation Devices in Railway Pier Protection Against Vehicle Collisions

LYU Wenda<sup>1</sup>, TANG Peng<sup>2</sup>, WANG Dongyun<sup>1</sup>, LI Lin<sup>1</sup>, WANG Dongpo<sup>2</sup>, YAN Shuaixing<sup>2</sup>

(1. Lanzhou Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** With the large-scale construction of highways, railways and urban overpasses, the number of overpasses has increased sharply, significantly raising the risk of bridge piers being hit by vehicles. To address the shortcomings of current protective devices for railway bridge piers against vehicle collisions, a structural form of an aluminum foam-based energy dissipation device was proposed. This study combined static compression tests, drop hammer impact tests, and finite element numerical simulations to investigate the physical and mechanical properties of the buffer material in the anti-collision device and the dynamic impact response of the vehicle during collisions. The results showed that the three-layer aluminum foam-polyurethane-aluminum foam composite structure, under test conditions 3

\* 收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-04-04

**基金项目:** 兰州铁道设计院有限公司科研项目(兰院科 2022-02号)、国家自然科学基金项目(42207232)资助

**作者简介:** 吕文达(1975—), 男, 高级工程师。主要从事铁路桥梁设计研究。E-mail: 1162753716@qq.com

**通信作者:** 闫帅星(1991—), 女, 研究员, 博士。主要从事冲击动力学方面的研究。E-mail: yansx@cdut.edu.cn

and 4, achieved the best energy absorption performance. Its energy absorption density (EA), specific energy absorption (SEA), and energy absorption efficiency (EEA) values were  $3 \times 10^3 \text{kJ/m}^3$ ,  $12.21 \text{kJ/kg}$ , and  $28.57\%$ , respectively. In numerical simulations, without a protective device, the maximum vehicle impact force was  $5332.99 \text{kN}$ , the energy absorbed by the bridge pier was  $22.05 \text{kJ}$ , and the maximum stress was  $124.46 \text{MPa}$ , causing significant damage to the pier. With the protective device in place, the maximum vehicle impact force was  $2674.41 \text{kN}$ , a reduction of  $49.85\%$ ; the maximum stress on the pier was  $6.96 \text{MPa}$ , a decrease of  $94.41\%$ . The results showed that this protective device provided excellent protection for bridge piers.

**Keywords:** vehicle impact; bridge pier protection; aluminum foam; static compression; drop hammer impact; finite element simulation

## 0 引言

近 10 年是我国交通运输基础设施建设和汽车保有量快速发展的重要时期。截至 2021 年,我国铁路营业里程 14.6 万公里,公路里程 519.81 万公里,机动车保有量达 3.95 亿辆,导致车辆撞击桥梁桥墩的事故也越发频繁。车辆撞击桥墩导致混凝土脱落、钢筋损伤,甚至桥梁倒塌,造成重大经济损失和人员伤亡。在 E. Buth 等<sup>[1]</sup>所研究的 19 起车辆撞击桥墩事故中,桥梁的上部结构均发生了整体坍塌。此外,根据国内相关统计<sup>[2]</sup>,在 2001~2012 年,我国共发生 67 起严重桥梁垮塌的事故,其中,由车辆撞击桥墩造成的事故达 21 起。因此,针对桥梁的车撞威胁及防护需求,开展桥梁防撞设计研究具有迫切的现实与科学意义。

目前对桥墩防撞击的研究主要集中于船舶撞击<sup>[3-4]</sup>。研究表明,在河流中有足够的空间去设置防撞措施,但在公路桥墩的防撞设计中,往往桥墩防撞受一定空间及外观的限制,因此,目前对车辆撞击桥墩的防撞设计研究仍存在不足。黄礼芳<sup>[5]</sup>使用 ANSYS/LS-DYNA 软件对汽车撞击桥墩的动力学响应过程开展了研究,并对桥梁桥墩的安全防护措施提出了相应建议。付旭辉等<sup>[6]</sup>计算了船舶的撞击力和桥墩的抗撞力,结果表明美国 ASSHTO 规范计算的结果与数值模拟较为接近,并验证了珠海淇澳大桥满足防撞要求。陈贵炫<sup>[7]</sup>对橡胶混凝土材料的抗冲击性能进行了 Hopkinson 压杆试验和基于 ANSYS 的数值模拟分析,认为该材料能够对防撞性能有一定提升。荆国强等<sup>[8]</sup>采用数值模拟的方法,从船舶撞击速度以及角度 2 个方面探究钢-UH-PC 组合式防撞浮箱对削减桥墩受到撞击力的影响。

L. W. Zhang 等<sup>[9]</sup>采用单轴压缩试验,提出了一种由蜂窝钢和聚氨酯弹性体组成的新型桥墩防撞复合结构。试验结果表明,填充 PU 弹性体后,规则六边形核心单元蜂窝钢结构的承载力、结构稳定性和吸能性能都得到了显著提高。胡峰强等<sup>[10]</sup>运用有限元软件建立了聚氨酯泡沫材料防车撞装置,从能量转化、撞击力的角度对装置的防撞效果进行分析,结果表明:聚氨酯材料具有良好的吸能能力。J. Striwe 等<sup>[11]</sup>和 R. Subbaramaiah 等<sup>[12]</sup>分别研究了织物增强热塑性复合材料和纤维金属结构的耐撞性。考虑到桥梁的保护,P. Jin 等<sup>[13]</sup>设计了一种由 U 型钢和填充复合蜂窝状结构组成的能量吸收结构,并考虑到小车的冲击进行了测试。张建强等<sup>[14]</sup>发明了以聚氨酯泡沫为耗能芯材,以纤维增强复合材料格构腹板进行增强的泡沫夹芯复合材料防撞包裹层,通过有限元计算结果表明,该防撞层可有效减小冲击荷载,取得良好的防撞效果。张于晔等<sup>[15]</sup>采用 LS-DYNA 模拟了泡沫铝材料受车辆撞击的全过程。结果表明:采用泡沫铝防撞装置后,撞击过程中大部分能量被防撞装置吸收,泡沫铝防撞装置可起到同时保护桥墩与车辆的作用。就目前国内外研究来看,主要防撞材料多采用一些钢筋-混凝土、橡胶-混凝土等复合物,而像泡沫金属等新型防撞材料以及一些复合材料的研究和使用较少,而泡沫铝自身有着轻质、高比强度、高比刚度的特性,其较为宽而平缓的应力应变曲线平台能够吸收大量能量,与钢板、聚氨酯等材料的结合下能够同时对车辆、人员及桥墩起到较好的保护,其泡沫铝等材料的耐热耐火等性能也会降低火灾、爆炸等灾害的发生,进一步保护了环境及人员的安全,同时,其优异的耐腐蚀性能也能够有效的保护桥墩不受腐蚀,保证桥墩的承载能力和耐久性。

因此,本研究以泡沫铝作为桥墩新型防护装置的主体材料,开展泡沫铝基组合柔性防撞装置在铁路桥墩防车辆撞击中的开发与应用研究。基于材料与结构组合耗能理念,提出了一种“附着式”泡沫铝基组合耗能装置,首先,基于室内静力压缩试验,开展泡沫铝、聚氨酯及组合结构物理力学性能研究,获取材料本构参数以及组合结构最优型式,为数值模拟提供依据;进而通过落锤冲击试验与有限元数值模型对比,研究材料及装置冲击动力响应,验证动力冲击作用下数值模型及材料参数的适用性;最后以典型工程案例为原型,建立车辆、桥墩及泡沫铝基组合耗能装置精细化数值模型,研究不同车辆撞击条件下桥墩结构非线性动力响应机制,揭示结构动力响应参数演化规律及损伤行为特征,为桥墩防撞装置优化设计提供依据。

## 1 静力压缩试验

### 1.1 试验设置

静力压缩试验中试件尺寸为  $100 \times 100 \times 100$  mm,组合结构型式为上层泡沫铝/中层聚氨酯/下层泡沫铝的夹芯结构。根据 M. Avalle 等<sup>[16]</sup>的研究以及实验结果与分析,发现不同加载速率对材料应力-应变曲线的影响不大,可以忽略不计,故设置所有加载速率为 10 mm/min。同时,参考相关文献研究成果以及考虑防护能级的不同,根据生产厂家实际生产参数,考虑了不同密度及厚度组合对材料应力-应变曲线的影响,参数详见表 1~表 2。在表 2 组合结构制作中,其各层间未考虑粘结等效应在试验以及模拟中均只考虑各层间材料的摩擦影响。

试验采用益环仪器科技(上海)有限公司的 YHS229WJ 型试验机、高速摄影仪等试验仪器。设置压头位移行程 80 mm,且测量荷载、位移的传感

表 1 泡沫铝与聚氨酯材料参数

Table 1 Material parameters of aluminum foam and polyurethane

泡沫铝		聚氨酯	
编号	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	编号	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
1-1	300	2-1	40
1-2	400	2-2	60
1-3	500	2-3	80
1-4	600		

表 2 泡沫铝-聚氨酯结构组合参数

Table 2 Parameters of aluminum foam-polyurethane structural combination

编号	厚度组合/mm	密度组合/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
3-1	30/50/20	300/60/300
3-2	10/60/30	300/60/300
3-3	30/40/30	300/60/300
3-4	30/50/20	500/60/300
3-5	30/50/20	300/60/500
3-6	30/50/20	300/40/300
3-7	30/50/20	300/60/300

器精度为 0.5%。该试验结果由计算机内置的传感器自动采集,从而获得试验试样的力-位移曲线,并计算得到组合试件的相应耗能指标。

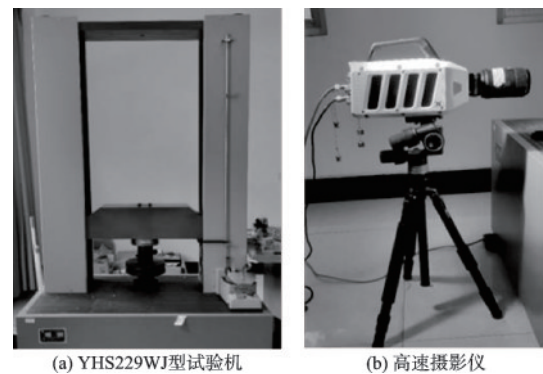


图 1 试验仪器设备

Fig.1 Test instruments and equipment

### 1.2 试验结果分析

泡沫铝、聚氨酯材料静力压缩试验如图 2(a)、(b)所示。由试验观察得到,在加载初期,试件上层受压,发生弹性形变并快速屈服,进入塑性平台阶段,试件从上至下逐层致密,结构骨架产生破裂屈服直到完全致密化,并伴随产生大量破碎细渣。在聚氨酯材料中,当压缩应变达到 0.5 时,致密化现象也从下层出现,导致在压缩后期,致密化现象从两侧往中间发展,最后试件全部致密,在压缩结束后,取出聚氨酯试件静置 30 min 后,回弹程度在 90% 左右。

组合试件的压缩过程如图 2(c)所示。在加载初期,由于聚氨酯屈服应力较小,首先被压密,产生较大形变;在聚氨酯材料压密至一定程度后,上层泡沫铝材料顶部的胞孔孔壁开始屈曲、破裂,胞孔孔壁由上至下被逐层压塌,随着加载进行,下层泡

沫铝开始变形,与上层的泡沫铝胞孔破裂顺序相反,下层泡沫铝胞孔孔壁表现为由下至上逐层坍塌。加载位移达到70 mm左右,整个试件被明显压溃,聚氨酯材料被剧烈挤出,在聚氨酯与泡沫铝材料交界处,聚氨酯受压嵌入泡沫铝的胞孔孔隙内部,最后上下层泡沫铝材料的胞孔孔壁全部塌陷,即加载过程结束。

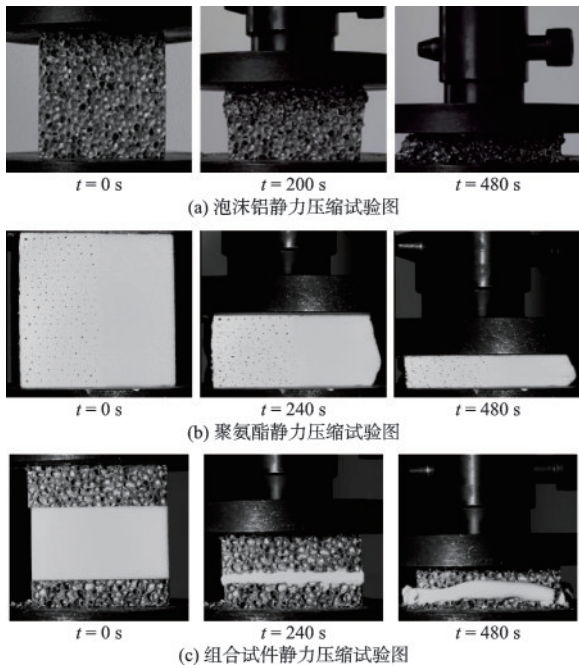


图2 材料静力压缩示例图

Fig.2 Examples of static compression of materials

将计算机自动采集的数据进行分析处理,绘制应力-应变曲线如图3所示,以及组合试件的耗能指标EA、EEA、SEA值如图4所示。其中三个耗能指标吸能密度指标(EA)、比能量吸收能力(SEA)、以及理想吸能效率(EEA)用式(1)、(2)、(3)计算。吸能密度指标(EA)是指单位体积吸收能量来表征,表示为有效压缩距离内应力-应变曲线与坐标轴的包围面积,其中 $\sigma$ 和 $\epsilon$ 为当前压缩应力与应变。当 $\epsilon \leq \epsilon_d$ 时, $\sigma = \sigma_{pl}$ ;当 $\epsilon > \epsilon_d$ 时, $\sigma = \sigma_{pl} + k(\epsilon - \epsilon_d)^n$ ,其中 $k$ 和 $n$ 为材料参数。比能量吸收能力(SEA)是指单位质量吸收能量的多少,这对轻量化结构更有意义。除吸能能力外,耗能结构还需要稳定的压缩模式以保证冲击能量稳定地、不可逆地耗散,以避免压缩过程中的二次破坏。表征该能力的指标为理想吸能效率(EEA)。EEA值越大,压缩曲线波动程度越小,即表明压缩变形及吸能过程越稳定。当荷载-位移曲线为规整的矩形时,认为EEA值为100%,是

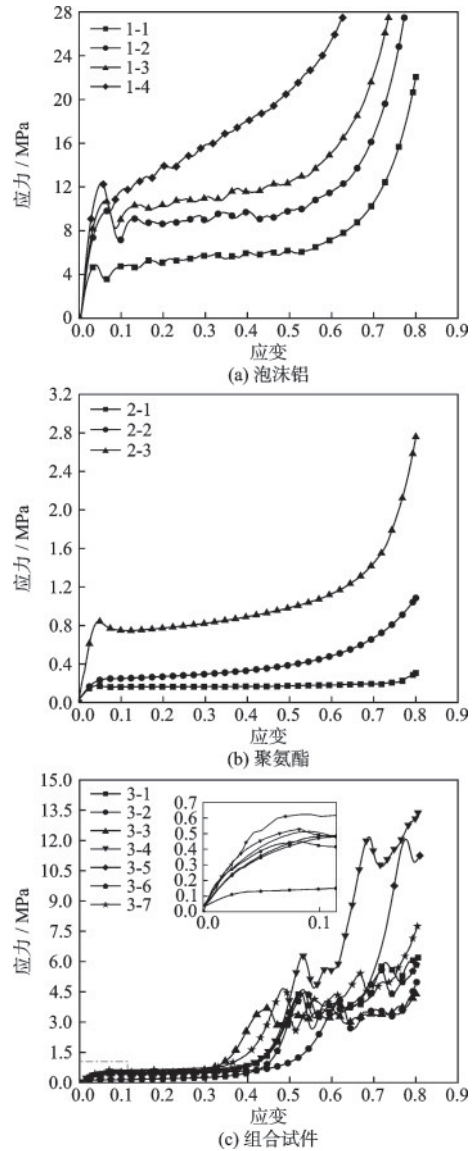


图3 材料及组合结构压缩应力-应变曲线

Fig.3 Compressive stress-strain curves of materials and composite structures

理想的吸能材料。因此,理想吸能效率是泡沫铝实际所吸收的能量与理想泡沫在相同应力和应变下的吸收能量之比。

$$EA = \int_0^\epsilon \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (1)$$

$$SEA = \int_0^\epsilon \sigma(\epsilon) d\epsilon / \rho \quad (2)$$

$$EEA = \int_0^{\epsilon_m} \sigma(\epsilon) d\epsilon / (\sigma_m \epsilon_m) \quad (3)$$

由材料应力-应变曲线得知,在单一材料压缩下,泡沫铝、聚氨酯呈典型的三阶段特征,即弹性变形阶段、塑性变形阶段、致密化阶段。在组合试件中,由于材料的屈服应力不同,可观察得到其应力-

应变曲线呈两段式发展,最终直到压缩结束。试验结果表明,泡沫铝材料在相同的加载速率下,密度越大,其平台应力越大。工况 1-1、1-2、1-3、1-4 对应的屈服应力分别为 4.87、9.82、10.81、12.43 MPa。显然工况 1-4 有着更高的屈服应力及平台应力,但其平台段不稳定,同时,工况 1-3 有着较高的屈服应力以及平台应力,其平台段较为宽缓而平稳。对于聚氨酯,由试验曲线得知,工况 2-3 的屈服应力为 0.84 MPa,远大于工况 2-1 和 2-2 的 0.18 与 0.24 MPa,说明材料密度越大,其屈服应力及平台应力越大,在应变达到 0.7 左右进入致密化阶段。

由图 4(a、c) 得知,EA 和 SEA 随应变的增大而增大,在应变初期,曲线上升较为缓慢,这是因为此

时主要为聚氨酯材料受压吸能,其平台应力较低,在应变 0.4 左右,组合结构的 EA、SEA 值与组合结构整体应力快速增加并保持一致,在应变达到 0.8 (略大于其致密化应变) 时,EA 和 SEA 值见表 3。图 4(b) 为组合结构工况的 EEA 曲线,在应变 0~0.35,即以聚氨酯材料受压为主的加载初期,EEA 值均保持在较高值,最大值见表 3。在应变为 0.35~0.53,EEA 迅速下降,此阶段为聚氨酯和泡沫铝共同作用阶段,由于二者强度差异较大导致 EEA 降低。应变为 0.53~0.7 为组合结构的第二个平台阶段,EEA 有所回升并保持相对稳定,直至试件整体压溃。

表 3 组合试件耗能指标

Table 3 Energy consumption index of composite specimens

工况	EA/(10 <sup>3</sup> kJ·m <sup>-3</sup> )	SEA/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	EEA <sub>ε=0.8</sub>
3-1	1.674	9.313	0.341
3-2	1.157	8.183	0.296
3-3	1.597	8.494	0.454
3-4	2.997	12.214	0.286
3-5	2.087	9.848	0.238
3-6	1.497	8.833	0.323
3-7	1.967	11.254	0.286

由表 3 可得知,在应变达到 0.8 时,工况 3-4 的 EA、SEA 分别为 3.0×10<sup>3</sup> kJ/m<sup>3</sup>、12.21 kJ/kg,远高于其余工况的耗能指标。在 EEA 中,工况 3-3 最大为 0.454,但其 EA、SEA 均低于基础工况 3-1。工况 3-2、3-6 的 EEA 略大于工况 3-4,但其 EA、SEA 值远低于工况 3-4,故在泡沫铝与聚氨酯的组合下可认为工况 3-4 的吸能耗能效果最佳,可为本文桥墩防撞装置提供参考和依据。

## 2 落锤冲击试验及模拟验证

通过静力压缩试验得到最优吸能参数下的泡沫铝、聚氨酯材料以及组合试件即工况 3-4,并进一步采用工况 3~4 组合试件进行落锤冲击试验,建立该试验的有限元数值模型,以验证数值模型的可靠性和适用性。

### 2.1 试验设置

根据工况 3~4 和桥墩防撞装置的基础工况,将

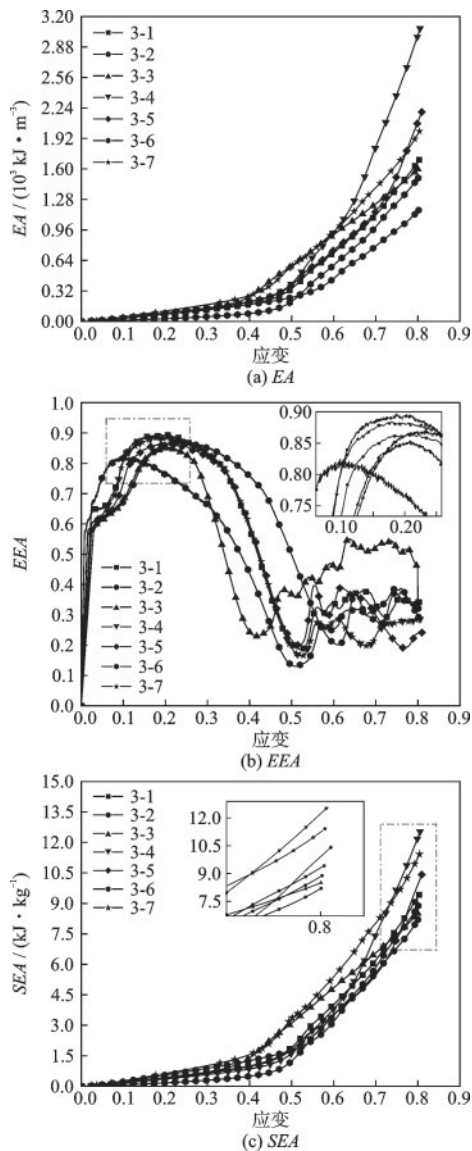


图 4 组合试件压缩耗能指标

Fig.4 Compression energy dissipation index of composite specimens

防撞装置试验尺寸更改为  $500 \times 500 \times 104$  mm, 简化模型如图 5 所示。A、E 为上下层钢板, B、D 为上下层泡沫铝材料, C 为聚氨酯, F 为两侧钢板封口板, 与 A、E 进行焊接连结。测试仪器主要包括压力数据采集系统、高速摄影仪、单反相机、卷尺、游标卡尺、立尺等。冲击试验平台分为落锤、钢结构桁架、卷扬机以及电磁脱钩装置和混凝土平台五部分, 桁架高度为 6.00 m, 顶、底面的边长分别为 1.15、2.50 m。通过卷扬机和电磁脱钩装置可实现对落锤的提升与释放, 并控制固定高度使落锤自由下落冲击防撞装置中心。落锤材质为轴承钢, 暂不考虑落锤的滚动和旋转, 设定为球形, 直径为 0.25 m, 重量为 63.3 kg, 下落高度为 4 m, 冲击能量约 2 500 J, 在混凝土平台支柱处安装 4 个压力传感器进行测量。试验全过程采用千眼狼高速摄影仪 (Revealer 5F01) 记录。

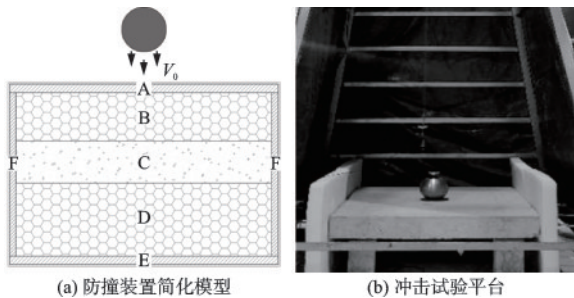


图 5 落锤冲击试验器材

Fig.5 Drop hammer impact test equipment

根据落锤冲击物理试验平台结构, 建立 ABAQUS 数值模型。该模型包括防撞装置、冲击试验平台、落锤三部分。其泡沫铝以及聚氨酯建模采用弹塑性模型, 根据静力压缩试验得到的相关材料参数进行赋值模拟。根据 Z. Wang 等<sup>[17]</sup>对采用分离式霍普金森压杆设备研究了泡沫铝材料应变率高达  $2\,000\text{ s}^{-1}$  的压缩行为, 可知在动力问题中材料应变率效应的影响不明显, 因此, 在此动力问题的分析中不考虑应变率的影响。在冲击试验平台的混凝土台中, 内置设有两层钢筋网, 该钢筋网采用线单元建模, 类型为 T3D2(两结点线性三维桁架单元)。落锤模型球体直径为 250 mm, 网格类型为 C3D4(四结点线性四面体单元), 其余单元格式均设置为 C3D8R(八结点线性六面体单元、减缩积分、沙漏控制), 所有单元为显示 (Explicit) 线性单元。各材料层间设置通用接触, 考虑法相行为及切向行

为, 其法向行为设置为“硬”接触, 切向行为的摩擦公式采用“罚”, 摩擦系数设置为 0.2, 方向为各向同性, 其余设置均采用默认值。数值模型如图 6 所示。

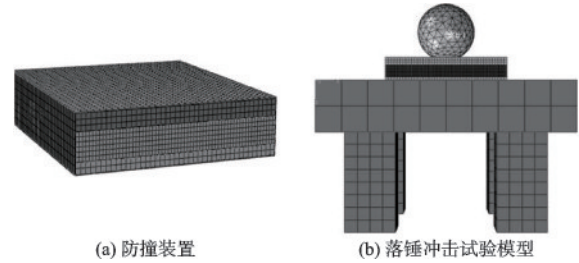


图 6 落锤冲击试验数值模型

Fig.6 Numerical model of drop hammer impact test

## 2.2 试验结果与模拟验证

工况 3-4 组合防撞装置的落锤冲击试验如图 7 所示, 将试验所得冲击平台支反力时程曲线绘制如图 9 所示。落锤冲击结束后, 防撞装置上表面出现凹坑, 直径为 9 cm, 深度为 1 cm, 落锤冲击导致钢板一侧翘曲, 翘曲高度为 3 cm, 观测无封口板侧面, 钢板翘起同侧的泡沫铝出现裂缝并贯通, 并发生一定翘曲, 其余部分无明显变形。

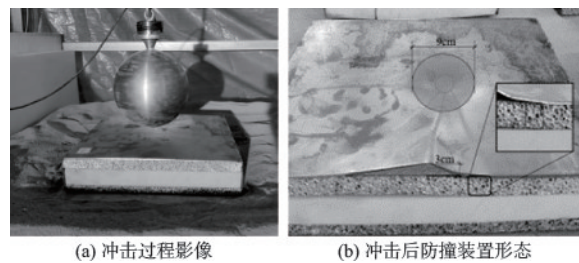
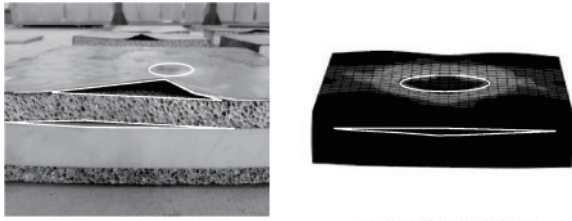


图 7 落锤冲击试验

Fig.7 Drop hammer impact test

落锤冲击试验结果与数值模拟应力云图对比如下图 8(a~b) 所示。在冲击过程中可得知, 试件由于实际焊点的不对称性将导致钢板的受力不均匀, 上层钢板发生不对称翘曲。因此, 可认为这是人为操作原因造成的不同现象。在试件的表面均会形成凹坑, 凹坑深度与范围相近, 在上层泡沫铝与聚氨酯之间会形成同样的层间间隙, 故可认为其数值模拟应力云图及应变与落锤冲击试验的塑性变形行为较为一致。

根据图 9 可得, 数值模拟所计算的支反力时程曲线与试验得到的支反力时程曲线在线形趋势上



(a) 落锤冲击模型试验 (b) 落锤冲击数值模拟

图8 落锤冲击试验与数值模拟对比

Fig.8 Comparison between drop hammer impact test and numerical simulation

相似。数值模拟所计算的支反力峰值为-135.28 kN, 试验计算所得支反力峰值为-142.45 kN, 试验误差在 5.30 % 左右。两种研究手段所计算出的支反力峰值误差不超过 15 %, 因此, 可认为采用该数值模型对动力响应机制的研究具有较高的适用性和可靠性, 能够较好地模拟冲击动力全过程。

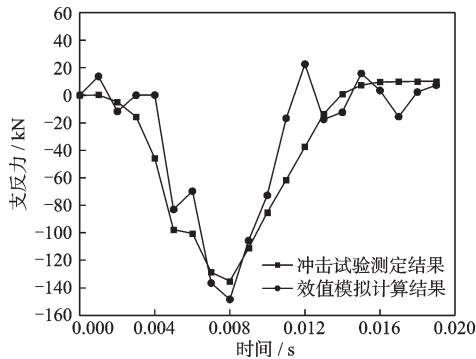


图9 工况3-4支反力时程曲线对比验证

Fig.9 Comparison and verification of time history curves of reaction force in testing condition 3-4

### 3 车-桥碰撞动力响应数值模拟

落锤冲击试验及有限元模型对比结果验证了数值模型在动力冲击作用下的可靠性及适用性。本节将建立车-桥碰撞动力响应有限元模型, 探究车撞作用下防撞装置的吸能耗能特性。

#### 3.1 车-桥碰撞有限元模型建立

车辆原型由乔治华盛顿大学国家碰撞分析中心(NCAC)下载, 进一步简化其车辆模型应用于ABAQUS有限元软件, 如图10所示。该车辆模型参照雪佛兰皮卡实际尺寸, 后部车厢载有货物, 整车质量为8 t, 车辆整体尺寸为5 200×1 700×

1 700 mm, 共由23个部件组成, 包括车头、车厢、防撞梁、发动机、变速箱、传动轴、主梁、横梁、轮胎等。各个车辆部件模型均为三维可变形的实体部件(C3D8R)。

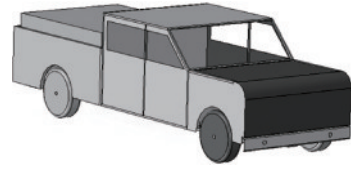
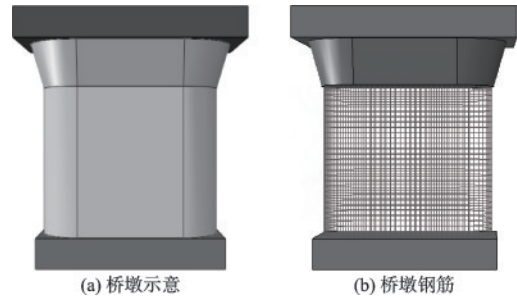


图10 雪佛兰皮卡车车辆简易模型

Fig.10 Simple model of Chevrolet pickup truck

桥墩模型依照兰州至合作铁路中桥墩设计尺寸建模, 桥墩为钢筋混凝土结构, 墩身配有竖向主筋和环向箍筋。具体组成由下到上依次为为基础、墩身、变截面以及上部荷载。钢筋采用三维的可变形的线单元(B31M), 其余均为三维可变形实体部件(C3D8R), 如图11所示。



(a) 桥墩示意 (b) 桥墩钢筋

图11 桥墩数值模型

Fig.11 Numerical model of bridge piers

防撞装置根据桥墩平面尺寸按基础工况进行建模。所有部件采用三维可变形的实体部件(C3D8R)。每层材料按试验工况3~4的材料参数进行赋值。在模拟中, 不考虑车辆在撞击过程中车辆、桥墩以及桥墩防撞装置之间的接触特性, 其接触设置考虑与第2章节一致。

钢筋、混凝土及钢板材料参数见表4。基于GB50010-2010规范的塑性损伤模型参数, 混凝土考虑损伤塑性, 包括压缩损伤和拉伸损伤。材料参数赋值完成后, 将各部件模型进行装配并设置相应边界条件, 设置积分截面输出SOF(表面上的合力)、ALLAE(伪应变能, 即制沙漏变形所消耗的主要能量)、ALLIE(总应变能)、ALLKE(动能)以及总能量等结果输出指标, 进一步评定防撞装置的吸能性能。

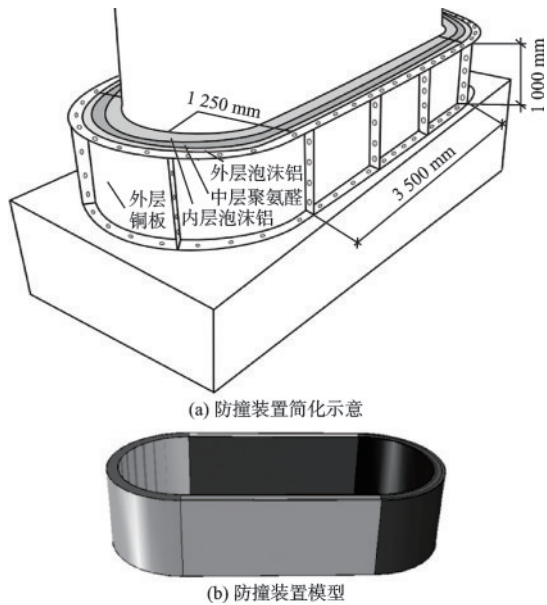


图 12 Anti-collision device diagram

表 4 桥墩材料参数

Table 4 Pier material parameters

材料	弹性模量/MPa	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比
C40 混凝土	$3.26 \times 10^5$	$2.5 \times 10^3$	0.2
HRB400	$2.10 \times 10^5$	$7.89 \times 10^3$	0.3

### 3.2 无防撞装置下车-桥碰撞数值模拟

本模拟工况中,车辆以 80 km/h 速度垂直撞击桥墩,其撞击过程应力云图以及桥墩混凝土损伤范围如图 13 所示。

输出撞击力及桥墩能量时程变化结果绘图如图 14 所示。由图 13 和图 14 分析可得,当  $t=0.0037\text{ s}$  时,桥墩应力迅速增加且大于 40 MPa,桥墩产生局部破坏,随着接触时间增加,最终达到最大值为 124.46 MPa。在  $t=0.0093\text{ s}$  左右时,撞击力达到最大值,为 5 332.99 kN。在最终的桥墩混凝土损伤图中,以拉伸损伤 DAMAGET 为损伤指标,其值从 0 到 1 分别对应无损伤到完全损伤,并对损伤值大于 0.01 的单元进行输出计算,共计 1 704 个单元。同时,该工况下 ALLAE 值低于总能量的 10%,故可认为该数值模拟沙漏控制良好。

### 3.3 有防撞装置下车-桥碰撞数值模拟

将防护装置与桥墩进行装配,开展有防护装置工况下车-桥碰撞数值模拟,探究防护装置的吸能性能,得到其撞击过程应力云图如图 15 所示。可以看

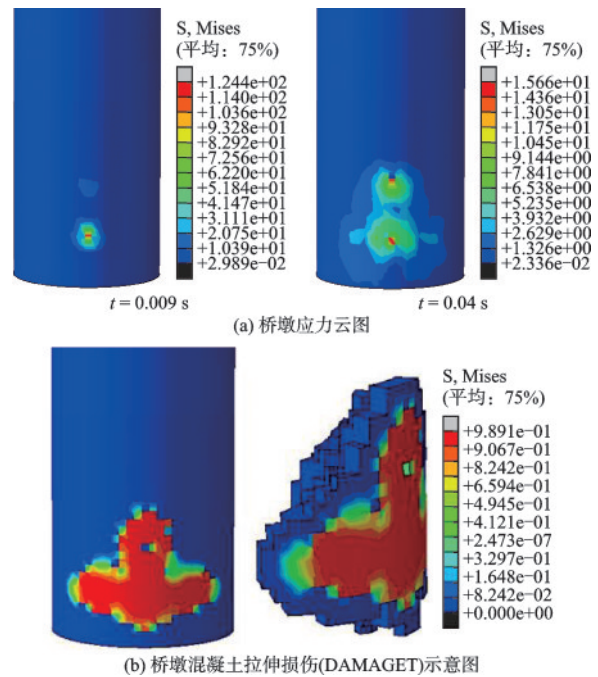


图 13 无防撞装置下车辆撞击桥墩应力云图及损伤程度  
Fig.13 Stress cloud diagram and extent of damage of vehicles hitting bridge piers without anti-collision device

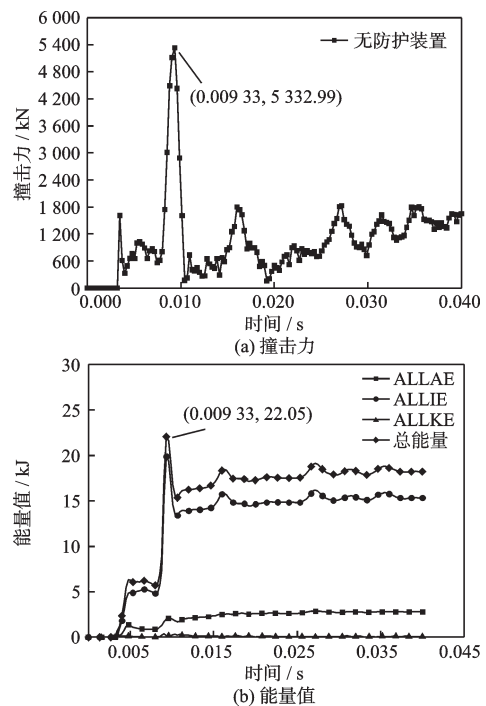


图 14 撞击力和桥墩能量变化  
Fig.14 Changes in impact force and pier energy

出,在撞击过程中,防撞装置外层钢板所产生的应力值较大。大部分车辆动能被桥墩防撞装置所吸收。在  $t=0.0087\text{ s}$  时,防撞装置的钢板最大应力达到屈服强度 235 MPa,产生较大塑性变形破坏,但桥

墩还未达到最大应力值。在防撞装置的保护下,当  $t=0.0141\text{ s}$  时,桥墩达到最大应力值为  $6.96\text{ MPa}$ , 小于 C40 混凝土强度。此外,通过对拉伸损伤 DAMAGET 结果进行输出,其单元数量为 0,因此,可认为桥墩未产生明显损伤。

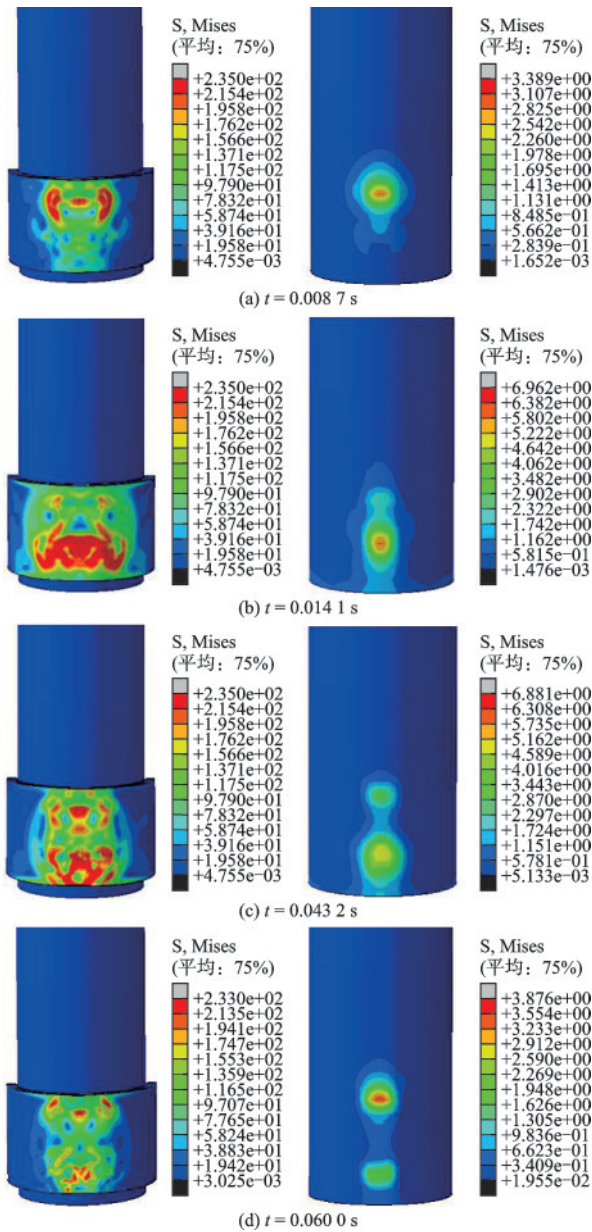


图 15 有防撞装置下车辆撞击桥墩应力云图

Fig.15 Stress cloud diagram of vehicles hitting bridge piers with anti-collision device

将有限元数值模拟得到撞击力时程曲线与各部件的能量变化绘图如图 16 所示。可以发现,在  $t=0.0138\text{ s}$  时,桥墩受到最大撞击力为  $2674.41\text{ kN}$ , 对比无防撞装置工况,最大撞击力降低  $49.85\%$ 。分析能量时程曲线可知,与发动机相撞时,防撞装

置能量迅速增加,达到第一个能量吸收峰值,当时间持续约  $0.035\text{ s}$  后,在车厢货物的惯性作用下,防撞装置达到第二个能量吸收峰值。最终在撞击过程中,聚氨酯产生塑性变形所吸收得能量最多,为  $56.96\text{ kJ}$ ,其次为外层钢板和外层泡沫铝、内层钢板、内层泡沫铝,最大值分别为  $55.57$ 、 $16.16$ 、 $5.16$ 、 $4.33\text{ kJ}$ ,故内层泡沫铝和钢板以及桥墩所吸收得能量较低,且桥墩基本没有吸收能量。综上,可以认为防撞装置对桥墩起到了良好的防护效果。

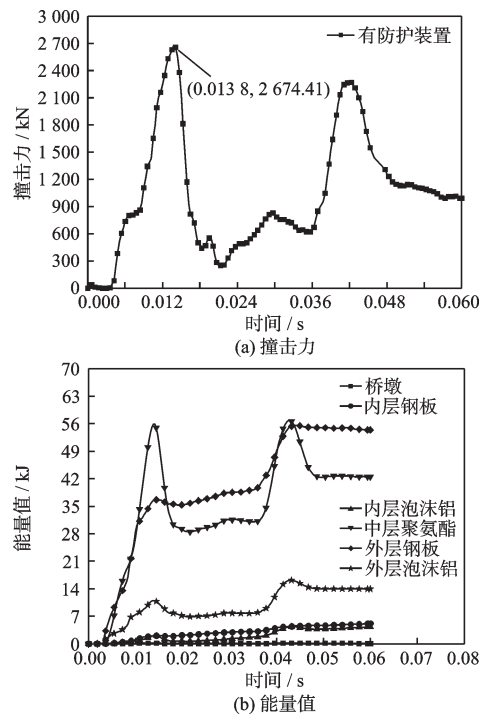


图 16 撞击力和防撞装置各部件能量变化

Fig.16 Impact force and energy changes in each component of the anti-collision device

## 4 结论

提出一种泡沫铝基组合耗能装置,通过静力压缩试验获取材料,获取了材料本构参数以及组合结构最优型式;通过落锤冲击试验与有限元数值模型对比,验证了动力冲击作用下数值模型及材料参数的适用性;以典型工程案例为原型,开展了车辆撞击作用下桥墩结构非线性动力响应机制研究,主要得出以下结论:

(1)室内静力压缩试验表明,泡沫铝、聚氨酯材料密度显著影响其屈服应力及平台应力,组合结构的耗能性能受材料密度和厚度组合的影响。采用

吸能密度 $EA$ 、比吸能 $SEA$ 及吸能效率 $EEA$ 综合耗能指标对比,泡沫铝-聚氨酯-泡沫铝夹芯组合结构型式工况3-4性能较好,其 $EA$ 、 $SEA$ 及 $EEA$ 分别为 $3.0 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ 、 $12.21 \text{ kJ/kg}$ 及 $0.286$ 。工况3-4将作为本研究落锤冲击试验及车-桥碰撞数值模拟中采用的结构型式。

(2)泡沫铝基组合防撞装置的落锤冲击试验及数值模拟对比研究表明,数值模拟获得的装置变形形态与试验相似,计算得到支反力峰值与试验所得支反力峰值误差在 $5.30\%$ 左右,低于 $15\%$ 。因此,可认为本研究数值模型及材料参数适用于冲击作用下的防撞装置动力响应研究,且具有较高的可靠性。

(3)车-桥碰撞动力响应数值模拟研究表明,在无防撞装置工况下,车辆撞击力最大值为 $5\,332.99 \text{ kN}$ ,桥墩吸收了 $22.05 \text{ kJ}$ 能量,最大应力为 $124.46 \text{ MPa}$ ,墩身产生明显损伤;在有防撞装置工况下,车辆撞击力的最大值为 $2\,674.41 \text{ kN}$ ,桥墩基本没有吸收能量,桥墩最大应力为 $6.96 \text{ MPa}$ ,桥墩未发生损伤。相比于无防撞工况车辆撞击力降低了 $49.85\%$ ,桥墩的最大应力值降低了 $94.41\%$ ,表明该新型泡沫铝基柔性组合防撞装置对桥墩起到了较好的防护效果。

## 参考文献:

[1] Buth E, Brackin M S, Williams W F, et al. Collision loads on bridge piers: phase 2. report of guidelines for designing bridge piers and abutments for vehicle collisions[R]. Texas: Texas State Publications, 2011.

[2] 刘山. 车辆撞击下钢筋混凝土桥墩的撞击力及损伤研究[D]. 北京:北方工业大学, 2017.  
Liu S. Research on impact force and damage of reinforced concrete pier under vehicle impact [D]. Beijing: North China University of Technology, 2017. (in Chinese)

[3] 曹明,张南,沈强,等. 船桥撞击力影响因素有限元仿真模拟分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3): 603-611.  
Cao M, Zhang N, Shen Q, et al. Finite element simulation of influencing factors of ship-bridge impact force [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 603-611. (in Chinese)

[4] 邵俊虎,占玉林,陈宁,等. 驳船撞击下RC桥墩的非线性动力响应与损伤特征分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(1): 81-91.

Shao J H, Zhan Y L, Chen N, et al. Nonlinear dynamic response and damage characteristic analysis of RC Pier under barge collision[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(1): 81-91. (in Chinese)

[5] 黄礼芳. 汽车对人行天桥桥墩撞击的动力响应分析及安全防护措施研究[D]. 广西:广西大学, 2013.  
Huang L F. Dynamic response analysis and safety protection measures of vehicle impact on pier of pedestrian bridge [D]. Guangxi: Guangxi University, 2013. (in Chinese)

[6] 付旭辉,田鹏,余葵,等. 珠海淇澳大桥船撞能力评估及防撞设计[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 4205-4210.  
Fu X H, Tian P, Yu K, et al. Evaluation and anti-collision design of Qi'ao Bridge in Zhuhai [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10): 4205-4210. (in Chinese)

[7] 陈贵旋. 橡胶混凝土抗冲击性能研究[D]. 广东:广东工业大学, 2011.  
Chen G X. Research on impact resistance of rubber concrete [D]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2011. (in Chinese)

[8] 荆国强,李清岭,马海英,等. 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): 7581+89.  
Jing G Q, Li Q L, Ma H Y, et al. Research on anti-collision performance of steel-UHPC combined anti-collision floating tank [J]. Technology of Highway and Transport, 2023, 39(1): 7581+89. (in Chinese)

[9] Zhang L W, Xie Z J, Li J, et al. A new polyurethane-steel honeycomb composite pier anti-collision device: concept and compressive behavior [J]. Advances in Structural Engineering, 2022, 25(4): 820-836.

[10] 胡峰强,林嘉盛,熊鑫,等. 聚氨酯泡沫防撞材料裹覆桥墩的车辆撞击数值模拟[J]. 南昌大学学报(理科版), 2022, 46(4): 423-427.  
Hu F Q, Lin J S, Xiong X, et al. Numerical simulation of vehicle impact on bridge piers coated with polyurethane foam anti-collision material [J]. Journal of Nanchang University (Science Edition), 2022, 46(4): 423-427. (in Chinese)

[11] Striwe J, Reuter C, Sauerland K H, et al. Manufacturing and crashworthiness of fabric-reinforced thermoplastic composites[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 123: 501-508.

(本文编辑:周小潭)

(下转第1061页)