

# 车辆撞击作用下泡沫铝防撞桥墩的动态响应特性

张于晔, 潘睿阳, 蒋冬启

(南京理工大学土木工程系, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 针对车辆撞击桥墩问题, 设计了一种采用泡沫铝材料的桥墩防撞装置。采用 LS-DYNA 软件分别建立有无防撞装置的桥墩三维实体单元模型, 分析了车辆撞击作用下各桥墩的动态时程响应。对比了两种情况下车辆对桥墩的撞击力、桥墩位移和应力等特征参量, 并从能量传递的角度分析了泡沫铝防撞装置的耗能能力和撞击车辆损伤。结果表明: 采用泡沫铝防撞装置后, 车辆对桥墩的撞击力、桥墩位移和应力都明显减小, 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。研究结果可为车辆撞击桥墩相关研究和桥墩防撞设计提供参考。

**关键词:** 桥墩; 车辆撞击; 动态响应; 泡沫铝; 防撞装置

**中图分类号:** U441+.3; U443.22   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1004-4523(2021)01-0089-10

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.01.010

## 引言

车辆撞击跨线桥梁墩柱的事故屡有发生。Monique<sup>[1]</sup>根据美国交通部门的统计, 指出在美国约有超过 60% 的跨线桥遭受过车辆撞击, 每年仅车辆撞击预应力桥事故就有 160 余起。在中国, 据北京市交通部门<sup>[2]</sup>的统计, 2000 年至 2006 年期间, 北京市约 50% 的立交桥曾遭受过车辆撞击, 每年车辆撞击桥梁事故超过 100 起, 车辆撞击占到了桥梁损伤因素的 20% 以上。由此可见, 车辆与桥梁撞击是一种频发事件, 且会造成桥梁损伤、人员伤亡和交通阻塞等严重后果。因此, 对车辆与桥梁墩柱碰撞问题和桥墩防车辆撞击的研究显得尤为重要。

针对冲击荷载作用引起的结构振动问题, 赵斌等<sup>[3]</sup>通过现场模拟振动试验并建立相应的有限元计算模型, 对冲击荷载诱发的环境振动做出了分析与预测; 杨英武等<sup>[4]</sup>通过计算半无限体在车辆冲击荷载作用下表面的振动情况来近似预测车辆跳车时引起的地面振动, 并与实测结果进行了对比。针对车辆撞击桥墩的冲击荷载作用, 国内外学者进行了相关研究。Buth 等<sup>[5-6]</sup>通过数值模拟分析了卡车与桥墩撞击的过程, 并在进行了两次实车碰撞实验后, 对相关规范中的撞击力设计值提出了修改意见; 刘明慧和颜全胜<sup>[7]</sup>在考虑了不同边界条件的情况下分析了汽车与桥墩碰撞的动力响应, 并用其模拟结果与

现有规范对比提出了相应的建议; 崔堃鹏等<sup>[8]</sup>通过等效静力计算分析了卡车与桥墩碰撞问题, 并与中国相关规范中的等效静力值进行了比较。在桥墩防撞研究方面, 韩艳等<sup>[9]</sup>进行了外包钢板混凝土桥墩在车辆碰撞下的动力性能模型试验; 葛胜锦等<sup>[10]</sup>提出了一种轮辐式桥墩防撞装置, 并通过仿真建模和数值分析验证其效果。胥睿<sup>[11]</sup>将钢板橡胶混凝土覆层应用于桥墩防撞, 并通过试验与有限元模拟验证了其防撞效果。

泡沫铝是一种兼具金属和泡沫特性的新型结构功能材料, 通过在纯铝或者铝合金中加入添加剂发泡而制成<sup>[12]</sup>。泡沫铝材料在受到冲击荷载时, 可以在较低应力水平下吸收大量的能量。因此, 泡沫铝防撞装置具有质量轻、吸能好的特点, 在工程结构防护方面具有广阔的应用前景<sup>[12-13]</sup>。然而, 对于采用泡沫铝防撞装置的桥墩, 其在车辆撞击作用下的撞击力、动态响应、桥墩及车辆损伤等问题有待进一步研究。

本文基于既有车撞桥墩模型试验, 建立车辆撞击桥墩三维实体有限元模型, 分析在车辆撞击产生的冲击荷载下, 钢筋混凝土桥墩的动态响应特性。通过等效静力法把瞬态撞击过程力等效为静力荷载。并采用泡沫铝材料设计桥墩防撞装置, 以期利用其优良的变形吸能能力, 通过减小撞击力, 以及因撞击引起的桥墩加速度、位移, 并且吸收车辆撞击过程中的能量, 达到同时保护桥墩与车辆的目的。通

过对比有无防撞装置两种情况下撞击力、位移、应力、加速度的时程反应,定量分析碰撞系统各对象(桥墩、保护装置、车辆)的动力响应,并从能量传递的角度研究了泡沫铝防撞装置在碰撞过程中对桥墩与车辆的保护效果。

## 1 车辆-桥墩撞击模型设计

### 1.1 试验简介

国内外学者常采用缩尺模型来进行车辆与桥墩碰撞问题的试验研究。钟伟<sup>[14]</sup>基于某实际桥梁的钢筋混凝土桥墩,设计制作了缩尺比为1:5的桥墩模型,进行了车-桥墩水平碰撞模型试验。该试验获得了车辆对桥墩的撞击力、桥墩位移等参数的动力时程曲线。本文以该试验作为参考,建立相应的车辆撞击桥墩有限元模型,并针对采用泡沫铝防撞装置的桥墩进行防撞性能分析。

### 1.2 桥墩模型

桥墩模型为圆柱形钢筋混凝土现浇桥墩,墩高为2.0 m,截面直径为0.34 m,墩身采用C30混凝土。桥墩中采用10根直径为14 mm的HRB335钢筋作为纵向钢筋,在圆截面方向对称配筋,配筋率为1.7%;采用直径为8 mm的R235钢筋作为箍筋,配箍率为1.55%。桥墩模型的构造尺寸及配筋如图1所示。

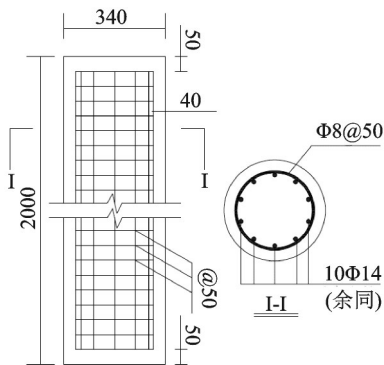


图1 桥墩尺寸与配筋图(单位:mm)

Fig. 1 Diagram of pier size and reinforcement (Unit:mm)

### 1.3 车辆模型

参考试验<sup>[14]</sup>中采用Q235钢材制作质量块模拟撞击车辆,忽略了车辆变形对撞击过程的影响。本文根据桥墩模型的尺寸,采用长宽高为1.3 m×0.6 m×0.2 m的刚体质量块模拟撞击车辆。《公路桥涵设计通用规范》<sup>[15]</sup>规定:汽车撞击力标准值在车辆行驶方向上取1000 kN,撞击高度为地面以上1.2 m

处。由于本文采用缩尺模型,相应的撞击高度与车辆速度需要按照比例有所降低。本文取撞击高度为0.3 m,车辆质量设定为1.2 t,以2.5 m/s的速度沿行驶方向正面撞击桥墩,模拟普通民用轿车与桥墩的撞击过程。

### 1.4 防撞装置模型

本文设计的防撞装置为空心圆柱的形式,泡沫铝防撞装置套在桥墩外,与桥墩采用胶接的方式进行连接,泡沫铝材料的密度为1200 kg/m<sup>3</sup>,防撞装置示意图如图2所示。防撞装置的高度应高于车辆撞击点,因此在本模型中取防撞装置的高度为0.5 m。由于防撞装置粘结于直径为340 mm的桥墩上,所以防撞装置的内径选为340 mm。防撞装置的厚度偏于保守地取为200 mm,先确定该厚度下防撞装置的有效性,下文将对其厚度的合理取值进行进一步分析。

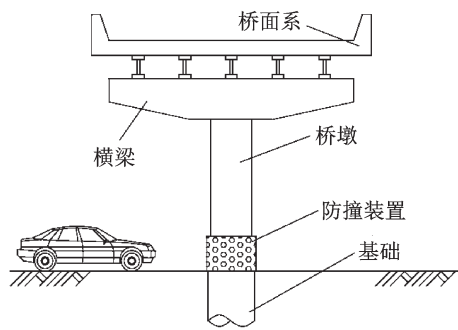


图2 防撞装置示意图

Fig. 2 Diagram of the anti-collision device

## 2 有限元模型的建立与验证

### 2.1 模型建立

本文采用实体单元SOLID164模拟混凝土桥墩与刚体车辆;采用LINK160单元模拟纵向钢筋和箍筋。

混凝土材料模型采用LS-DYNA中的JHC模型<sup>[16]</sup>。该材料模型广泛应用于描述在冲击、爆炸等大变形、高应变率条件下工作的材料特性。主要计算参数如表1所示。其中 $\rho_0$ 为密度, $G$ 为剪切模量, $f_c$ 为抗压强度, $T$ 为抗拉强度。

钢筋采用塑性随动强化模型进行模拟<sup>[17]</sup>。通过在仅随动硬化和仅各向同性硬化间调整硬化参数 $\beta$

表1 混凝土材料参数

Tab. 1 Material parameters of concrete

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$G/\text{Pa}$	$f_c/\text{Pa}$	$T/\text{Pa}$
2400	$1.32\times 10^{10}$	$3.5\times 10^7$	$3.5\times 10^6$

来选择各向同性或随动硬化。应变率用 Cowper-Symonds 模型来考虑,用与应变率有关的因数表示屈服应力,如下式所示

$$\sigma_y = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \quad (1)$$

式中  $\sigma_0$  为初始屈服应力,  $\dot{\epsilon}$  为应变率,  $C$  和  $P$  为应变率参数,  $\epsilon_p^{\text{eff}}$  为有效塑性应变,  $E_p$  为塑性硬化模量。  $E_p$  由下式给出

$$E_p = \frac{E_{\text{tan}} E}{E - E_{\text{tan}}} \quad (2)$$

具体参数取值如表 2 所示。其中:  $\rho_E$  为密度,  $E_E$  为弹性模量,  $\nu_E$  为泊松比,  $E_{\text{tan}}$  为切线模量,  $\beta$  为硬化参数,  $\sigma_{01}$  为纵筋屈服应力,  $\sigma_{02}$  为箍筋屈服应力,  $\epsilon_f$  为失效应变。

表 2 钢筋材料参数

Tab. 2 Material parameters of rebar

$\rho_E/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$E_E/\text{Pa}$	$\nu_E$	$E_{\text{tan}}/\text{Pa}$	$\beta$
7850	$2 \times 10^{11}$	0.3	$1 \times 10^9$	1
$\sigma_{01}/\text{Pa}$	$\sigma_{02}/\text{Pa}$	$C$	$P$	$\epsilon_f$
$3.47 \times 10^8$	$2.51 \times 10^8$	40	5	0.3

LS-DYNA 计算中允许把计算模型中相对刚硬的部分定义为刚体。由于本文不考虑车辆变形能的影响,本试验采用刚体模型来模拟车辆。具体参数如表 3 所示。

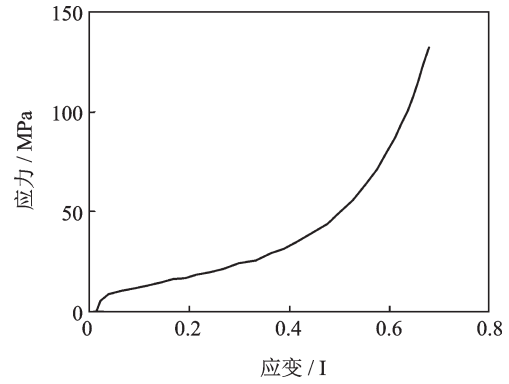
表 3 车辆材料参数

Tab. 3 Material parameters of car

$\rho_v/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$E_v/\text{Pa}$	$\nu_v$
7800	$2.06 \times 10^{13}$	0.3

王永刚等<sup>[18]</sup>在对泡沫铝材料的试验中详细阐述了泡沫铝的材料参数,本文采用与其相同的参数对泡沫铝进行建模,并将在下文对参数与模型的合理性进行验证。采用 MAT063(可压缩泡沫)本构模型来模拟泡沫铝材料。泡沫铝的本构关系需要输入材料的工程应力-应变曲线。泡沫铝材料的应力-应变曲线如图 3 所示。泡沫铝其余参数如表 4 所示。其中:  $\rho_A$  为密度,  $E_A$  为弹性模量,  $\nu_A$  为泊松比,  $P_{\text{cut}}$  为拉伸荷载下定义失效的拉伸应力截止值。

试验中,墩底为固定端约束,限制 6 个方向的自由度;墩顶为自由端。在接触模拟上,使用 ASTS 自动面面接触,静摩擦系数取 0.3<sup>[14]</sup>,设置车辆、钢筋为接触面组员,桥墩为接触目标面组员。本文采用几何结构规则的有限元模型,因此在网格划分时采用映射划分方法,通过控制网格尺寸对模型进行网格

图 3 泡沫铝的应力应变曲线<sup>[18]</sup>Fig. 3 Stress-strain curve of aluminum foam<sup>[18]</sup>表 4 泡沫铝材料参数<sup>[19]</sup>Tab. 4 Material parameters of aluminum foam<sup>[19]</sup>

$\rho_A/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$E_A/\text{Pa}$	$\nu_A$	$P_{\text{cut}}/\text{Pa}$
1200	$1.2 \times 10^9$	0.3	$1.0 \times 10^7$

划分,选用六面体形状网格。其余参数均依据参考试验设置。桥墩混凝土单元 23920 个,纵筋单元 800 个,箍筋单元 1794 个,车辆单元 5400 个,防撞装置单元 6160 个。有限元模型如图 4 所示。

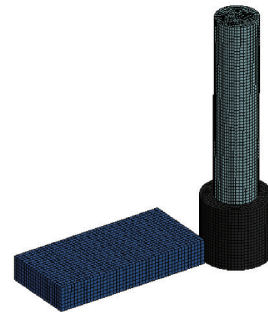


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

## 2.2 模型验证

### 2.2.1 桥墩模型验证

在已有缩尺试验的基础上建立的有限元仿真模型需要进行模型验证。建立与参考试验条件完全相同的有限元模型,对本文的桥墩模型进行验证。通过有限元计算可以得出撞击力时程、桥墩位移时程等数据。提取撞击速度为 2.5 m/s 的情况下,无防撞装置的桥墩的撞击力时程曲线与位移时程曲线,与参考试验结果进行比较。

图 5 显示了既有缩尺试验的试验结果与本文通过有限元模拟计算得到的撞击力时程的对比。本文的碰撞力时程曲线同缩尺试验与相应的数值模拟中所得的碰撞力时程曲线变化趋势大体相同。本文计算得到的撞击力峰值为 32.5 kN,这与试验中得到的 35.0 kN 的结果相比误差为 7.14%,计算结果相近。

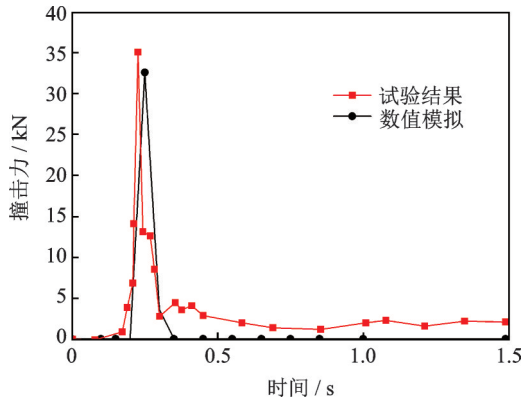


图5 撞击力时程曲线

Fig. 5 Collision force-time curve

图6和图7分别为桥墩墩顶和撞击点的位移时程曲线。

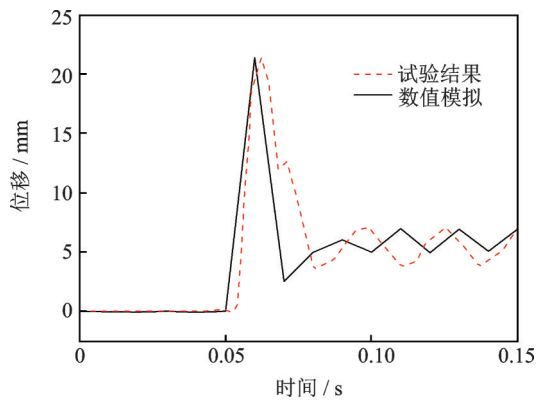


图6 墩顶位移时程曲线

Fig. 6 Pier top displacement-time curve

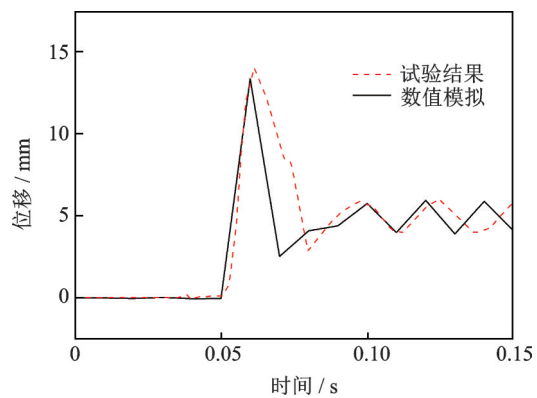


图7 撞击点位移时程曲线

Fig. 7 Impact area displacement-time curve

从图6和7可以看出,在撞击过程中,本文通过数值模拟得到的桥墩墩顶和撞击点的位移时程曲线与参考试验中的位移时程曲线较为吻合。其中,参考试验得到的墩顶最大位移为22.3 mm,本文有限元模型计算得到的结果为21.2 mm,误差为4.93%;参考试验得到的桥墩撞击点最大位移为14.0 mm,有限元模型计算得到的结果为13.1 mm,误差为6.43%。通过数值与试验结果的对比分析,可知本

文的桥墩撞击模型具有较高的精度,可满足桥墩动态响应分析的需求。

### 2.2.2 泡沫铝模型验证

李宗岷等<sup>[19]</sup>采用落锤试验对泡沫铝的抗冲击性能作了研究。其试验中,泡沫铝试件为一圆柱体,直径25 mm,高25 mm,以不同的撞击能量加载,得到泡沫铝材料的吸能-变形曲线。采用本文的泡沫铝参数与建模方法,建立相同工况下的泡沫铝抗冲击试验的有限元模型,将计算结果与文献结果进行对比,以验证本文参数与模型的合理性。结果对比如图8所示。

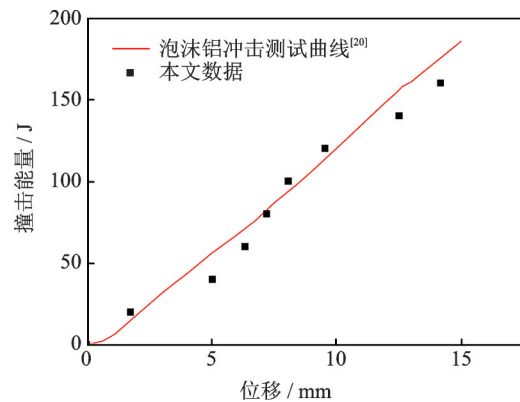


图8 泡沫铝冲击测试结果

Fig. 8 Impact test results of foam aluminum

从图8可以看出,本文模拟得到的数据点与现有试验得到的泡沫铝冲击测试曲线基本吻合,散点与曲线的Pearson相关系数 $r = 0.96$ ,相关性较强。与试验曲线相比,计算得到的各数据点最小误差为2.04%,最大误差为22.3%。这说明该泡沫铝参数与建模方法可满足计算精度要求。

## 3 结果分析与讨论

在验证桥墩和泡沫铝防撞装置的模型后,进行车辆撞击下泡沫铝防撞装置对桥墩保护效果的数值模拟试验。为使撞击过程更符合实际工程,相较于参考试验,本章将撞击高度调整为0.3 m。在防撞装置的有效性研究中,设置无防撞装置和有防撞装置的两组工况进行对比。在防撞装置的设计参数研究中,设置不同工况下多组厚度的防撞装置,对比分析其防撞效果。

### 3.1 撞击力分析

车辆对桥墩的撞击力是评估桥墩在遭受车辆撞击后的承载能力的基础。图9所示为在有防撞装置和无防撞装置时桥墩受到的车辆撞击力时程曲线。

由图9可以看出,撞击力随时间变化显现出非



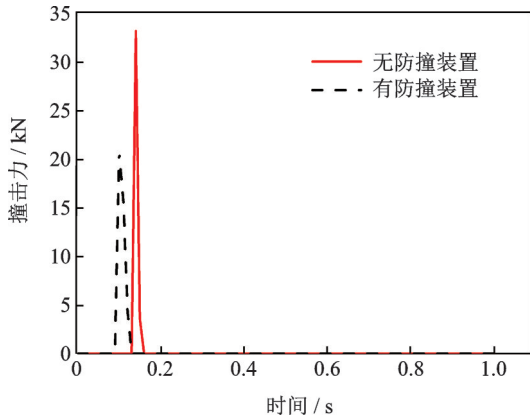


图9 撞击力时程曲线

Fig. 9 Collision force-time curve

常明显的非线性特征。其中,在无防撞装置的情况下,在0.14 s时,车辆与桥墩发生碰撞,撞击力迅速达到峰值33.1 kN,之后随着车辆与桥墩的分离,撞击力迅速降低。在有防撞装置的情况下,车辆提前接触到防撞装置并发生碰撞,在0.10 s时,车辆与防撞装置接触并被反弹分离,撞击力达到峰值20.7 kN。桥墩在安装防撞装置后,撞击力峰值有明显的降低,约减小了37.5%。

### 3.2 等效撞击力计算

国内外相关规范<sup>[15,20-21]</sup>均采用静态定值力来规定撞击力限值。计算车辆撞击过程中的等效撞击力,目的是得到撞击力的合理取值。在等效撞击力的计算中,局部平均法是一种简单方便、易于设计的方法。局部平均法以撞击力峰值在其持续时间上的平均值作为等效撞击力,该方法的具体步骤为:对该时间段撞击力时程在时域内积分,然后与撞击时间的比值作为等效撞击力。

提取两种情况下墩顶位移时程,并做快速傅里叶变换(FFT),得到桥墩频谱响应如图10所示。

从图10中可以看出,在无防撞装置的情况下,

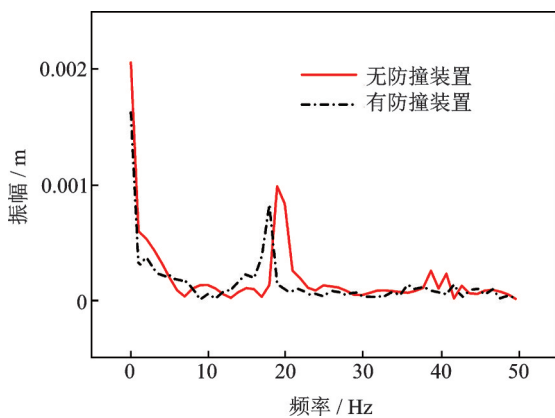


图10 频谱响应

Fig. 10 The spectral response

零频幅值最大,为2.06 mm,之后响应极值出现在一阶频率18.8 Hz处;在有防撞装置的情况下,零频幅值最大,为1.62 mm,之后响应极值出现在一阶频率17.8 Hz处。根据崔堃鹏等<sup>[8]</sup>对车辆撞击桥墩等效力的研究结果,对于刚度较大的桥墩( $f > 5$  Hz)可以使用局部平均法计算等效撞击力。

现采用局部平均法计算两种情况下相应的等效撞击力,将计算得到的等效撞击力作为简化后的撞击力极值,并通过半正弦型曲线模型简化撞击力荷载<sup>[22]</sup>。计算过程如下:

等效撞击力的计算公式如下式所示

$$F_{\max} = \frac{1}{t_2} \int_0^{t_2} P(t) dt \quad (3)$$

式中  $F_{\max}$  为等效撞击力;  $P(t)$  为实际撞击力;  $t_2$  为实际撞击力持续时间。  $P(t)$  与  $t_2$  的值已通过3.1节的数值模拟得到,经计算,在无防撞装置的情况下,撞击力的等效撞击力为12.2 kN;在有防撞装置的情况下,等效撞击力为8.2 kN。可见,在加装防撞装置后,等效撞击力减小了约32.8%。下面对等效静力的撞击力时程曲线进行简化。简化的车辆撞击荷载按下列各式表述:

$$F(t) = F_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{t_1}\right) \quad (4)$$

$$\int_0^{t_1} F(t) dt = \int_0^{t_2} P(t) dt \quad (5)$$

$$t_1 = \frac{\pi}{2} \frac{\int_0^{t_2} P(t) dt}{F_{\max}} \quad (6)$$

式中  $F(t)$  为简化后的撞击力;  $F_{\max}$  为简化后的撞击力极值,即式(3)计算得到的等效撞击力;  $t_1$  为简化后撞击力持续时间;  $P(t)$  为实际撞击力;  $t_2$  为实际撞击力持续时间。经式(6)计算可得到,无防撞装置情况下,简化后撞击力持续时间为17.4 ms;有防撞装置情况下,简化后的撞击力持续时间为31.0 ms。简化后的撞击力时程曲线如图11所示。

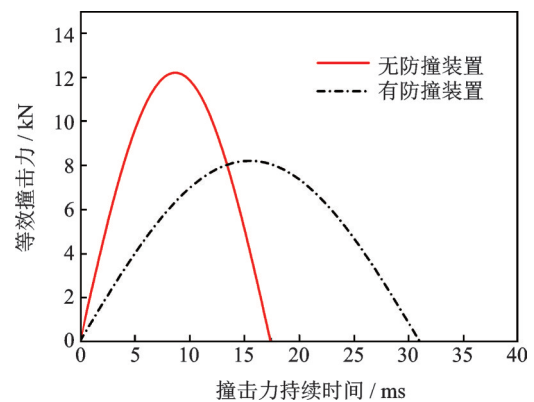


图11 等效撞击力时程

Fig. 11 Time history of equivalent collision force

### 3.3 位移分析

图12显示了在有、无防撞装置的情况下,桥墩的墩顶位移数值模拟结果。

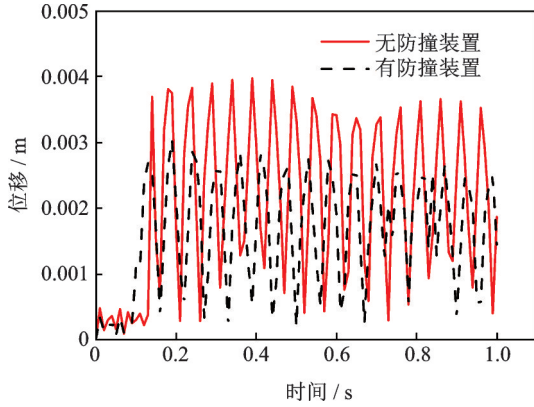


图12 墩顶位移时程曲线

Fig. 12 Pier top displacement-time curve

如图12所示,碰撞前,两组曲线并未完全处于零值,这是由于墩顶荷载的振荡作用。在无防撞装置时:车辆在0.14s时与桥墩发生碰撞,桥墩受到撞击力的作用开始发生振荡,其中,最大墩顶位移为3.97mm。碰撞后,随着能量的耗散,桥墩振幅逐渐减小。在有防撞装置时:车辆在0.10s时与防撞装置接触,撞击力传导至桥墩并使之发生振荡,最大墩顶位移为3.03mm。碰撞后,随着能量的耗散,桥墩振幅逐渐减小。可以看出,由于防撞装置减小了墩身所受的撞击力,墩顶位移有所降低。

### 3.4 应力分析

图13和图14分别对比了有、无防撞装置下,在车辆撞击瞬间桥墩迎撞面与墩身整体的应力云图。

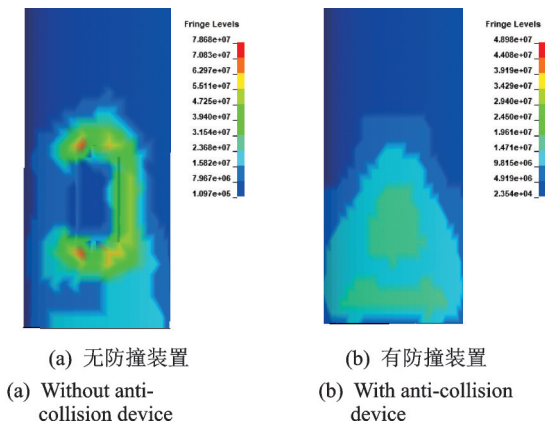


图13 迎撞面应力云图

Fig. 13 Mises stress contour plot of collision surface

由应力云图可以看出,无防撞装置的情况下,车辆与桥墩碰撞时,迎撞面受压,且有部分混凝土被压碎;桥墩碰撞区域的背部受拉。迎撞面应力以碰撞

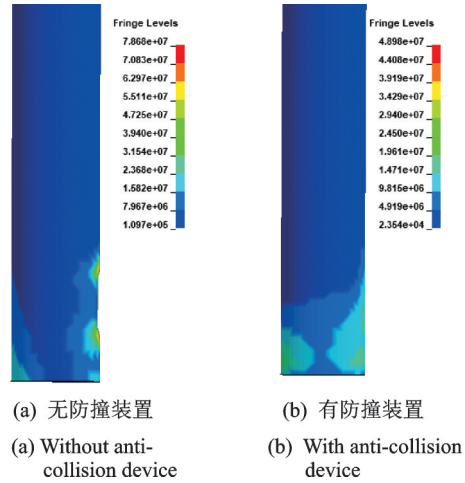


图14 墩身应力云图

Fig. 14 Mises stress contour plot of pier

区域为中心,向四周逐渐减小。墩底由于固结,受到较大的弯矩和剪力,应力也较为明显。在碰撞过程中,碰撞区与墩底是应力值较大部位。在有防撞装置的情况下,车辆与防撞装置碰撞,防撞装置的迎撞面受压,应力以迎撞面区域为中心,向四周逐渐减小。桥墩混凝土未发生破坏。桥墩迎撞面受压,碰撞区域背部受拉。墩底应力也较为明显。

图15对比了在有、无防撞装置的情况下,迎撞面的应力时程曲线。图16表示两种情况下墩底的应力时程曲线。

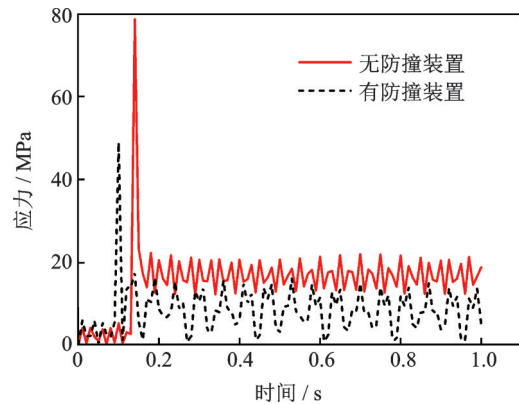


图15 迎撞面应力

Fig. 15 Mises stress-time curve of collision surface

结合应力云图与应力时程曲线,可以看出:无防撞装置的情况下,在整个撞击过程中,峰值应力出现在迎撞面遭受车辆撞击的瞬间,应力峰值为78.7MPa,而墩底最大应力为25.0MPa。加装了防撞装置后,墩身各处应力均有所降低:墩身上的峰值应力出现在迎撞面,为48.9MPa,相比于无防撞装置的情况下,峰值应力减小了37.9%。同时,由于防撞装置降低了墩身的位移,墩底受到的弯矩和剪力也有所降低:墩底最大应力为12.1MPa,与无防撞装置的情况下相比,墩底最大应力减小了约51.6%。

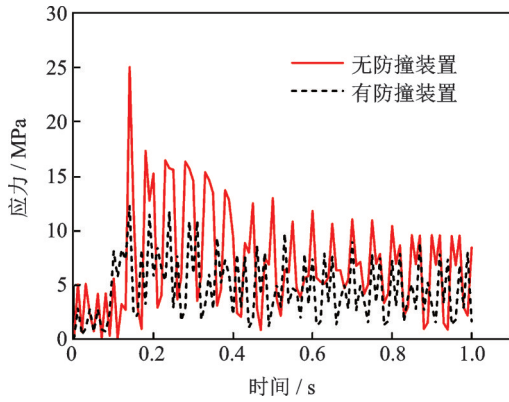


图 16 墩底应力

Fig. 16 Mises stress-time curve of bottom of pier

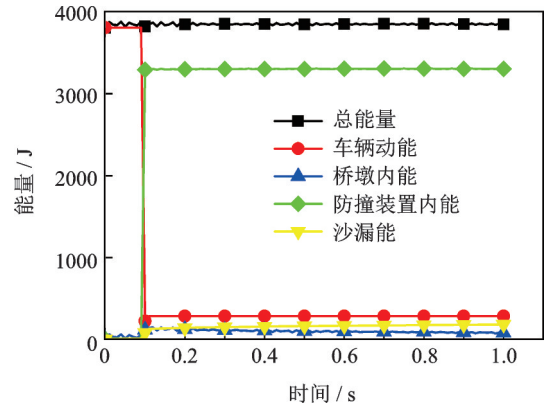


图 18 能量时程曲线(有防撞装置)

Fig. 18 Energy-time curve (with anti-collision device)

### 3.5 能量分析

图 17 描述了在无防撞装置的情况下,碰撞过程的能量变化时程曲线。其中,系统总能量主要由以下部分组成:车辆动能、桥墩内能、沙漏能以及碰撞造成的单元失效与摩擦因素损失的能量之和,其中单元失效与摩擦造成的能量损失可以忽略不计,因此能量表达如下式所示

$$E = E_k + E_i + E_h \quad (7)$$

式中  $E$  为总能量,  $E_k$  为车辆动能,  $E_i$  为桥墩内能,  $E_h$  为沙漏能。

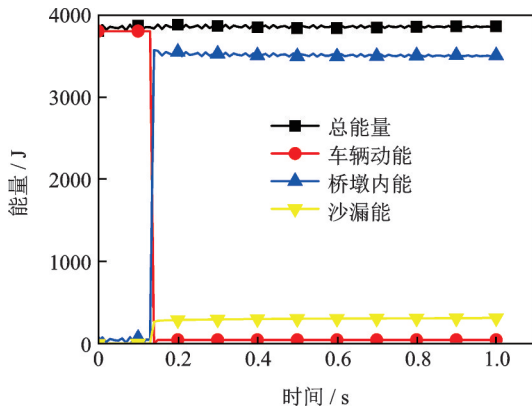


图 17 能量时程曲线(无防撞装置)

Fig. 17 Energy-time curve (without anti-collision device)

无防撞装置时,在碰撞发生前,车辆动能为 3800 J 左右,约占总能量的 100%。碰撞发生后,系统之间各能量发生相互转化。89.5% 的车辆动能转化为桥墩的内能,车辆残余动能约占 2.3%,沙漏能占比 8.18%。整个过程基本遵循能量守恒定律。

图 18 描述了在有防撞装置的情况下,碰撞过程的能量变化时程曲线。系统总能量主要由车辆动能、桥墩内能、防撞装置内能、沙漏能以及碰撞造成的单元失效与摩擦因素损失的能量组成,忽略单元失效与摩擦造成的能量损失,本系统的能量表达如下式所示

$$E = E_k + E_{i1} + E_{i2} + E_h \quad (8)$$

式中  $E$  为总能量,  $E_k$  为车辆动能,  $E_{i1}$  为桥墩内能,  $E_{i2}$  为防撞装置内能,  $E_h$  为沙漏能。

有防撞装置时,碰撞后约 86.4% 的车辆动能被防撞装置吸收,桥墩吸收的能量仅占 1.6%,沙漏能占比 4.7%,车辆残余动能占比 7.3%。通过对比两种情况下的能量变化时程曲线可以看出,在碰撞过程中,该防撞装置可以通过自身的弹、塑性变形有效地吸收大部分车辆动能。

### 3.6 车辆损伤分析

防撞装置可以通过减小撞击力以及吸收能量的方式来减小撞击过程中车辆的损伤情况。由于本试验使用刚体模型模拟车辆,且车辆初速度设定较小,因此未考虑车辆变形所消耗的内能,且是否加装防撞装置对车辆在撞击发生后的末速度影响不大。但仍然可以提取碰撞过程中的撞击力时程与车辆加速度时程作为判断车辆的损伤情况的依据。

如图 19 所示,在未加装防撞装置的情况下,车辆在撞击桥墩后即与桥墩分离,最大加速度约为  $26.5 \text{ m/s}^2$ ;在加装防撞装置的情况下,车辆加速度最大值明显降低,约为  $15.7 \text{ m/s}^2$ ,比无防撞装置时降

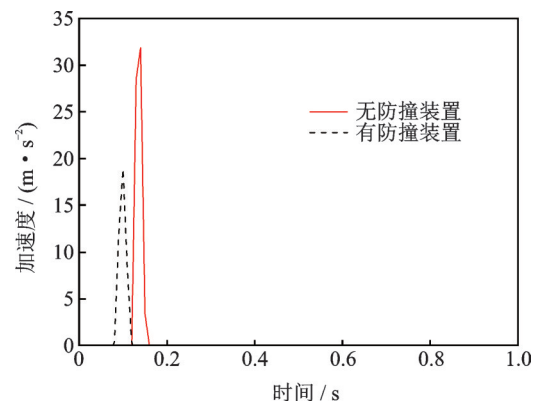


图 19 车辆加速度时程曲线

Fig. 19 Acceleration-time curve of vehicle



低了 40.6%。结合之前的撞击力分析,防撞装置还可有效减小撞击力,其峰值减小了 37.5%。因此可以认为该防撞装置可以有效减小撞击过程中车辆的损伤。

### 3.7 防撞装置参数分析

通过以上分析可以看出,泡沫铝防撞装置对受车辆撞击的桥墩具有较好的保护作用。本节对泡沫铝防撞装置的厚度进行参数分析,基于分析结果对防撞装置厚度给出设计建议。

在有防撞装置的桥墩受车辆撞击的过程中,通过改变防撞装置的厚度,可以验证防撞装置的保护效果随厚度的变化。设置泡沫铝防撞装置的厚度分别为 50, 100, 150, 200, 250, 300 mm, 并分别建立有防撞装置的桥墩模型。在 2.1 节的模型中,建立了直径为 340 mm 的圆柱形钢筋混凝土现浇桥墩的有限元模型,现增设截面为 340 mm × 340 mm 的方形截面钢筋混凝土现浇桥墩作为对照组,对照组除截面形式外,其余参数如混凝土标号、配筋率、配箍率等均与 2.1 节的圆柱形桥墩保持一致。记圆柱形桥墩为 A 组,方形截面桥墩为 B 组。撞击车辆参数与 2.1 节的模型保持相同,撞击速度为 2.5 m/s。通过有限元计算,得到不同防撞装置厚度下的撞击力峰值和墩顶最大位移。计算结果如图 20 和 21 所示。

从图 20 中可以看出,随着防撞装置厚度的增加,撞击力峰值有着明显地降低:防撞装置厚度在 100 mm 以下时,对于撞击力峰值的降低作用并不明显;但当防撞装置厚度达到 300 mm 时,相较于无防撞装置的情况下,A 组桥墩的撞击力峰值降低了 49.5%,B 组降低了 50.3%,防撞效果显著。从图 21 可以看出,防撞装置对减小墩顶位移同样有显著的作用:相较于无防撞装置的情况下,当防撞装置厚度达到 300 mm 时,A 组墩顶最大位移减小了 34.0%,B 组减小了 33.0%。以上的分析可以看出,防撞装置的防护性能随着其厚度的增加而提升。但是,在实际工程中,考虑到桥墩防撞装置不能对其所处地面交通造成较大影响,且还需考虑其经济适用性,因此防撞装置的厚度不宜过厚。当防撞装置的厚度取 150-200 mm 时,防撞装置可使撞击力峰值降低 25%-40%,使墩顶最大位移减小 15%-25%。因此,对于本文分析的圆形或方形墩,建议防撞装置的厚度取为 150-200 mm。这样在对地面交通影响较小的情况下,有效地起到对桥墩的保护作用。需要指出的是,该设计参数建议主要针对本文研究的两种桥墩形式,对于其他形式桥墩的泡沫铝防撞装置合理厚度的取值,尚有待进一步研究确定。

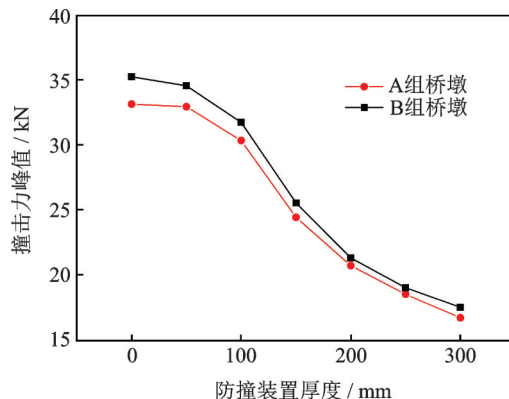


图 20 不同工况下撞击力峰值

Fig. 20 Peak value of impact force under different conditions

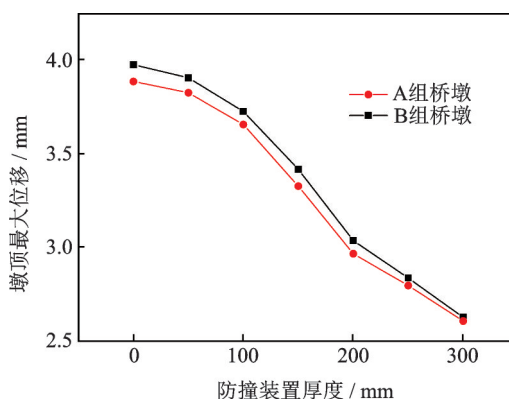


图 21 不同工况下墩顶最大位移

Fig. 21 Maximum displacement of pier top under different conditions

## 4 结论与展望

为减小车辆-桥墩撞击过程中桥墩与车辆的损伤,在桥墩局部设计泡沫铝防撞装置。基于既有车辆-桥墩撞击试验,建立车辆-桥墩撞击三维实体有限元模型,研究了普通民用轿车与桥墩碰撞的动态响应特征。对比了在有、无防撞装置的情况下桥墩在受到车辆撞击时的动力时程响应。得到以下结论:

(1)设置防撞装置能有效地降低车辆撞击桥墩过程中桥墩的响应。在加装了厚度为 200 mm 的泡沫铝材料防撞装置的情况下,与无防撞装置的情况相比,车辆撞击力峰值减小了 37.5%,等效撞击力峰值减小了 32.8%,最大墩顶位移减小了 10%,峰值应力减小了 37.9%,墩底最大应力减小了 51.6%。

(2)采用泡沫铝材料制成的防撞装置,发挥了其耗能好、耐撞击、抗冲击的优势,通过其弹、塑性变形有效地缓冲并消耗车辆在撞击中的动能,减轻桥墩受到的破坏。本文碰撞过程中总能量的 86.42% 被防撞装置吸收,说明泡沫铝材料适于制作桥墩防撞装置。



(3)设置防撞装置后,防撞装置减小了车辆在撞击后的加速度和所受到的撞击力,吸收了大部分的车辆动能,这说明防撞装置可减轻车辆受到的损伤,在对桥墩防护的同时保护了车辆。

(4)车辆与桥墩碰撞相关规范只规定了碰撞力的大小,但在撞击过程中车辆的速度、质量,桥墩的尺寸等参数均会影响其动力特性。因此尚有必要研究这些参数对车辆撞击桥墩动态响应特性的影响规律。

#### 参考文献:

- [1] Monique C H. Evaluation of the performance of bridge steel pedestals under low seismic loads [D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2007.
- [2] 王军华,叶晓彦. 立交桥试用激光防撞预警系统[N]. 北京晚报, 2007.07.31.  
Wang Junhua, Ye Xiaoyan. Trial laser warning system for overpass [N]. Beijing Evening News, 2007.07.31
- [3] 赵斌,杨彪,张凤亮. 冲击荷载诱发的环境振动预测与分析[J]. 振动工程学报, 2018, 31(6): 941-947.  
Zhao Bin, Yang Biao, Zhang Fengliang. Predictive analysis of environmental vibration induced by impact load [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(6): 941-947.
- [4] 杨英武,韩舟轮,王柏生. 车辆通过减速带引起的振动分析[J]. 振动工程学报, 2007, 20(5): 502-506.  
Yang Yingwu, Han Zhoulun, Wang Baisheng. Vibration analyses caused by vehicles running across the speed control hump [J]. Journal of Vibration Engineering, 2007, 20(5): 502-506.
- [5] Buth C E, Williams W F, Brackin M S, et al. Analysis of large truck collisions with bridge piers: Phase 1, report of guidelines for designing bridge piers and abutments for vehicle collisions [R]. Texas Transportation Institute, 2010.
- [6] Buth C 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 Transportation Institute, 2011, 1-87
- [7] 刘明慧,颜全胜. 汽车撞击桥墩作用力的比较分析[J]. 中外公路, 2010, 30(6): 146-149.  
Liu Minghui, Yan Quansheng. Comparative analysis of vehicle impact force on bridge pier [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(6): 146-149.
- [8] 崔堃鹏,夏禾,夏超逸,等. 汽车撞击桥墩瞬态撞击力的等效静力计算[J]. 振动与冲击, 2014, 33(4): 48-53.  
Cui Kunpeng, Xia He, Xia Chaoyi, et al. Equivalent static force calculation methods for transient impact force of a vehicle in collision with piers [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(4): 48-53.
- [9] 韩艳,范东振,刘山. 外包钢板对钢筋混凝土桥墩撞击性能影响的试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(23): 175-180.  
Han Yan, Fan Dongzhen, Liu Shan. Dynamic response of outsourcing steel plate reinforced concrete pier under vehicle collision [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(23): 175-180.
- [10] 葛胜锦,彭泽友,熊治华,等. FCZ 轮辐式桥墩防撞安全装置数值分析及性能评价[J]. 公路, 2012, (4): 224-228.  
Ge Shengjin, Peng Zeyou, Xiong Zhihua, et al. Numerical analysis and performance evaluation of flexible energy-absorption anti-crash instrument FCZ [J]. Highway, 2012, (4): 224-228.
- [11] 胥睿. 钢板-橡胶混凝土复合覆层应用于桥墩防撞的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.  
Xu Rui. Study on the application of steel plate-rubber concrete composite layer in anti-collision of bridge piers [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [12] 巫祖烈,徐秀霞,刘亮,等. 防撞吸能材料金属泡沫铝压缩及吸能性能试验研究[J]. 交通科技, 2008, (4): 74-77.  
Wu Zulie, Xu Xiuxia, Liu Liang, et al. Experimental research on the compressive behavior and energy absorbing capability of foam Aluminum [J]. Transportation Science and Technology, 2008, (4): 74-77.
- [13] 王东坡,李伟,何思明,等. 泡沫铝夹芯板加固山区跨泥石流桥墩抗冲结构优化研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(10): 108-114.  
Wang Dongpo, Li Wei, He Siming, et al. Structural optimization of aluminum foam sandwich panel for bridge pier reinforcement across debris flow in mountain areas [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(10): 108-114.
- [14] 钟伟. 车-桥墩水平碰撞模型试验与数值研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.  
Zhong Wei. The model experiment and numerical research of vehicle-bridge pier under horizontal impact [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [15] 中华人民共和国交通部. JTG D60-2015, 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D60-2015, General specifications for design of highway bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [16] 陈建林,李旭东,刘凯欣. 素混凝土本构模型参数的实验研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 44

- (5): 689-694.  
Chen Jianlin, Li Xudong, Liu Kaixin. Experimental research on parameters of constitutive model for a cement mortar [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2008, 44(5): 689-694.
- [17] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.  
Wang Xinmin. Numerical Analysis of Engineering Structure by ANSYS[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [18] 王永刚, 胡时胜, 王礼立. 爆炸荷载下泡沫铝材料中冲击波衰减特性的实验和数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, (6): 516-522.  
Wang Yonggang, Hu Shisheng, Wang Lili. Shock attenuation in aluminum foams under explosion loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, (6): 516-522.
- [19] 李宗岷, 杨旭东, 胡 琪, 等. 泡沫铝的低速冲击吸能性能[J]. 热加工工艺, 2019, 48(20): 29-33.  
LI Zongmin, YANG Xudong, HU Qi, et al. Low velocity impact energy absorption properties of aluminum foams [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(20): 29-33.
- [20] AASHTO LRFD Bridge Design Specification [M]. SI Units 3rd ed. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004.
- [21] BS EN 1991-1-7 Eurocode 1: Actions on Structures-Part 1-7 [S]. General Actions-Accidental Actions. BSI, 2003.
- [22] 周晓宇, 马如进, 陈艾荣. 钢筋混凝土柱式墩落石冲击抗剪性能可靠性分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(07): 262-270.  
Zhou Xiaoyu, Ma Rujin, Chen Airong. Anti-shear reliability analysis for a reinforced concrete column subjected to rockfall impact [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(07): 262-270.

## Dynamic response characteristics of the bridge piers with aluminum foam anti-collision devices under vehicle impact

ZHANG Yu-ye, PAN Rui-yang, JIANG Dong-qi

(Department of Civil Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** For the case of vehicle impacting on bridge piers, a new anti-collision device made of aluminum foam for bridge piers is presented in this paper. The three-dimensional solid element models of piers with and without the anti-collision device are built by using the LS-DYNA software. The dynamic time-history responses of piers under vehicle impact are investigated. The impact force of the vehicle, the displacement and stress of the bridge piers in two situations are compared. The energy dissipation capacity of the anti-collision device and the vehicle damage severity are analyzed from the perspective of energy transmission. It is shown that the impact force, pier displacement and stress of the pier could be significantly reduced with the proposed anti-collision device. Most of the energy during the impact process is absorbed by the device. The aluminum foam anti-collision device can protect the pier and the vehicle at the same time. The research outcome can provide guidance for the future study in the field of vehicle and bridge collision problem and bridge piers anti-collision design.

**Key words:** bridge pier; vehicle impact; dynamic response; aluminum foam; anti-collision device

**作者简介:** 张于晔(1986-),男,副教授。电话:(025)84315773;E-mail:zyy@njjust.edu.cn