

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.01.006

桥墩柔性防撞装置设计及数值分析

王彪¹, 刘军^{1*}, 杨帅²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 中国汽车技术研究中心, 天津 300300)

摘要:针对国内外对于车—桥碰撞的研究较少,而且大多属于对桥墩防撞的研究,对车和乘员保护的研究更少的问题,在我国自主研发的船—桥碰撞柔性吸能防撞装置的基础上,对公路高架桥墩柔性防撞装置进行了设计研究。采用有限元仿真的方法(基于 Pro-E 建模、Hyper-Mesh 前处理、LS-DYNA 仿真计算)模拟了小车以速度为 80 km/h,碰撞角度为 90° 正面高速碰撞城市高架桥墩以及模拟了小车以速度为 60 km/h,碰撞角度为 20° 碰撞带有防撞装置的城市高架桥墩。提出了从车辆行驶轨迹、车辆 B 柱加速度、系统能量以及碰撞表面的撞击力 4 个方面来系统研究防撞装置在碰撞中的吸能、缓冲及导向作用,并设计了一种新型桥墩柔性防撞装置。仿真结果表明:设置防撞装置后,高速正面碰撞时撞击力由 1 700 kN 减小到 1 000 kN,满足《公路桥涵设计通用规范》的要求,验证了该装置对桥墩和乘员的保护能力。低速偏置碰撞时防撞装置能引导车辆以一定车速回到原车道,验证了该装置对车的保护作用。

关键词:柔性防撞;有限元;保护;导向

中图分类号:TH122;U412.36

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)01-0030-07

Flexible anti-collision device design and numerical analysis on viaduct pier

WANG biao¹, LIU Jun¹, YANG Shuai²

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. China Automobile Technology and Research Center, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the less research for cars and bridge collision, the research were mostly for anti-collision pier, and research for vehicle and occupant protection were least, flexible anti-collision device on urban viaduct pier were studied based on our self-developed boat-bridge flexible energy absorption anti-collision device. Finite element simulation method (built model by Pro-E, Pretreatment by Hyper-Mesh, simulated by LS-DYNA) were used to simulate the car with speed of 80 km/h, the collision angle of 90° positive high-speed collision of urban viaduct pier. Simultaneously, simulation model which a car at the speed of 60 km/h, the collision angle for urban viaduct pier is 20° crashed with anti-collision device were built, too. In order to study anti-collision device in the collision energy absorption, cushioning and guiding role, 4 indicators, vehicle's trajectory, acceleration of the B-pillar, energy and the collision impact force, were put forward to assess the effect of device, meanwhile a new flexible anti-collision device was designed. The result indicate that when the car positive high-speed crashed with urban viaduct pier the impact force is reduced by a 1 700 kN to 1 000 kN, to meet the "General Specification for Highway Bridge Design" requirements after setting the anti-collision device and when the car side low-speed crashed with urban viaduct pier the anti-collision device can guide the vehicle at a constant speed back to the original lane.

Key words: flexible crash; finite element method(FEM); protection; guide

收稿日期:2015-08-27

作者简介:王彪(1989-),男,河南周口人,主要从事汽车被动安全方面的研究. E-mail:wb15139975536@126.com

通信联系人:刘军,男,副教授,硕士生导师. E-mail:liujun@nbu.edu.cn

0 引言

随着我国经济的发展,汽车的保有量和为缓解交通压力的城市高架道路都急剧增加,因而造成汽车撞击桥墩的事故概率也明显增加,这类事故轻者造成汽车的损坏和乘员的受伤,严重时造成桥墩倒塌、车毁人亡的重大交通事故,带来无可挽回的生命和财产损失^[1]。高架路桥墩传统的防撞措施,一般采取加大桥墩结构尺寸,把桥墩底部浇筑成一个大体积混凝土实体承台,或采用钢管围栏等措施,这些方法存在着“不是占地空间大、影响道路通行面积,就是碰撞刚度过大^[2]而使得失控车辆过度损坏”的缺点。同时,对司乘人员的安全隐患并未认真考虑。另一方面,国内外对跨海大桥桥墩防船撞的研究已经取得了一些行之有效的成果。这些措施不但能保护桥梁还能保护碰撞的船舶。其中最有效的是刚柔相济的设计理念。宁波大学机械工程与力学学院按照这种思想设计了用于桥碰撞的新型柔性防撞装置^[3],并且已经成功应用到宁波象山港公路大桥等国内多座跨海大桥上。其核心是采用刚-柔-刚结构,外层采用刚性结构。当受到撞击时外层构件整体做刚性移动,带动中间柔性单元(防撞圈)变形,起到隔断冲击波、从而达到减少撞击力的效果,可使失控车辆有时间和空间转向,实现减小桥梁、车辆和人员的伤害。

本研究提出的柔性吸能导向防撞装置是通过关键元件的变形来耗散碰撞能量,将瞬间冲击能量进行吸收和转移。在设置柔性吸能导向防撞装置的情况下,该装置可有效保护城市高架桥梁在车速较高冲击下自身结构安全,在车速较低时既能保护司乘人员,又能对车辆本身进行良好的保护。由于防撞装置空间经济型的限制,内部空间非常有限,为了使整个构件在碰撞时按设定的模式发生形变,需要对构件的几何尺寸形状进行合理地设计,使耗能构件既能发生可控的变形以吸收能量,又能保证其在设计的工况下不发生过大的塑性变形导致断裂失效。

1 防撞装置设计

桥墩柔性吸能导向防撞装置主体由3部分构成:外箱梁、橡胶弹簧圈、内板梁。外圈设置成箱体的作用主要是为了增加其刚度,减少其变形,使外箱梁受到撞击后会产生一个整体位移,使得前段弹簧圈受压,后端弹簧圈受压,这样所有的橡胶弹簧圈都能起到整体吸能作用,因而大大提高了装置的吸能效率。外箱梁在

承受汽车撞击后,连接内外梁的弹簧圈提供一个低应力长线程的位移响应,把撞击力传递给内板梁,并最终由内板梁将应力传递给与其紧靠的桥墩上。由于有桥墩的支撑作用,对内圈的刚度要求降低,故内圈设计成钢板即可。通过加设柔性吸能导向防撞装置,桥墩、汽车承受的撞击力远低于车桥直接相撞。同时本研究把装置设计成椭圆形,在汽车以小角度撞击防撞装置时,椭圆形状对汽车又起到了很好的导向作用,汽车在撞击到防撞装置后,被装置以一定的角度拨开,汽车的一部分动能也被带走,对桥墩、司乘人员和汽车都起到了很好的保护作用。

在参考了宁波大学关于船—桥相撞桥墩柔性防撞装置^[4](该装置如图1所示)的设计经验并在大量的有限元计算机仿真试验的基础上,笔者提出了公路桥墩柔性吸能导向防撞装置结构如图2所示。经调研发现,桥墩直径一般为1.2 m左右,这里取1.2 m。考虑防撞装置太大占地空间大,影响道路通行,太小又不能满足吸能要求,这里取椭圆柔性吸能导向防撞装置的内板梁的长轴长1.5 m,短轴长1.2 m。外箱梁的长轴长2.0 m,短轴长1.7 m。橡胶弹簧圈的直径为0.025 m。本研究中汽车撞击的位置(计算的高度)取1.2 m。橡胶弹簧圈沿桥墩轴向设置3层(若设置两层,只能放置在靠近两端的位置,中间由于是车辆撞击位置而容易造成损坏,若设置4层装置整体将会偏硬,经仿真验证达不到理想的吸能效果),中间层橡胶圈放置在防撞装置沿桥墩轴向的中间位置,相邻两层之间的间距是0.4 m。每层均匀分布16个橡胶弹簧圈(保证在完全压紧的情况下相邻橡胶圈之间不会产生干涉),橡胶圈采用纵向和横向交叉放置,这样既能减



(a) 外观图



(b) 细节图



(c) 实船碰撞侧视图



(d) 实船碰撞侧视图

图1 浙江象山港跨海大桥新型柔性防撞装置

少碰撞过程中外圈的晃动,又能使其受力更均匀。当小车以很高车速与防撞装置相撞时,在碰撞接触部位极易产生变形。同时外层构件必须整体做刚性移动,因此防撞装置的外圈设计成箱体,内圈经过了弹簧橡胶圈的缓冲作用受力较小,设计成钢板结构即可。

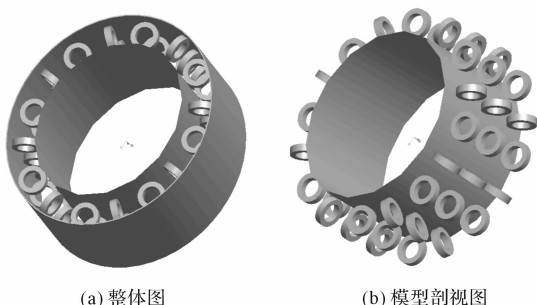


图2 柔性吸能导向防撞装置三维视图

当车辆撞到防撞装置上时,装置需要提供很好的柔性(即保证外圈能够产生足够的位移),这种柔性由防撞圈提供。防撞圈一般由钢丝绳圈或者橡胶圈构成。单个防撞圈的试验与理论模型的力—位移曲线^[5]如图3所示。

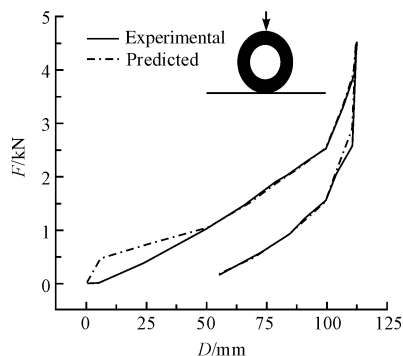


图3 直径 250 mm 防撞圈压缩力—位移实验与理论曲线

其中试验数据来自于防撞圈的压缩试验,理论模型采用 ZWT 模型^[12]。应力应变关系式为:

$$\sigma = \int e(\varepsilon) + E_1 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{\theta_2}\right) d\tau \quad (1)$$

式中: σ —应力, ε —应变, $\dot{\varepsilon}$ —应变率, t —时间。

积分项描述非线性弹性平衡响应,第一个积分项描述低应变率下的粘弹性响应,和分别是所对应的 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间,而后一个积分项描述高应变率下的粘弹性响应,和则分别是所对应的 Maxwell 单元的弹性常数和松弛时间。

转化为实际计算中需要的力—位移关系(力 F 、位移 Δu 、弹簧系数 K 、加载速度)为:

$$F = K_1(\Delta u) \Delta u + K_1 \int_0^t v(\tau) \exp\left(-\frac{(t-\tau)}{\theta_1}\right) d\tau + K_2 \int_0^t v(\tau) \exp\left(-\frac{(t-\tau)}{\theta_2}\right) d\tau \quad (2)$$

在冲击载荷下则与式(2)相对应地化为:

$$F = K_1(\Delta u) \Delta u + K_2 \int_0^t v(\tau) \exp\left(-\frac{(t-\tau)}{\theta_2}\right) d\tau \quad (3)$$

式中的材料参数可由与柔性防撞圈实测的力—位移试验曲线进行拟合确定。

由于外层箱体和内层钢板之间的防撞圈表现出足够的柔性,车辆推着外侧箱体运动。由防撞圈的力学特性所示:在碰撞的初期,外侧箱体后退时产生的力较小(防撞圈的力—位移曲线有一个较大的低应力平台);撞击后期,当外侧横梁后退一定距离后,防撞圈被压实(防撞圈为空心),作用力会加大(图中防撞圈二次弹性阶段)。由此可知,撞击力能长时间保持在较低作用力下,使事故车辆有足够的时间和空间改变其行驶方向,且车辆的部分动能可保留在车辆上,继续沿外侧箱体向前滑动。这种设计既可缓冲撞击过程,又能防止二次事故的发生。

2 汽车碰撞有限元模型的建立

2.1 柔性防撞装置仿真建模

为了实现防撞圈的数值模拟,本研究采用 4 条粘弹性弹簧来实现与防撞圈相似的力—位移关系,防撞装置仿真模型如图 4 所示。

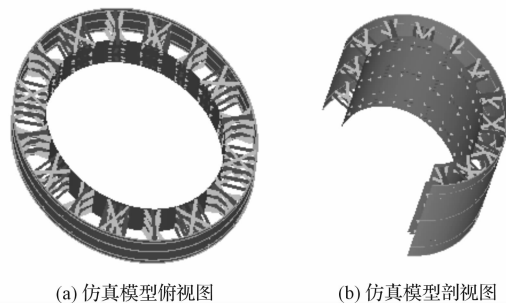


图4 防撞装置仿真模型

在仿真计算中,外箱梁和内板梁的材料均是采用的 * MAT 24 弹塑性材料,其中材料的密度 $\rho = 7.865 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.30$,屈服应力 $\sigma = 298 \text{ MPa}$,剪切模量 $G = 763 \text{ MPa}$,钢板厚度 $h = 10 \text{ mm}$ 。考虑到实际工况中桥墩尺寸的不统一和截面及配筋形式的千差万别,笔者将桥墩设置成刚性体。由于碰撞模型不考虑埋入土层的混凝土被碰撞情况,笔者对地基施加固定约束。笔者用 4 条

对角交叉布置的弹簧来模拟防撞圈各向受力相同,和垂直方向设置的阻尼构成阻尼副一起来模拟橡胶圈。这种模拟橡胶圈的方法在浙江象山港跨海大桥新型柔性防撞装置的设计过程中已经得到了实验验证。

2.2 正面高速碰撞有限元模型的建立

参考国内外护栏等交通安全设施设计规范,以及船——桥相撞防撞装置的研究成果,遵循碰撞能量与带角度碰撞等效的原则^[6],本研究采取正面高速碰撞来测试装置对桥墩的保护性能,采用小角度偏置碰来测试装置对汽车和司乘人员的保护性能。依据文献对车辆撞击桥墩所做的调查和统计,在城市中发生最多的是小轿车撞击桥墩事故,因此本次仿真实验中采用的是已经对标完成的某轿车车型^[7],可以保证车辆模型的精确性,车辆重 1.7 t。正面碰撞速度取 80 km/h,碰撞角度 90°,其碰撞能量为 426 kJ,低于规定的路侧护栏最高标准碰撞能量 520 kJ。为了测试装置对桥墩的保护作用,笔者在正面高速碰撞同时计算了未设防撞装置时汽车与桥墩直接碰撞时的对比工况^[8]。

仿真建模及数据处理采用汽车仿真专用软件 Hyper-Mesh,数值计算采用大型通用有限元计算软件 LS-DYNA 来完成。仿真模型如图 5 所示。

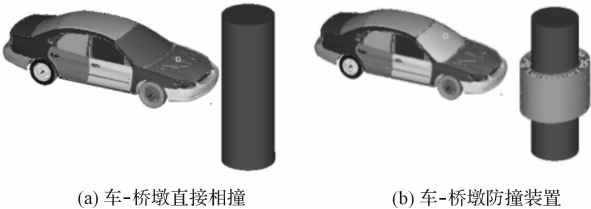


图5 汽车碰撞仿真模型

由于车辆有限元模型已经经过试验验证,本研究对车辆的内部接触不做改动,在模型计算中,防撞装置的接触设置与实际情况相同。为了保证计算的精度,该模型中对沙漏能量进行了合理的控制^[9]。

2.3 低速小角度偏置碰撞有限元模型的建立

由于城市桥墩附近汽车的限速一般不超过60 km/h,本研究对小角度偏置碰汽车速度也取 60 km/h。根据调查国内外各公路路段的碰撞角度一般在 15°~20°^[10],计算中选取的是 20°。其他仿真模型的参数设置与车—桥防撞装置仿真模型相同。小角度偏置碰撞有限元模型如图 6 所示。

3 仿真结果分析

3.1 正面高速碰撞仿真结果对比分析

3.1.1 碰撞系统能量分析

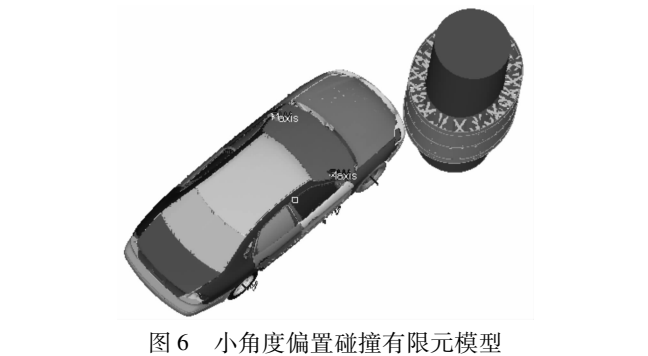


图6 小角度偏置碰撞有限元模型

正面高速碰撞过程中的能量转化曲线如图 7 所示。

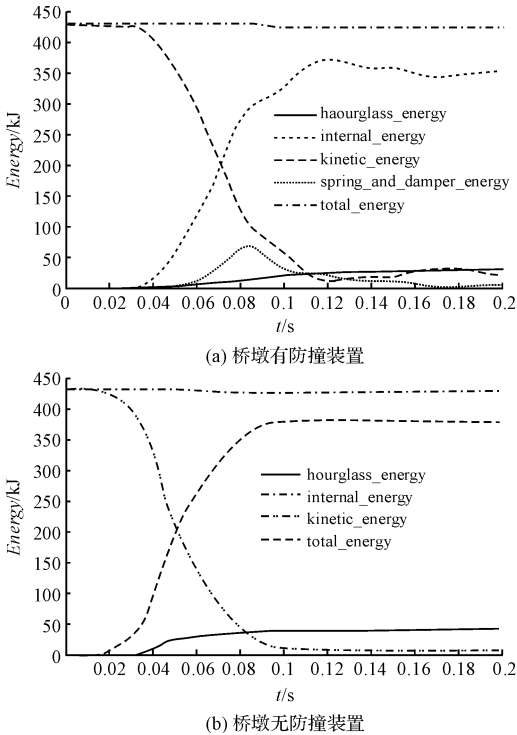


图7 能量转化曲线

由图 7 可知,系统总能量为 426 kJ,沙漏能量小于总能量的 5%,仿真结果准确。本研究设置防撞装置的桥墩在 0.08 s 左右,防撞圈明显有一个吸能的过程,由动能转化的系统内能减少。因为系统内能主要由汽车变形来吸收,汽车变形也将减小,对司乘人员起到了一定的保护作用。

3.1.2 碰撞过程中撞击力的分析

正面高速碰撞过程中汽车与桥墩、汽车与防撞装置接触力曲线对比如图 8 所示。

由图 8 易知,安装防撞装置后,汽车与防撞装置的撞击力比汽车直接与桥墩相撞的撞击力明显减小,由 1 700 kN 减小到 1 000 kN。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)的第 4.4.3 条规定:“桥梁结构必要时可考虑汽车的撞击作用。汽车撞击力的标准

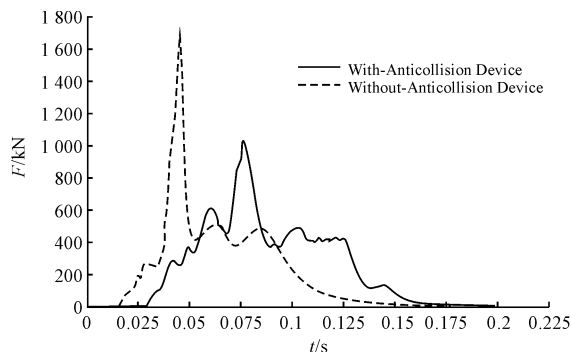


图 8 汽车与防撞装置接触力曲线

值在汽车行驶方向上取 1 000 kN,在行驶方向的垂直方向上取 500 kN,在两个方向的撞击力不同时考虑^[11],撞击力作用于行车道上 1.2 m 处”。针对易发生碰撞事故的市政桥梁,由仿真结果可知,桥梁设计人员无需对桥墩防撞做特殊设计,正常安装该柔性细吸能导向防撞装置完全可以保证桥梁结构的安全。

3.1.3 碰撞过程中汽车 B 柱加速度分析

正面高速碰撞过程中,有无防撞装置时汽车 B 柱加速度曲线对比如图 9 所示。

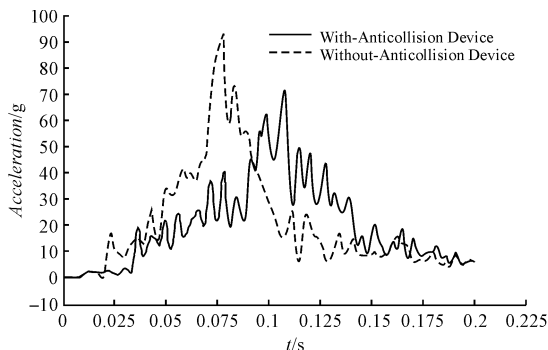


图 9 汽车 B 柱加速度曲线

由图 9 可知,添加防撞装置后 B 柱的加速度峰值明显减小,由 93 g 减小到 71 g。说明该装置在正面高速碰撞情况下能够对车和行人起到一定的保护作用。

3.1.4 碰撞过程汽车运行轨迹分析

正面高速碰撞过程中汽车不同时刻运行轨迹如图 10 所示。

由图 10 易知,添加防撞装置后汽车的变形量明显减小,防撞装置起到了很好的吸能作用。但是汽车的变形量仍然很大,导致司乘人员的生产空间很小。所以,即使在有防撞装置的情况下,高速碰撞也很难保证司乘人员的安全。

3.2 低速小角度偏置碰撞仿真结果分析

3.2.1 碰撞系统能量分析

碰撞系统能量转化曲线如图 11 所示。

由图 11 易知,碰撞系统的总能量为 242 kJ,0.08 s

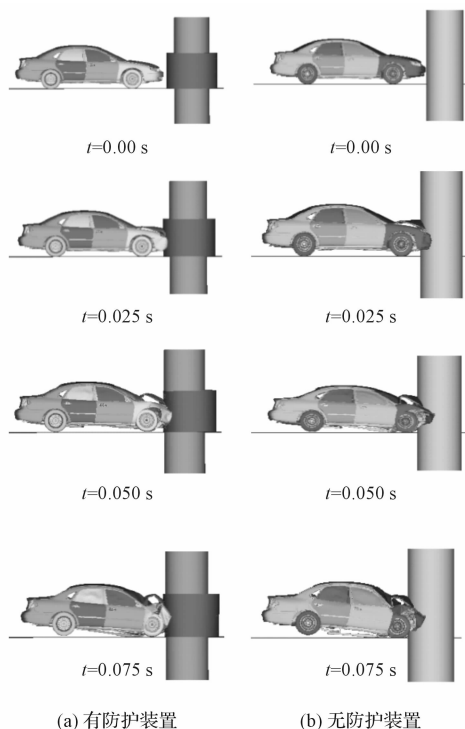


图 10 汽车运行轨迹图

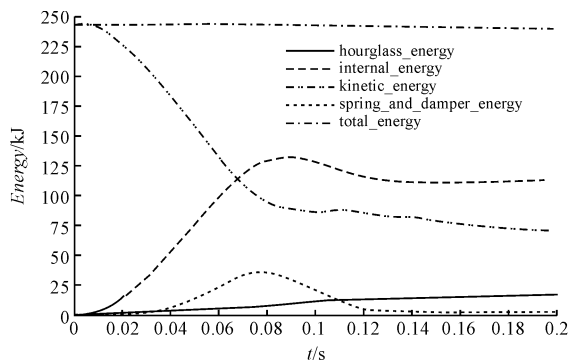


图 11 碰撞系统能量转化曲线

左右,橡胶圈吸能达到最大,系统动能降至最低,之后在 80 kJ 左右趋于稳定。而不是降至 0 kJ,结合仿真动画可以知道,汽车并没有在碰撞中停止,而是以 35 km/h 的速度继续向前运动。即该装置起到了很好的导向、吸能作用。

3.2.2 碰撞过程中撞击力的分析

碰撞过程中汽车与防撞装置的接触力如图 12 所示。

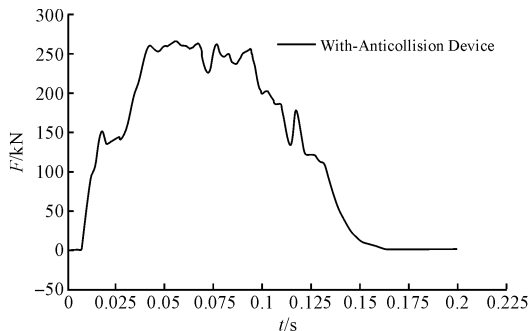


图 12 汽车与防撞装置的接触力

由图 12 易知,汽车与防撞装置的接触力峰值为 265 kN 远远小于 1 000 kN,说明在设计阶段无需对桥墩做特殊设计。接触力峰值在 0.04 s ~ 0.095 s 出现一个平台,之后逐渐下降为 0 kN。说明汽车在这段时间受到一个恒定大小的外力,这样有利于司机驾驶汽车的稳定,在装置的导向作用下回到正常的行驶轨道,防止二次碰撞事故的发生。

3.2.3 碰撞过程中汽车 B 柱加速度分析

汽车与桥墩碰撞过程中,汽车和司乘人员都会受到冲击加速度的作用,一般研究者用汽车 B 柱的加速度大小来评价碰撞过程中汽车的安全性。汽车 B 柱的加速度曲线如图 13 所示。

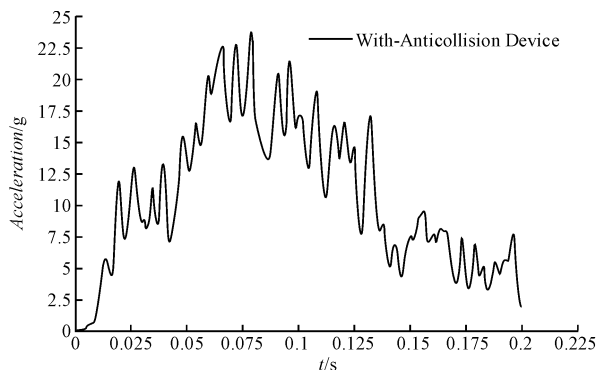


图 13 汽车 B 柱加速度曲线

由图 13 易知,汽车 B 柱加速度峰值为 24 g,而对于 A、B 级轿车来说,一般认为在碰撞过程中 B 柱的加速度峰值小于 30 g 都是安全的,而且越小越好。所以,桥墩在添加该防撞装置后,碰撞中能够保证司乘人员的安全。

3.2.4 碰撞过程汽车运行轨迹分析

汽车在碰撞过程中的运行轨迹如图 14 所示。

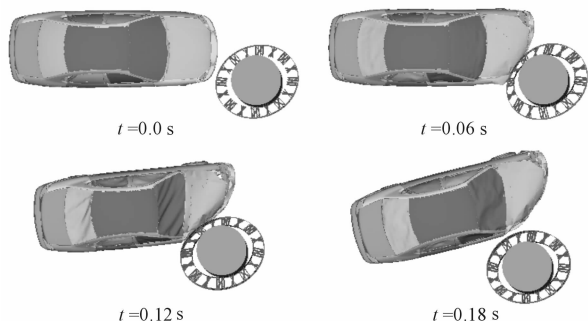


图 14 汽车运行轨迹图

由图 14 易知,汽车在碰到防撞装置后,防撞装置被压缩,吸收部分碰撞能量。汽车以一定的速度沿着与防撞装置接触的切线方向继续向前运动,经过一段距离之后重新回到运行轨道上,装置起到了很好的导向作用。所以,在低速小角度偏置碰撞下,

该柔性吸能导向防撞装置能够对桥墩、车辆及其司乘人员起到很好的保护作用(由于车辆碰撞速度较高,在仿真计算时玻璃容易在计算中出现错误,笔者在不影响计算结果的前提下对车窗玻璃刚度进行了适当的弱化处理)。

4 结束语

本研究针对国内外对于车—桥碰撞的研究较少,而且大多属于对桥墩防撞的研究,对车和乘员保护的研究更少的问题,在我国自主研发的船—桥碰撞柔性吸能防撞装置的基础上,对公路高架桥墩柔性防撞装置进行了设计研究,得到如下结论:

(1)汽车—桥墩以速度为 80 km/h,碰撞角度为 90°正面高速碰撞时,没有防撞装置保护情况下,汽车的变形量很大,车辆严重受损,司乘人员生命安全受到威胁。汽车对桥墩的撞击力也很大,桥墩易受损。

(2)汽车—桥墩以速度为 80 km/h,碰撞角度为 90°正面高速碰撞时,设置防撞装置保护情况下,该柔性吸能导向防撞装置能够起到很好的吸能作用,延长碰撞时间,降低撞击力,保证桥墩的安全。减小车身变形,增大司乘人员的生存空间,对司乘人员起到一定的保护作用。其中最重要的作用是保护桥墩,避免在高速碰撞下出现桥墩坍塌事故,造成严重的生命财产损失。

(3)小车以速度为 60 km/h,碰撞角度为 20°碰撞带有防撞装置的城市高架桥墩时,该柔性吸能导向防撞装置突出特点是导向作用,椭圆形的设计能够使汽车沿着接触面的切线方向滑过,这样不仅保留了车辆一部分的动能,大大降低碰撞造成的破坏,而且由于撞击力在很长时间内基本稳定,车辆有足够长的时间回到正常的行驶轨道,防止二次碰撞事故的发生。

致谢

本论文得到浙江省近海结构冲击安全防护与健康创新团队支持,特此感谢。

参考文献(References):

- [1] 流明慧,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.
- [2] 徐东丰. 泡沫铝防护装置在桥墩防撞的应用研究[D]. 重庆:重庆交通大学土木建筑学院,2006.
- [3] 杨黎明,陈国虞,周风华,等. 象山港公路大桥主桥柔性防撞装置方案研究(研究总结报告)[M]. 宁波:象山港大桥内部资料,2009.

- [4] 张海明,曹映泓,段乃民,等. 湛江海湾大桥主墩防撞设施结构设计[J]. 中外道路,2006,26(5):82-84.
- [5] 王礼立,张忠伟,黄德进,等. 船撞桥的钢丝绳圈柔性防撞装置的冲击动力学分析[R]. 北京:中国科学院力学研究所,2004.
- [6] 张建强,刘伟庆,方海,等. 设置新型复合材防撞装置的车—桥碰撞数值模拟[J]. 中外公路,2011,31(6):200-205.
- [7] The National Crash Analysis Center. Extended validation of the finite element Model for the 2001Ford Taurus passenger Sedan NCAC 2012-W-004[EB]. [2014-07-01]. <http://www.ncac.gwu.edu/vml/archive/ncac/vehicle/Website/TaurusBL/NCAC-2012-W-004.pdf>
- [8] 葛胜锦,彭泽友,熊志华,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):4.
- [9] 陆勇,曹立波. 对汽车撞柱的仿真研究[J]. 农业装备与车辆工程,2006(1):28-31.
- [10] 交通部公路科学研究院. JTG/T D81-2006. 公路交通安全设施设计细则[S]. 北京:人民交通出版社,2006.
- [11] 彭勃阳. 桥墩-车辆撞击力的实验研究与仿真分析[D]. 北京:北京交通大学土木建筑学院,2013.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

王彪,刘军,杨帅. 桥墩柔性防撞装置设计及数值分析[J]. 机电工程,2016,33(1):30-36.

WANG biao, LIU Jun, YANG Shuai. Flexible anti-collision device design and numerical analysis on viaduct pier[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(1):30-36.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

(上接第 17 页)

- [22] Jürgen Maas, CHRISTIAN G. Dielectric elastomers for hydro power harvesting[J]. **Smart Materials and Structures**,2012,21(6):0640061-06400612.
- [23] MCKAY G T, ROSSET S, Anderson A I, et al. Dielectric elastomer generators that stack up[J]. **Smart Materials and Structures**,2015,24(1):15014-15021.
- [24] VERTECHY R, PAPINI R P G, FONTANA M. Reduced model and application of inflating circular diaphragm dielectric elastomer generators for wave energy harvesting[J]. **Journal of Vibration and Acoustics**, 2015, 137(1):0110161-0110169.
- [25] SAMUEL R, BENJAMIN M O' B, TODD G, et al. Self-sensing dielectric elastomer actuators in closed-loop operation[J]. **Smart Materials and Structures**, 2013, 22(10):1040181-10401810.
- [26] FOLLADOR M, TRAMACERE F. Dielectric elastomer actuators for octopus inspired suction cups[J]. **Bioinspir Biomim**,2014,9(4):0460021-04600210.
- [27] CARPI F, FREDIANI G, GERBONI C. Enabling variable-stiffness hand rehabilitation orthoses with dielectric elastomer transducers[J]. **Medical engineering and physics**,2014, 36(2):205-211.
- [28] THANH-GIANG L, GIH-KEONG L, LI-LYNN S, et al. Muscle-like high-stress dielectric elastomer actuators with oil capsules[J]. **Smart Materials and Structures**,2014, 23(10):1050061-10500610.
- [29] MIYAZAKI T, OSAWA H. 2007 Search report of wave power devices Proc. 2007 Spring Conf[R]. Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers,2007,43-6.
- [30] 陈明,林桂娟,宋德朝. 电活性聚合物微型发电机[J]. 光学精密工程,2010,18(11):2413-2420.
- [31] 章永华,马记,何建慧,等. 基于人工肌肉的仿生鱼关节机构设计与力学分析[J]. 机器人,2006,28(1):40-44.
- [32] NGUYEN C H, Vuong N H L, Kim D S, et al. Design and Control of a Multi-jointed Robot Finger Driven by an Artificial Muscle Actuator[J]. **Advanced robotics; the international journal of the Robotics Society of Japan**, 2010,24(14):1983-2003.

[编辑:李 辉]