

基于刚度匹配的桥梁防撞装置技术研究及应用

廖福勇¹, 王永峰², 贾小龙³

(1. 广西交通投资集团有限公司, 广西 南宁 530022; 2. 中交第一公路勘察设计院有限公司;

3. 西安中交土木科技有限公司)

摘要:针对车—桥碰撞问题,进行桥梁防撞装置的关键技术研究。依据正交试验法,采用有限元动力学仿真软件 Ls-dyna,进行多种典型工况下防撞装置性能研究。结果表明:基于刚度匹配原理设计的防撞装置可以明显削减车辆撞击力荷载;防撞装置结构设计刚度应根据道路实际通行情况不同而不同。

关键词:桥梁防撞装置;刚度匹配;有限元仿真

随着社会经济的快速发展,交通运输网络日益发达,汽车保有量也随之大幅增长。与此同时,车辆撞击路侧或中央分隔带中跨线桥桥墩的事故也时有发生,严重威胁道路交通安全。针对车—桥碰撞问题,开展桥梁防撞装置技术研究,具有重要的现实意义。

目前,国内外有关桥梁防撞装置技术研究相对较少,相关学者采用仿真及试验研究方法,将新材料引入防撞装置研究,并取得了一定的研究成果。文献[1]将泡沫铝材料应用于防撞装置,通过仿真及试验研究分析其抗冲击效果;文献[2]设计夹芯层结构复合材料防护装置,通过数值模拟方法对其抗撞效果进行分析;文献[3]通过对耗能结构与材料研究,设计出一种新结构防撞装置,并进行其耗能效果分析。车—桥碰撞问题受碰撞车辆类型、撞击速度、撞击角度等多种因素影响,上述文献通过铁球、混凝土块或简化车架等代替车辆进行模拟分析,其与实际情况相差较大,且分析工况单一,很难得出防撞装置在不同碰撞条件下的耗能防护效果。

该文基于刚度匹配原理进行桥梁防撞装置设计,采用有限元动力学仿真软件 Ls-dyna,建立车辆和防撞装置有限元模型,进行多种典型工况下防撞装置性能研究,以指导防撞装置结构设计。

1 防撞基本理论

1.1 防撞机理

借鉴桥梁防船撞的成熟技术,桥梁防撞撞的基本设防思想也分为耗能和缓冲两个方面。

耗能防撞机理,其主要依靠防撞装置的耗能结构及耗能材料的变形破坏来吸收、分散撞击能量,依据能量守恒定律:

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \quad (1)$$

式中: E_1 、 E_2 、 E_3 分别为车辆、防撞装置及桥墩的变形耗能; E_4 为摩擦耗能; E_5 为汽车残余动能。

缓冲防撞机理,其依靠可恢复的弹性变形来转化撞击能量,延长撞击时间,其理论依据为冲量定理:

$$Mv = Ft \quad (2)$$

式中: M 为车辆质量; v 为撞击速度; F 为撞击力; t 为撞击时间。

1.2 碰撞简化模型

考虑设防,车桥碰撞过程中,车辆、桥墩、防撞装置三者的刚度是影响撞击力的重要因素。桥墩刚度较大,撞击过程中变形微小,可假定桥墩是刚性的。同时,相关文献研究表明,碰撞过程发生在一瞬间,阻尼对其影响甚微,可忽略不计。则碰撞过程可以简化为一维二自由度弹簧—质量模型,如图1所示。

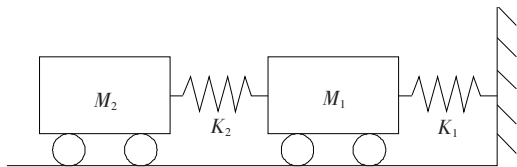


图1 碰撞过程简化力学模型

图1中,防撞装置质量为 M_1 ,变形刚度为 K_1 ;车辆质量为 M_2 ,车头局部变形刚度为 K_2 。

根据达朗贝尔原理,建立车辆—防撞装置系统动

力学方程如下:

$$\begin{cases} M_1\ddot{x}_1+K_1x_1-K_2(x_2-x_1)=0 \\ M_2\ddot{x}_2+K_2(x_2-x_1)=0 \end{cases} \quad (3)$$

$$|t=0,x_1=x_2=0,\dot{x}_1=0,\dot{x}_2=v_0$$

可求解出撞击力为:

$$F(t)=\frac{K_2v_0}{B_2-B_1}\left[\frac{B_1-1}{\omega_1}\sin(\omega_1t)-\frac{B_2-1}{\omega_2}\sin(\omega_2t)\right] \quad (4)$$

式中: B_1 、 B_2 为振幅比,按下式计算:

$$\begin{cases} B_1=\frac{K_2+K_1-M_1\omega_1^2}{K_2} \\ B_2=\frac{K_2+K_1-M_1\omega_2^2}{K_2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω_1 、 ω_2 为系统自振频率,按下式计算:

$$\begin{aligned} \omega_{1,2}^2= \\ \frac{1}{2}\left[\left(\frac{K_1+K_2}{M_1}+\frac{K_2}{M_2}\right)\pm\sqrt{\left(\frac{K_1+K_2}{M_1}+\frac{K_2}{M_2}\right)^2-4\frac{K_1K_2}{M_1M_2}}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

通过以上公式可以较精确地计算出撞击力,同时为防撞装置的刚度合理选择提供理论依据。

1.3 刚度匹配原理

刚度是指物体抵抗弹性变形的能力,是物体弹性变形难易程度的表征。刚度越大,物体抵抗变形的能力越强,反之越弱。

在上述碰撞系统简化模型中,设其等效刚度为 K ,则 K 与 K_1 、 K_2 有如下关系:

$$\frac{1}{K}=\frac{1}{K_1}+\frac{1}{K_2} \quad (7)$$

由式(7)可得:

$$K=\frac{K_1K_2}{K_1+K_2}=\frac{K_2}{1+\frac{K_2}{K_1}} \quad (8)$$

令防撞装置变形刚度 K_1 与车头局部变形刚度 K_2 的刚度比 $\frac{K_1}{K_2}=\alpha$,则式(8)可化简为:

$$K=\frac{\alpha}{\alpha+1}K_2 \quad (9)$$

由式(9)可见: K_2 一定时,系统刚度的大小转化为 α 的取值问题。系统刚度是决定撞击力大小的重要因素,为减小车辆撞击力,提升车辆被动安全性,防撞装置变形刚度 K_1 不应大于车头局部刚度 K_2 ,即 $\alpha\in(0,1]$ 。

理论上, K_1 越小,车辆撞击力衰减就越多,防撞

装置耗能就越多,防撞效果就越好。同时,防撞装置整体结构变形也越大,不可避免地造成防撞装置的规模越大,经济性、适用性降低。

2 防撞装置结构设计

结合刚度匹配原理,从以下两方面考虑防车撞装置的设计:

(1) 通过调节壳体板材厚度,隔板布置间距以及填充材料空隙率,达到防撞装置整体刚度与车头局部刚度匹配,保证撞击过程中以防撞装置的变形耗能为主,即满足上述理论中 $\alpha\in(0,1]$ 。

(2) 通过不同刚度材料组合,实现装置的先缓冲后耗能的多级耗能模式。装置外层采用柔性材料作为缓冲层(变形刚度 k_1),钢质壳体及隔板(变形刚度 k_2)组成防撞箱体,并填充耗能闭孔芯材(变形刚度 k_3)作为主体耗能层,3 层结构刚度关系为 $k_3<k_1<k_2$ 。

根据实际需求,结合相关经验,确定适用于圆形桥墩的防撞装置常规结构如图 2 所示。

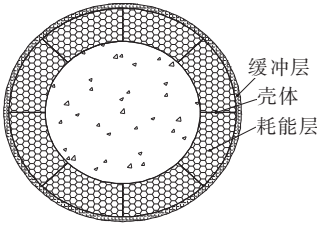


图 2 防撞装置结构示意图

3 仿真分析

3.1 有限元模型建立

根据防撞装置的结构设计图纸建立其几何模型并进行有限元网格划分。建模过程中,桥墩结构定义为刚体,即不考虑桥墩塑性变形,其目的在于重点探讨车辆撞击力及防撞装置变形耗能特性。车模型选用东风卡车和道奇 Neon 小车。有限元模型相关参数见表 1。所建立有限元模型如图 3~6 所示。

表 1 有限元模型参数

项目	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/MPa	泊松比	单元类型
缓冲层	1 100	30	0.49	Solid164
壳体	7 850	206 000	0.30	Shell163
耗能层	50	15	0.11	Solid164

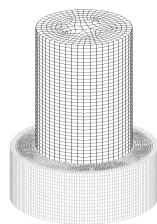


图 3 桥墩及防撞装置整体有限元模型

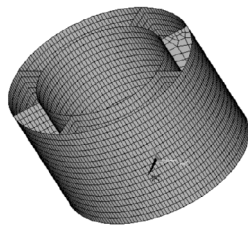


图 4 防撞装置壳体有限元模型

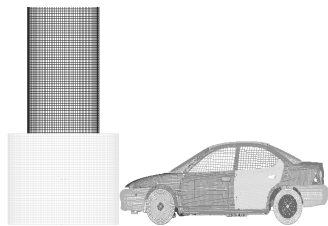


图 5 1.5 t 小车有限元碰撞模型

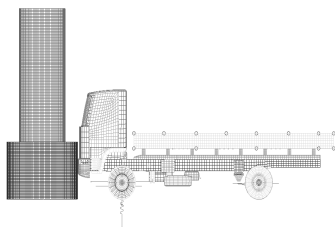


图 6 10 t 卡车有限元碰撞模型

3.2 计算工况

综合防撞装置的壳体板材厚度、隔板间距两个影响结构刚度的主要设计参数,依据正交试验法,进行不同车型、不同车速等多种典型工况下的仿真计算。通过车辆正撞(0°)裸墩和防撞装置两种状态对比分析,指导防撞装置结构设计,具体计算工况如表 2、3 所示。

3.3 计算结果分析

对上述不同工况进行仿真计算,提取撞击力时程曲线进行分析。图 7 为壳体厚度 4 mm、隔板间距 300 mm 结构参数组合下各工况撞击力时程曲线,其余工况计算结果见表 4。

由图 7、表 4 可以看出:不同工况下,撞击力相差较大。与裸墩撞击相比,增设防撞装置后,撞击力峰值明显减小,且峰值到达时间延迟。

表 2 正撞裸墩计算工况

工况	车型	速度/(km·h ⁻¹)
a	1.5 t 小车	40
b	1.5 t 小车	60
c	1.5 t 小车	80
d	10 t 小车	40
e	10 t 小车	60
f	10 t 卡车	80

表 3 正撞防撞装置计算工况

工况	车型	速度/(km·h ⁻¹)	壳体厚度/mm	隔板间距/mm
1	1.5 t 小车	40	4	300
2	1.5 t 小车	40	4	500
3	1.5 t 小车	40	6	300
4	1.5 t 小车	40	6	500
5	1.5 t 小车	60	4	300
6	1.5 t 小车	60	4	500
7	1.5 t 小车	60	6	300
8	1.5 t 小车	60	6	500
9	1.5 t 小车	80	4	300
10	1.5 t 小车	80	4	500
11	1.5 t 小车	80	6	300
12	1.5 t 小车	80	6	500
13	10 t 卡车	40	4	300
14	10 t 卡车	40	4	500
15	10 t 卡车	40	6	300
16	10 t 卡车	40	6	500
17	10 t 卡车	60	4	300
18	10 t 卡车	60	4	500
19	10 t 卡车	60	6	300
20	10 t 卡车	60	6	500
21	10 t 卡车	80	4	300
22	10 t 卡车	80	4	500
23	10 t 卡车	80	6	300
24	10 t 卡车	80	6	500

对小车而言,其速度为 40 km/h 和 60 km/h 时,防撞装置壳体厚度 4 mm、隔板间距 500 mm 这对参数组合下装置有较好的撞击力削减作用,当车速提升

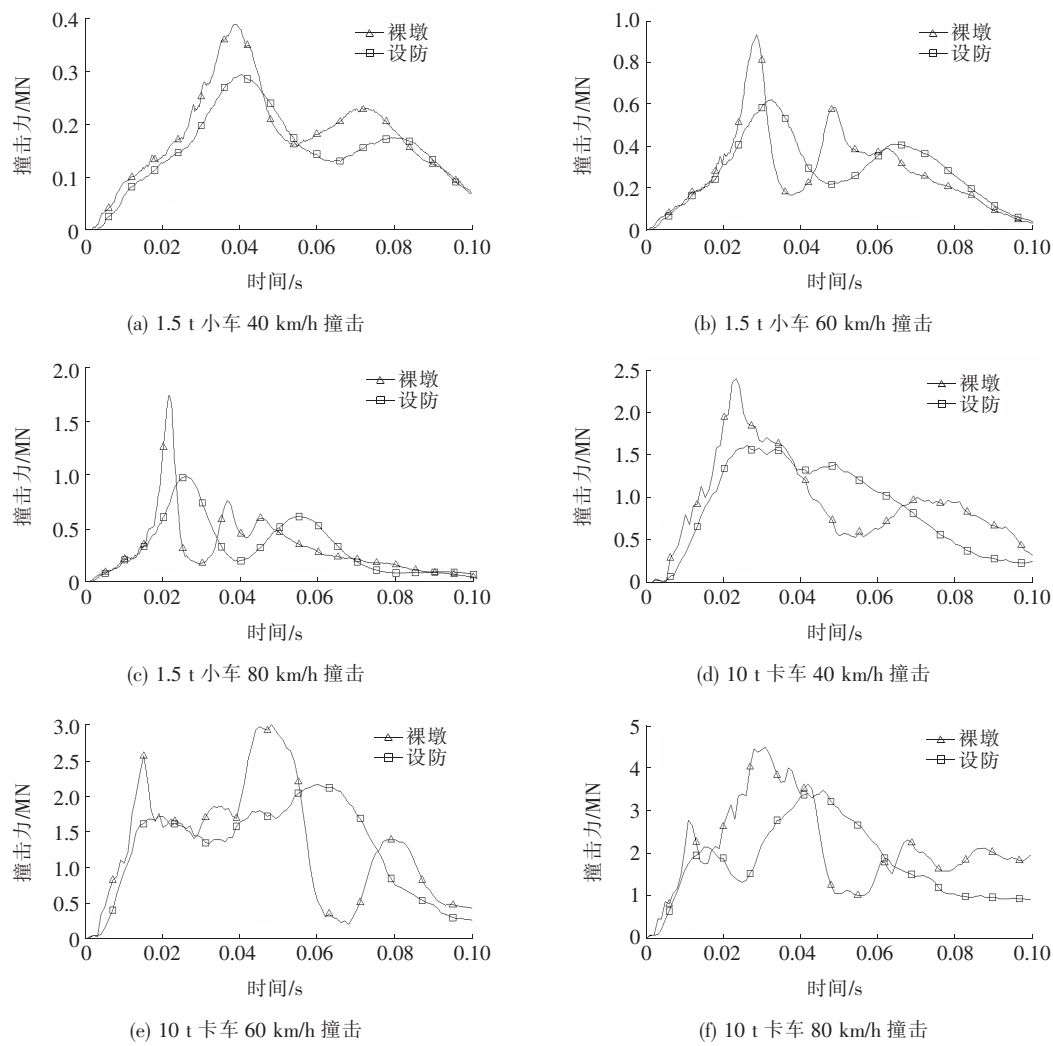


图7 各工况下撞击力时程曲线(壳体厚度4 mm,隔板间距300 mm)

表4 计算结果统计

工况	撞击力峰值/MN		撞击力削减率/%
	撞击裸墩	撞击设防装置	
1	0.40	0.29	27.5
2	0.40	0.25	37.5
3	0.40	0.32	20.0
4	0.40	0.30	25.0
5	0.90	0.60	33.3
6	0.90	0.53	41.1
7	0.90	0.70	22.2
8	0.90	0.65	27.8
9	1.75	1.05	40.0
10	1.75	1.09	37.7
11	1.75	1.24	29.1
12	1.75	1.18	32.6
13	2.41	1.60	33.6
14	2.41	1.65	31.5

续表4

工况	撞击力峰值/MN		撞击力削减率/%
	撞击裸墩	撞击设防装置	
15	2.41	1.80	25.3
16	2.41	1.68	30.3
17	3.00	2.10	30.0
18	3.00	2.16	28.0
19	3.00	2.21	26.3
20	3.00	1.86	38.0
21	4.30	3.30	23.3
22	4.30	3.40	20.9
23	4.30	2.60	39.5
24	4.30	2.77	35.6

到80 km/h时,防撞装置壳体厚度为4 mm、隔板间距为300 mm参数组合下装置撞击力削减效果较好。这说明,小车车头局部刚度较小,在中低速阶段,刚度较

小的防撞装置可发挥良好的缓冲效果,削减撞击力,随着速度的提升,防撞装置刚度应同步提升。综合对比分析,小车低、中、高 3 种撞击速度下,壳体厚度为 4 mm、隔板间距为 500 mm 的防撞装置表现出较好的防撞性能,撞击力削减率分别达到 37.5%、41.1%、37.7%。

对于卡车,当车速为 40 km/h 时,防撞装置壳体厚度为 4 mm、隔板间距为 300 mm 时表现出较好的撞击力削减效果,当车速提升到 60 km/h,甚至 80 km/h 时,防撞装置壳体厚度为 6 mm、隔板间距为 300 mm 时,装置对撞击力削减作用更好。这是因为卡车车头刚度相对较大,且车辆质量大,撞击产生的冲击力大,必然与其匹配的防撞装置刚度应加大。当装置刚度较小时,不足以对较大冲击力产生良好的削减作用。随着速度的提升,防撞装置刚度应增大。综合对比分析,卡车低、中、高 3 种撞击速度下,壳体厚度为 6 mm、隔板间距为 500 mm 设计参数下,防撞装置性能表现较优,撞击力削减率分别达到 30.3%、38%、35.6%。

4 工程应用

项目所在道路为快速路,跨线桥为圆形墩,墩径为 $\phi 1.5$ m,桥墩位于道路中央分隔带。经现场调研,该路段通行车辆以中小型车辆为主,车流量较大,车辆平均车速为 80 km/h 左右。

结合项目实际情况,采用该文所述防撞装置结构形式。装置设计高度为 1 500 mm,迎撞面厚度为 400 mm,壳体厚度为 4 mm,隔板间距为 500 mm,采用整体两半式拼装,现场通过螺栓紧固于桥墩,装置外设反光膜安全警示标识。图 8 为防撞装置的工程应用现场。



图 8 防撞装置工程应用现场

工程实践表明,该防撞装置表现出较好的防护效果。其优点在于,小撞弹性缓冲,装置可修复,大撞能量分级衰减,且结构简单,安装方便,适用性强、耐久性高。

5 结论

(1) 基于刚度匹配原理设计的桥墩防车撞装置可以明显削减车辆撞击力荷载,达到较好的耗能缓冲效果。

(2) 对于不同道路,由于通行车辆类型、车速等道路实际通行情况不同,防车撞装置结构设计刚度应不同。对于该文算例,当需设防路段通行车辆以小车为主时,推荐防撞装置壳体厚度为 4 mm,隔板间距为 500 mm,当需设防路段通行车辆以大桥为主时,防撞装置壳体厚度推荐为 6 mm,隔板间距不大于 500 mm。

(3) 为减小车桥碰撞过程中车辆、桥梁的破坏,采用防撞装置不失为一种有效措施。该文所研究内容,对桥梁防车撞装置的设计及工程应用具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 徐东丰. 泡沫铝防护装置在桥墩防撞上的应用[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2006.
- [2] 张建强,刘伟庆,方海,等. 设置新型复合材料防撞装置的车-桥碰撞数值模拟[J]. 中外公路,2011(6).
- [3] 黄俨. 桥墩防护装置研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文,2016.
- [4] Abdelkarim O I, Elgawady M A. Performance of Bridge Piers under Vehicle Collision[J]. Engineering Structures, 2017,140:337-352.
- [5] 樊文才,张南,王新. 汽车碰撞桥墩撞击力计算[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2012(1).
- [6] 夏磊,江浩斌. 基于刚度匹配的汽车保险杠防撞梁改进设计[J]. 工程设计学,2015(1).
- [7] 顾颖,靳帮虎. 移动车辆荷载作用下高低塔斜拉桥动力响应时程分析[J]. 中外公路,2018(3).