

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqfh.240603

新型护栏碰撞特性仿真分析

王佳¹, 吴亚伟²

(1. 广东省建院施工图审查中心有限公司, 广东 广州 510000; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 佛山 528200)

摘要: 混凝土护栏防撞能力强, 变形程度小, 但当车辆撞击时缓冲能力差且自重大。基于钢筋混凝土F型护栏, 引入橡胶及钢板, 设计一种新型组合护栏, 通过允许一定变形以缓解由于车辆撞击造成的破坏, 并在保证防撞功能的同时减轻自重。采用有限元软件ANSYS/LS-DYNA及HyperMesh进行碰撞仿真分析, 数值模拟结果表明: 新型护栏较钢筋混凝土护栏的吸能效果更显著, 且能有效降低撞击力峰值; 新型护栏导向性较钢筋混凝土护栏好, 能降低碰撞过程中的危害; 护栏的设计过程中应重视护栏高度和根部直线段长度, 在提高诱导能力的同时也需要防止汽车发生侧倾危害。

关键词: 护栏; 缓冲; 吸能; 撞击力; 导向性

中图分类号: U443.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0077-05

Simulation Analysis on Collision Characteristics of New Guardrail

WANG Jia¹, WU Yawei²

(1. Guangdong Construction Institute Construction Drawing Review Center Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. Beijing Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Foshan 528200, China)

Abstract: The concrete guardrail has the advantages of strong anti-collision ability and small deformation, but has poor buffer capacity for vehicle impact and has a large deadweight. Based on reinforced concrete F-type guardrail, by introducing the rubber and steel plate, a new combined guardrail is designed. By allowing a certain deformation to alleviate the damage caused by vehicle impact, and ensuring the anti-collision function at the same time, the deadweight can be reduced. The finite element software ANSYS/LS-DYNA and HyperMesh are used to simulate and analyse the collision. The numerical simulation results show that the new guardrail can absorb energy more effectively than the reinforced concrete guardrail, and can effectively reduce the peak impact force. The new guardrail has better guidance than the reinforced concrete guardrail, and can reduce the hazard in the collision process. In the process of guardrail design, the attention should be paid to the height of guardrail and the length of the root straight section. While the induction ability is improved, it is also necessary to prevent the car from rolling hazard.

Keywords: guardrail; buffer; energy absorption; impact force; guidance

0 引言

近年来我国公路建设突飞猛进, 交通安全设施也在各等级公路中扮演着重要角色, 护栏是桥梁道路上的重要安全防护设施。目前, 桥梁上主要使用的是对车辆的缓冲能力差且自重较大的混凝土护栏。混凝土护栏具有足够的刚度, 能较好地防止车辆在发生冲撞时外倾落桥而引发次生事故; 然而刚度与变形程度及撞击力成反比, 较大的刚度意味着形变小、撞击力强, 撞击时对驾驶员及乘客造成的伤

害也相应增大。因此, 如何兼顾护栏刚度与乘客的安全性成为护栏设计中亟需突破的重点。

“车辆-护栏”的碰撞分析包含2种方法, 分别为碰撞试验和数值模拟, 其中碰撞试验结果最为准确, 也是最基本、最有效的方法, 但分析成本较高, 且试验后的材料一般不能再利用, 若进行其他分析需要重新做试验。数值模拟指利用有限元软件进行建模分析, 相比于碰撞试验, 在时间、经济等成本方面具有明显的优势。

目前国内已有较多专家学者对新型护栏开展了研究, 宋旭明等^[1]提出了一种新型装配式防撞护栏, 分析了碰撞过程中护栏的导向性、吸能缓冲效果及乘车安全性; 岳锐强^[2]提出一种新型四级(SB)多功

收稿日期: 2024-05-31

作者简介: 王佳(1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁审图工作。

能型护栏,进行实车足尺碰撞试验,结果表明该护栏满足评价标准要求,护栏最大横向动态变形值在规范的允许值范围内;焦驰宇^[3]提出了一种新型铝合金防撞护栏方案,通过理论分析与数值模拟分析了护栏所能承受的碰撞冲击力及变形。

本文以混凝土F型护栏为研究基础,引入橡胶及钢板,设计一种新型组合护栏,并采用有限元仿真对其进行安全防护性能分析,为城市桥梁新型护栏的开发与评价提供依据。

1 碰撞理论分析

1.1 显示动力分析理论

与对传统结构进行受力分析时采用的解耦载荷和结构类型不同,“车辆-护栏”的碰撞过程是一个高度非线性的问题,碰撞的动态响应较为复杂,两者的接触会造成不同形式的损坏和变形,而在此过程中产生的形变又会给结构的受力状态带来一定影响,进而导致在碰撞过程中容易发生严重的屈曲、压溃等破坏^[4]。目前较为常用的求解方法为显式积分算法,适用于“车辆-护栏”碰撞类型等瞬态非线性大变形问题,相关的动力学方程如式(1)所示。

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Ku(t) = P(t) \quad (1)$$

式中: M 为质量矩阵, C 为阻尼向量, \ddot{x} 为加速度矩阵, K 、 u 、 P 分别为刚度矩阵、位移矩阵和荷载向量矩阵; t 为时间, s 。

1.2 “车辆-护栏”碰撞简化计算理论

构建“车辆-护栏”碰撞的数学模型如图1所示。根据《公路交通安全设施设计规范》(JTG D81—2017)中^[5]的假定,车辆的竖向加速度和转动加速度忽略不计,同时忽略车辆与护栏、车轮与公路的摩擦力,且假定碰撞过程中车辆的质心不发生改变,车辆和护栏的刚度等效为线性弹簧,则碰撞力与时间的关系曲线是正弦曲线,车辆的最大横向加速度以及冲击力计算公式^[5]如式(2)、式(3)所示。

$$G = \frac{\pi v_1^2 \sin^2 \theta}{4[C \sin \theta - b(1 - \cos \theta) + D]} \quad (2)$$

$$F_{max} = \frac{\pi m v_1^2 \sin^2 \theta}{4000[C \sin \theta - b(1 - \cos \theta) + D]} \quad (3)$$

式中: G 为加速度, m/s^2 ; F 为车辆作用在护栏上的最大横向力, kN ; C 为车辆重心至前保险杠的距离, m ; b 为车辆宽度的一半, m ; θ 为碰撞角度, $^\circ$; v_1 为车辆碰撞速度, m/s ; D 为护栏最大横向变形值, m ; m 为车辆质量, kg 。

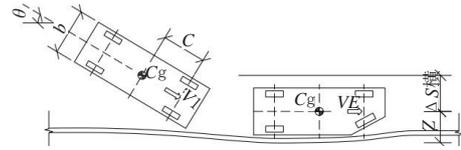


图1 “车辆-护栏”碰撞数学模型

2 有限元模型概况

2.1 汽车模型

客车结构采用Belytschko-Tsay壳单元模拟,为多线性、弹塑性、各向同性硬化材料;发动机、悬架及制动系统采用刚性实体材料;轮胎采用弹性材料。为保证计算结果的准确性并节约计算成本,根据车辆与护栏的接触情况,对车辆的不同部位采用不同的网格尺寸进行划分。模拟护栏的碰撞条件如表1所列。

表1 碰撞条件

防护等级	碰撞条件		
	车辆重量/t	碰撞速度/(km·h ⁻¹)	碰撞角度/($^\circ$)
SA	14	80	20

2.2 防撞墙模型

新型护栏的结构从左到右分别为钢板、混凝土、钢板及橡胶,各材料之间通过共节点耦合,钢筋混凝土模型中钢筋与混凝土的耦合采用关键字“CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID”进行模拟^[6]。护栏形式为F型,相关尺寸根据《公路交通安全设施设计规范》(JTGT D81—2017)^[5]确定。

设计新型护栏如图2所示,相应的有限元模型如图3所示。

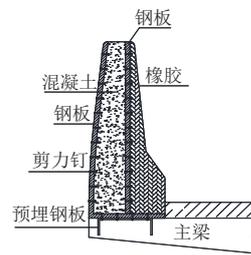


图2 新型护栏示意图

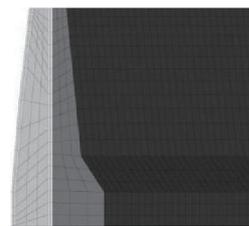


图3 新型护栏有限元模型

车辆自身的接触采用自动单面接触形式;车辆与护栏的接触采用“面-面”自动接触形式,通过关键

字“Contact-Automatic-Surface-to-Surface”模拟,动摩擦系数设为0.2,静摩擦系数为0.3,护栏底部与地面为固定约束。

2.3 本构参数

混凝土材料采用关键字“CSCM-CONCRTE”模拟,CSCM是混凝土动态损失本构模型,是由美国联邦高速公路管理局(Federal Highway Administration, FHWA)开发的连续面盖帽模型,主要用来模拟混凝土防撞护栏与车辆的碰撞^[7],该本构模型在剪切屈服面和强化盖帽面之间用光滑曲面连接,考虑了材料的硬化、损伤以及率相关性,目前在混凝土材料冲击方面应用广泛。但由于缺乏试验数据,故采用简单输入方式进行参数设计,即仅需输入混凝土轴心抗压强度与最大骨料粒径,本文采用的混凝土参数参考岳凯乐的研究结果^[6]确定。

橡胶材料通过塑形形变吸收撞击能量,采用关键字“MAT_MOONEY_RIVLIN_RUBBER”模拟,为Rivlin改进提出的Mooney-Rivlin非线性不可压缩弹性橡胶模型,计算公式如式(4)所示。

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (4)$$

式中: W 为应变能密度函数; C_{10} 、 C_{01} 为Mooney-Rivlin常数, I_1 、 I_2 为应变不变量,与橡胶拉伸比有关,本文中橡胶参数取值参考周刘茜的研究结果^[8]确定。

钢板在受到动态冲击荷载时会出现较为明显的应变率效应,使用弹塑性随动强化模型“MAT_PLASTIC_KINEMATIC”模拟,其本构关系如式(5)所示。

$$\sigma_y = \left(\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{eff} \right) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] \quad (5)$$

式中: σ_0 为初始屈服应力,MPa; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; ε_p^{eff} 为有效塑性应变; E_p 为塑性硬化模量,MPa; β 为等效硬化和随动硬化参数; C 、 p 为应变速率参数。各材料的本构参数参考范东振的研究结果^[9]确定,取值如表2至表4所列。

表2 Q235钢板本构模型参数

参数名	$R_0/(t \cdot mm^{-3})$	E/MPa	PR	SIGY/MPa	ETAN/MPa
参数值	7.85×10^{-9}	2.06×10^5	0.3	2.35×10^2	2.06×10^3
参数名	BETA	SRC	SRP	FS	
参数值	0	40	5	0	

表3 C30混凝土本构模型参数

参数名	$R_0/(t \cdot mm^{-3})$	I_{RATE}	E_{RODE}	F_{PC}/MPa	D_{AGG}/mm
参数值	2.4×10^{-9}	1	1.05	30	19

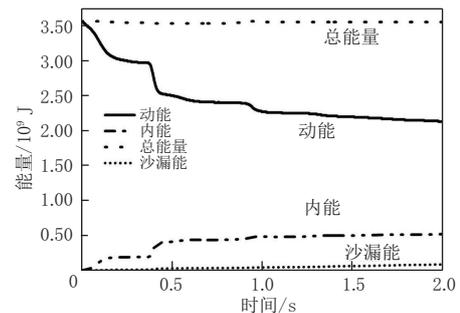
表4 橡胶本构模型参数

参数名	$R_0/(t \cdot mm^{-3})$	PR	C_{10}/MPa	C_{01}/MPa
参数值	1.6×10^{-9}	0.499 5	0.6	0.15

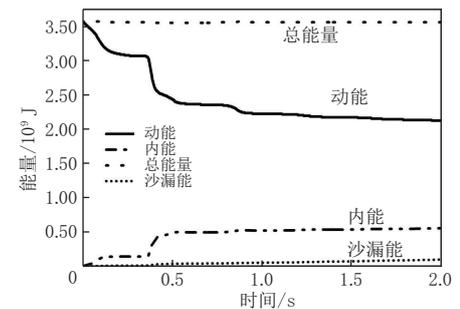
3 碰撞结果分析

3.1 能量分析

客车与新型护栏的碰撞为工况1,与混凝土护栏的碰撞为工况2,两种工况下的能量时程曲线如图4所示。由图可知,对于整个碰撞系统,车头的压溃、单元失效退出工作等现象,会导致总能量略有波动,但能量基本守恒;在碰撞初始阶段,动能值即为总能量值,伴随着汽车与护栏间碰撞的进行,动能逐渐减少,减少的动能大部分转化为内能及沙漏能等;碰撞结束后,两种工况下的沙漏能数值分别为0.103 MJ和0.402 MJ,均小于总能量的5%,保证了结果的可靠性。



(a)工况1



(b)工况2

图4 能量时程曲线

3.2 车辆轨迹分析

两种工况下车头、车尾的竖向位移时程曲线如图5所示。由图可见,在工况1中,0.1 s时汽车的左前轮与护栏接触,0.3 s时车头发生最大竖向位移,0.4 s时汽车的左后轮与护栏接触,0.65 s时车尾发生最大竖向位移;在工况2中,0.1 s时汽车的左前轮与护栏接触,0.25 s时车头发生最大竖向位移,0.4 s时汽车左后轮与护栏接触,0.6 s时车尾发生最大竖向位移。

对比图5两图可知,两种工况下的位移变化走向

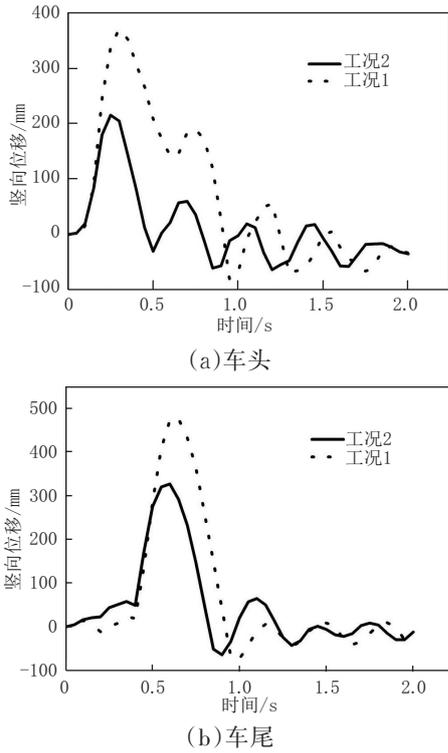


图5 竖向位移时程曲线

基本一致,汽车车头及车尾的最大竖向位移对比如表5所列。

表5 汽车最大竖向位移对比表 单位:cm

类别	车头	车尾
工况1	36.9	47.4
工况2	21.4	32.6

根据对比可知,新型护栏碰撞的工况比混凝土护栏碰撞的工况下产生最大竖向位移大。这是由于新型护栏中采用了弹性材料——橡胶,因此在碰撞过程中,护栏根部发生变形,使得根部直线段长度变小,从而能使汽车更容易爬上护栏斜坡,汽车的动力能较好地转化为势能,可降低碰撞中的危害。

3.3 吸能分析

两种工况下的吸能时程曲线如图6所示。

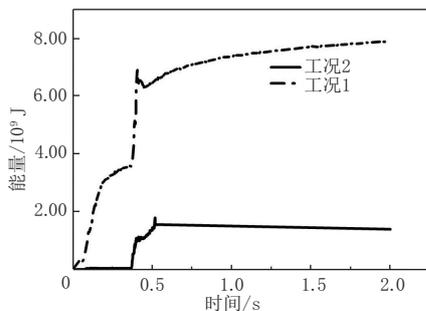


图6 吸能时程曲线

由图6可知,新型护栏的吸能性能优于混凝土护栏,两种工况下吸能时程曲线规律基本一致,但在碰撞后半段,工况1下吸能缓慢增加,而工况2下吸能

缓慢减小。

在工况1下,吸能曲线先增加,再减小,最后再增大,表明随着碰撞的进行,护栏先发生塑性变形,随后部分橡胶变形恢复,同时由于橡胶为弹性材料,钢材受到撞击后产生的塑性变形会和橡胶产生对抗,即可能存在残余应力,导致内能会一直增加;对于整个碰撞系统而言,吸能应按第一峰值取值。

对于钢筋混凝土护栏,虽然总体内能减小,但不明显,这主要是由于缺乏纯弹性材料。内能减小的本质是材料弹性段恢复,而钢筋混凝土护栏在碰撞过程中产生的主要是塑性应变,也即为不可逆的损伤变形。

3.4 撞击力分析

两种工况下的碰撞力时程曲线如图7所示。由图可知,工况1下的撞击力峰值较工况2更小,两种工况下的撞击力峰值数及出现时间基本一致,撞击力最大值均在第二峰值出现。

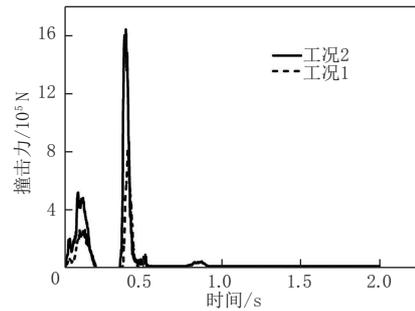


图7 撞击力时程曲线

当车辆与护栏碰撞后,碰撞力曲线迅速上升至碰撞力第一峰值,随着车头内部的压缩变形及摆尾侧倾等现象,碰撞力再次上升至第二峰值,此时的碰撞力为最大值。这主要是由于汽车质心位置较高,后轮在惯性力和地面摩擦力的双重作用下,发生接近平动的摆尾现象;同时当后轮与护栏碰撞后,车体由于惯性力作用,在竖直方向以靠近护栏的车轮为支点,向护栏外侧发生侧倾。车辆的摆尾侧倾如图8所示。



图8 车辆摆尾侧倾

对于钢筋混凝土护栏,根据碰撞理论计算公式,带入相关数据计算得 $F_{max}=455.5$ kN,取修正系数 $\xi=1.65$,则修正后的 $F_{max}=751.5$ kN。

由结果可知,理论计算值与软件的模拟值数值

相差较大,主要原因是公式中的撞击力不包含车辆与护栏、车轮与公路的摩擦力,忽略了竖向和纵向力的大小,并假定在碰撞过程中车辆质心不发生改变,因此不能反映实际情况,而数值结果中的撞击力应为3个方向的力的合力。

4 结 语

本文通过利用大型有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 及 HyperMesh 建立有限元模型,对“车辆-护栏”碰撞的过程进行了动态分析,数值模拟结果表明新型护栏的吸能性、导向性均优于钢筋混凝土护栏,且能使在碰撞过程中产生的撞击力峰值显著减小。研究所得具体结论如下。

(1)新型护栏能提高碰撞诱导能力,主要是由于新型护栏的碰撞面采用橡胶材料,在碰撞过程中可发生较大竖向变形,使护栏根部直线段长度变小,当汽车碰撞时动能可以转化势能,减小碰撞过程中的危害。

(2)新型护栏的吸能效果优于钢筋混凝土护栏,主要是由于在碰撞过程中,橡胶对车辆的包裹作用使得碰撞面积增大,同时橡胶的变形也使动能较好地转换为势能;但在碰撞过程中,内能持续增加,其原因为弹性材料的形变恢复与塑性材料变形会发生抵抗作用,护栏存在残余应力。

(3)撞击新型护栏的撞击力峰值明显小于撞击混凝土护栏,说明在碰撞过程中橡胶发生了一定的变形,在耗能的同时增大了车辆与护栏的接触面积,从而减小了撞击力。

(4)护栏根部直线段长度及护栏高度的设计需引起设计者重视,根部直线段长度较小有利于汽车爬上护栏斜坡,提高护栏导向性,有利于碰撞,但当汽车爬坡到一定高度后容易发生侧倾,因此还需要注重护栏高度的设计。

参考文献:

- [1] 宋旭明,潘鹏宇,荣亚威,等.基于碰撞仿真的新型装配式护栏防护性能[J].华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(10):41-49.
- [2] 岳锐强,李文,张翔,等.新型四级多功能型护栏实车足尺碰撞试验研究[J].公路,2017,62(11):187-191.
- [3] 焦驰宇,朱格西,龙佩恒,等.城市桥梁新型铝合金防撞护栏安全性[J].科学技术与工程,2019,19(30):310-316.
- [4] 史良,赵英培,薛鹏涛,等.车辆撞击中央分隔带开口活动护栏仿真分析及安全性能评估[J].公路交通科技,2022,39(3):152-159.
- [5] JTG D81—2017,公路交通安全设施设计规范[S].
- [6] 岳凯乐.桥墩车撞动力响应分析[D].河南:郑州大学,2021.
- [7] Murray Y.D. User's Manual for LS_DYNA Concrete Material Model 159 [R]. McLean: Federal Highway Administration, 2007.
- [8] 周刘茜.船撞桥墩作用的有限元数值仿真及碰撞特性研究[D].四川:西南交通大学,2018.
- [9] 范东振.外包钢板墩柱在车辆撞击作用下的动力响应研究[D].北京:北方工业大学,2017.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

