基于能量合理分配的外包U型钢-混凝土组合护栏防撞性能

穆长儒[1],徐 亮[1],程国柱[2]

（1.长春工程学院 土木工程学院,长春 130012;2.东北林业大学 土木与交通学院,哈尔滨 150040）

摘 要:针对现有混凝土刚性护栏吸能、缓冲能力不佳的问题,提出一种装配泡沫铝的外包U型钢-混凝土新型组合护栏。利用ABAQUS建立护栏-车辆碰撞耦合系统,模拟49 t载重货车碰撞护栏过程,并对护栏的导向功能、缓冲功能、吸能功能进行分析。有限元分析结果表明:装配泡沫铝的外包U型钢-混凝土新型组合护栏与现有普通混凝土护栏相比,其极限强度显著提升。同时,货车碰撞护栏的过程中载重货车未跨越护栏,新型组合护栏导向性好;驾驶员位置处横向加速度与纵向加速度均小于200 m/s^2;新型组合护栏防护能量达431 kJ,冲击效率为91.25%,装配泡沫铝的外包U型钢-混凝土新型组合护栏结构具备较好的吸能缓冲效果,可降低乘员伤害程度,具有较好的防撞性能,能有效提高乘车安全性,可为混凝土护栏吸能设计提供参考。

关键词:交通运输系统工程;外包U型钢-混凝土护栏;碰撞仿真;防撞性能;吸能

中图分类号:U417.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-5497(2025)08-2669-12

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240069

Collision prevention performance of outsourced U-shaped steel concrete composite guardrail based on reasonable energy allocation

MU Chang-ru[1],XU Liang[1],CHENG Guo-zhu[2]

(1. *School of Civil Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun* 130012, *China*; 2. *School of Civil Engineering and Transportation, Northeast Forestry University, Harbin* 150040, *China*)

Abstract: In view of the poor energy absorption and buffering capacity of existing concrete rigid guardrails, a new type of composite guardrail with U-shaped steel and concrete encased by foam aluminum is proposed. Using ABAQUS to establish a guardrail vehicle collision coupling system, simulate the collision process of a 49 t heavy-duty truck with a guardrail, and analyze the guiding function, buffering function, and energy absorption function of the guardrail. The results of finite element analysis show that the ultimate strength of the new composite guardrail with wrapped U-shaped steel and concrete assembled with foam aluminum is significantly improved compared with the existing ordinary concrete guardrail. At the same

收稿日期:2024-01-19.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项项目(2572022AW61);吉林省自然科学基金项目(YDZJ202101ZYTS184).

作者简介:穆长儒(1994—),男,讲师,博士.研究方向:道路交通安全,道路线形设计.E-mail:1939765288@qq.com

time, during the collision of the truck with the guardrail, the loaded truck did not cross the guardrail, and the new combination guardrail has good guidance performance; the lateral acceleration and longitudinal acceleration at the driver's position are both less than 200 m/s^2; the protection energy of the new composite guardrail is 431 kJ, and the impact efficiency is 91.25%. The new composite guardrail structure of wrapped U-shaped steel concrete with foam aluminum has a good energy absorption and cushioning effect, which can reduce the degree of injury to passengers, has a good anti-collision performance, can effectively improve the safety of riding, and can provide a reference for the energy absorption design of concrete guardrails.

Key words: engineering of communication and transportation system; outsourcing U-shaped steel-concrete guardrail; collision simulation; collision resistance performance; energy absorption

0 引 言

我国路侧事故死亡率约占公路事故死亡率的40%,路侧事故频发已经成为阻碍社会可持续发展的焦点问题之一。伴随着公路货运的发展,货车参与的路侧交通事故数量也逐年增加,货车总重大、车身长、加减速性能差等相关因素会进一步增加路侧事故风险,对于有货车参与的事故,重、特大事故比例通常较高,其中货车冲出路外事故(路侧事故)占比较大且致死率较高,加重路侧事故严重程度,严重影响了公民的生命和财产权益。混凝土护栏作为一种整体断面形式护栏,虽然具有自重大、刚度大、阻挡效果良好的优点,但也存在吸能缓冲能力不佳的缺陷。因此,适当降低混凝土护栏的刚度,提高混凝土护栏缓冲吸能的性能有利于降低事故严重程度,保障车乘人员的安全。

护栏在降低车祸严重程度方面起着关键作用[1,2]。公路护栏的开发和安装是为了防止车辆偏离道路或进入对向车道[3,4],将车辆转向正确的车道[5],并降低车乘人员受伤的危险[6]。护栏的导向能力[7]、阻挡性能[8]、缓冲性能[9]和能量吸收功能[10]是表征车辆与护栏碰撞时护栏结构安全的关键指标。一直以来,国内外众多学者致力于不断提升护栏的防撞性能。Noh等[5]对护栏系统中立柱加固并进行了有限元碰撞模拟,改进后的模型在稳定地遏制和重定向撞击车辆方面表现得更好;Sun等[11]针对常规桥梁护栏碰撞性能差、使用寿命短的问题,提出了一种连续玄武岩纤维增强聚合物(BFRP)护栏,采用非线性显式动力学软件LS-DYNA对BFRP管进行了仿真,证明BFRP护栏具有良好的导向性能及缓冲功能;蒋键锆等[12]面对桥梁混凝土护栏改造的装配化需求,提出由超高性能混凝土装配连接的新型节段拼装混凝土护栏,有限元分析表明超高性能混凝土构件能替翼缘板吸收大量冲击能量,可有效减小翼缘板受力,起到一定的保护作用。对于护栏吸能,波浪护栏提供了防撞能力以及通过变形吸收能量的能力[13]。针对混凝土护栏由于其刚度大,吸能效果不佳的问题,单成林等[14]提出钢-聚氨酯夹层结构,有限元分析结果表明该结构具有良好的吸能缓冲效果和防撞性能,为混凝土护栏吸能提供了新思路。为保持混凝土护栏的良好防撞效果,同时使其具备较好的吸能效果,宋旭明等[15]出一种新型装配式混凝土防撞护栏,根据仿真结果,新型护栏导向性好,具备更佳的吸能缓冲效果,能有效提高乘车安全性。郑植等[16]针对早期修建的低等级混凝土护栏防护能力与现阶段交通流不匹配的问题,提出了一种组合式护栏,建立车-护栏有限元模型,分析了组合式护栏的防车撞性能,改造后的组合式护栏防护能量达到290 kJ,防护能力是改造前的1.8倍。

我国现行的《公路交通安全设施设计规范》(JTG D81—2017)[17]对护栏的设计有一套完整的规范要求,同时国内外的许多学者从护栏的结构形式、材料、安装等角度做了大量的模拟分析,均验证了护栏的可靠性。载重货车在行驶过程中发生碰撞会产生较大的冲击力,加重发生事故的严重程度,根据规范可知,当事故严重程度较高时,常常采用混凝土护栏形式阻挡车辆,但混凝土护栏作为常见的刚性护栏形式,虽具有较好的防撞性能,但较大刚性会造成混凝土护栏的吸能缓冲

能力效果不佳,给行车安全带来巨大挑战。因此,本文提出一种装配防撞泡沫铝的外包U型钢-混凝土组合护栏,对货车与混凝土护栏的碰撞进行有限元模拟,验证新型护栏的防撞性能,为刚性护栏结构设计、缓冲吸能材料选取提供新思路。

1　现有混凝土护栏防撞性能分析

根据《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05—01—2013)[18]将护栏的防护等级按照设计防护能量划分为8级。随着社会经济发展的加快,我国公路网建设越来越完善,公路运输凭借其适应性强、灵活、安全、高效等优势,已成为货物运输的主要交通方式,对经济发展的促进作用越来越明显。伴随着公路货运的发展,货车大型化趋势明显。载重货车以一定速度运行时,其货物会使车辆本身产生较大冲击力,当碰撞路侧护栏时,会造成路侧护栏损坏,当路侧护栏可以阻挡载重货车时,由于混凝土护栏的刚度大,会对车辆造成较大损坏,导致严重的交通事故,对车乘人员生命权益产生较大伤害。本文首先以规范中的最高设计防护等级护栏为对象,分析载重货车碰撞护栏后的损伤程度,以及混凝土的损害程度。参考规范中的防护等级SB级护栏,建立有限元模型,对既有的普通混凝土护栏防护性能进行分析,既有混凝土护栏有限元碰撞仿真系统如图1所示,位移与应力碰撞仿真结果如图2所示。

如图2(a)所示,载重货车以一定速度撞击普通混凝土护栏后,混凝土护栏最大外倾值大于规范要求值,同时混凝土护栏受到载重货车力的作用时,使护栏的钢筋与混凝土均发生破坏,如图2(b)(c)所示。因此,当满载的6轴铰接列车撞击既有混凝凝土护栏时,混凝土护栏的防护性不能满足规范要求。

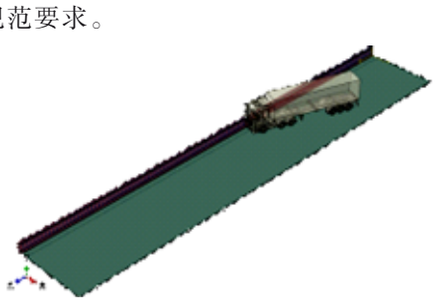
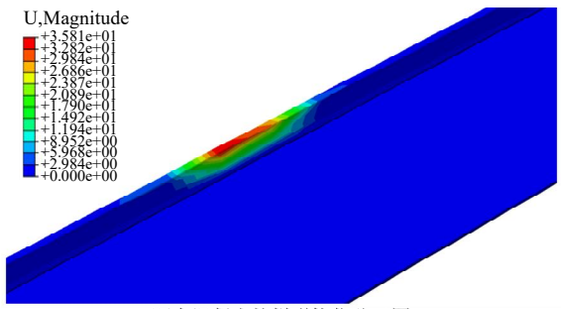
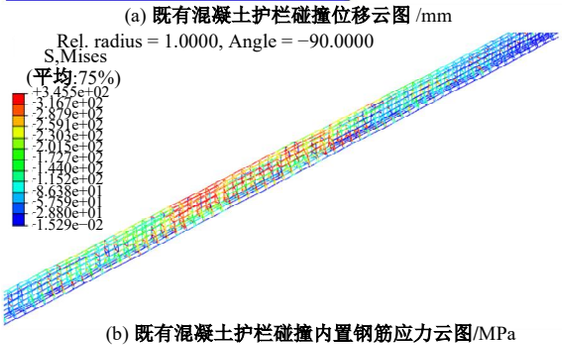


图1　既有混凝土护栏碰撞系统

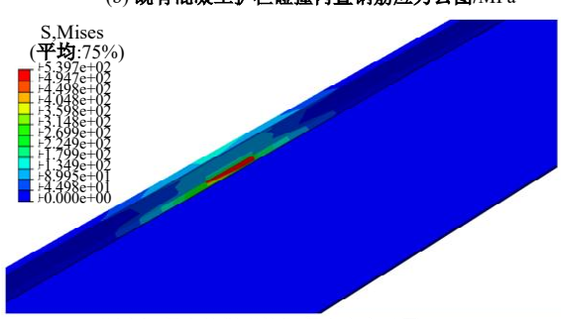
Fig. 1　Existing concrete guardrail collision system



(a) **既有混凝土护栏碰撞位移云图** /mm



(b) **既有混凝土护栏碰撞内置钢筋应力云图**/MPa



(c) **既有混凝土护栏碰撞混凝土应力云图**/MPa

图2　既有混凝土护栏碰撞云图

Fig. 2　Collision cloud of existing concrete guardrail

2　新型护栏结构形式

2.1　新型护栏各结构形式设计

混凝土刚性护栏在保有较强阻挡性能的同时导向性能与缓冲性能相对半刚性护栏和柔性护栏有所欠缺,本文结合目前国内外推广应用的刚性护栏提出了装配泡沫铝的外包U型钢-混凝土组合护栏。装配泡沫铝的外包U型钢-混凝土组合护栏以《公路交通安全设施设计规范》(JTG D81—2017)[17]所规定的单坡型护栏尺寸为基础进行设计,以保证断面形式符合规范要求。在不占据道路空间的前提下,可调节原有混凝土护栏过大的刚度,以减轻碰撞后车辆和车乘人员的损伤程度。

新型护栏由混凝土护栏、U型钢外壳、泡沫铝复合材料缓冲护板及栓钉组成。新型护栏采用泡沫铝复合材料缓冲护板与护栏通过浸渍胶连接,车辆撞击护栏时,缓冲护板产生压缩变形并吸收

碰撞能量,降低车乘人员在碰撞过程中的加速度以提升安全性能。栓钉具有3个作用,首先作为抗滑移件栓钉焊接在U型钢壳的迎撞背面,在浇筑混凝土时栓钉直接嵌固在混凝土护栏主体结构内,通过栓钉使外包U型外壳板与混凝土护栏主体组成共同工作的整体,防止发生组合护栏外包U型钢外壳纵向滑移破坏;其次,通过栓钉作用更好地传递剪力;最后,栓钉代替既有混凝土护栏的内置钢筋。根据现有的研究可以发现,栓钉作为抗剪连接件时,其承受剪力最大位置为栓钉根部,由于根部受到剪力的作用使栓钉发生变形继而挤压周围的混凝土,因此,栓钉抗剪存在两种破坏模式:①栓钉的剪切破坏;②混凝土护栏主体局部承压破坏。

根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)[19]的相关规定,栓钉抗剪承载力需按照上述两种破坏模式分别计算,计算方法如式(1)(2)所示,并取其中较小值:

$$N_{\mathrm{v}}^{\mathrm{c}}=0.43A_{\mathrm{s}}\sqrt{E_{\mathrm{C}}f_{\mathrm{C}}}\leqslant 0.7A_{\mathrm{s}}f_{\mathrm{u}} \tag{1}$$

式中:A_{s}为栓钉杆的截面面积;E_{C}为混凝土的弹性模量;f_{u}为圆柱头焊钉极限抗拉强度设计值。

同时栓钉需要将碰撞时产生的拉力传递至外包U型钢板上,因此,栓钉还需具有足够的抗剪承载力,在计算时认为栓钉的破坏发生在外包U钢外壳屈服之后:

$$n\cdot N_{\mathrm{v}}^{\mathrm{c}}=f_{\mathrm{y}}\cdot A \tag{2}$$

式中:n为栓钉个数;f_{y}为钢板抗拉强度;A为钢板截面面积。

栓钉采用M10圆柱头焊钉,经过计算,栓钉间距采用200 mm×500 mm。新型护栏横截面的结构如图3所示。

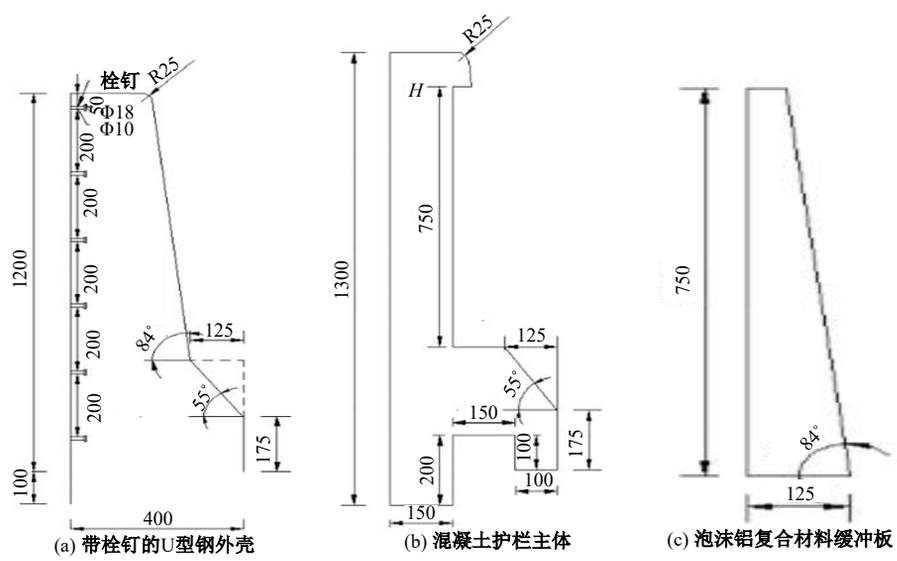


图3 新型组合护栏组成结构构造图(mm)

Fig. 3 Structure diagram of new combined guardrail (mm)

2.2 新型护栏各结构有限元模型

ABAQUS软件含前处理与后处理两个模块,其中前处理模块主要用于建立模型部件及为模型部件定义材料属性,依靠"Assembly"功能进行模型的建立,通过"Load"功能为模型施加荷载和边界条件,进行网格划分后提交作业。后处理模块能够求解线性和非线性问题,包括静态分析、动态分析及复杂的非线性耦合物理场分析等。在汽车研发制造、航空航天、土木水利等领域均有广泛应用。同时,软件中的"Property"功能模块提供了多种材料的本构和失效准则,可对弹性材料和塑性材料的力学性进行仿真模拟。材料的本构关系是进行有限元仿真模拟较为重要的一步,只有恰当的本构关系才能对试件进行准确的模拟,确保仿真的过程,以便准确地还原试件的破坏现象,最终得出精确的极限承载力。

混凝土的失效行为是通过在ABAQUS中引入混凝土损伤塑性来定义的。ABAQUS提供了3种混凝土本构关系模型,分别是脆性开裂模型、弥散开裂模型、塑性损伤模型,通过引用3种模型可以较好地模拟混凝土材料的在受力状态下的力学性能。本文混凝土材料的本构关系选用混凝土的塑性损伤模型,该模型需输入混凝土材料的单轴受压应力-应变关系和单轴受拉应力-应变关

系,可参考我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)给定的混凝土单轴受压和受拉应力-应变曲线方程进行计算。混凝土强度为C30,材料属性如表1、表2所示。

对于金属钢材,ABAQUS中常采用经典金属塑性进行仿真模拟,采用Mises屈服面,材料的屈服需要考虑材料的应力场作用。本文金属钢材分析采用理想塑性来定义屈服后行为,理想塑性指的是在材料屈服后应力不随塑性应变而变化。金属钢材材料模型采用理性塑性双折线模型,钢材的应力-应变曲线关系如图4所示。

表1 混凝土受压力学行为

Table 1　Mechanical behavior of concrete under compression

弹性模量	泊松比	压缩力学行为		压缩损伤	
		拉伸应力/MPa	非弹性应变	拉伸损伤	非弹性应变
31 000	0.2	1.30E+01	0	0	0
		2.15E+01	8.30E-04	3.06E-01	8.30E-04
		1.88E+01	6.81E-03	4.90E-01	6.81E-03
		1.51E+01	2.75E-03	6.13E-01	2.75E-03
		1.23E+01	3.70E-03	6.93E-01	3.70E-03
		1.03E+01	4.62E-03	7.48E-01	4.62E-03
		8.83E+00	5.52E-03	7.87E-01	5.52E-03
		7.72E+00	6.40E-03	8.17E-01	6.40E-03
		6.17E+00	8.15E-03	8.57E-01	8.15E-03
		3.50E+00	1.49E-02	9.27E-01	1.49E-02

表2 混凝土受拉力学行为

Table 2　Tensile mechanical behavior of concrete

弹性模量	泊松比	拉伸力学行为		拉伸损伤	
		拉伸应力/MPa	开裂应变	拉伸损伤	开裂应变
31 000	0.2	2.9	0	0	0
		1.94E+00	6.62E-05	3.81E-01	6.62E-05
		1.30E+00	1.23E-04	6.17E-01	1.23E-04
		8.73E-01	1.73E-04	7.63E-01	1.73E-04
		5.86E-01	2.20E-04	8.53E-01	2.20E-04
		3.92E-01	2.65E-04	9.09E-01	2.65E-04
		2.63E-01	3.08E-04	9.44E-01	3.08E-04
		1.76E-01	3.51E-04	9.65E-01	3.51E-04
		1.18E-01	3.94E-04	9.79E-01	3.94E-04
		7.92E-02	4.38E-04	9.87E-01	4.38E-04
		5.31E-02	4.82E-04	9.92E-01	4.82E-04

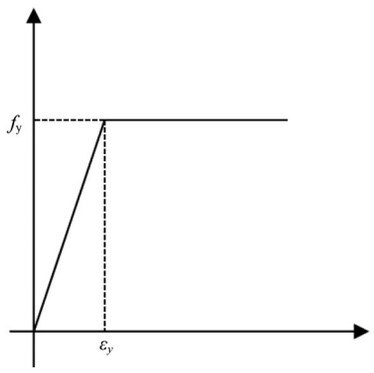


图4　钢材理想弹塑性模型

Fig. 4　Steel ideal elastic-plastic model

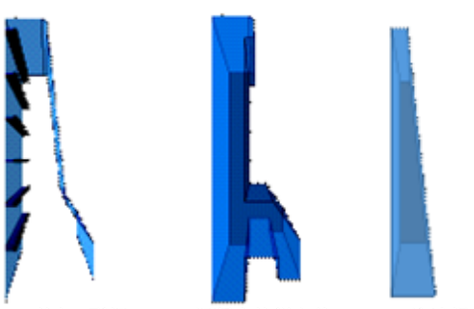
钢材材料采用理想塑性模型,材料属性参数如表3所示。

泡沫铝采用ABAQUS自带的低密度泡沫模型,通过对所有部件赋予属性,所建立的有限元模型如图5所示。

表3　钢材材料属性

Table 3　Steel material properties

弹性模量/Mpa	泊松比	屈服应力	塑性应变
210 000	0.3	345	0.0
		350	0.1



(a) 外包U型钢有限元模型　(b) 混凝土护栏主体有限元模型　(c) 泡沫铝有限元模型

图5　部件有限元模型

Fig. 5　Finite element model of components

3　护栏有限元分析

3.1　混凝土护栏设计原理

《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2017)[20]在护栏的设计与计算中借鉴了美国的规范,基于屈服线设计理论提出了车辆碰撞荷载下桥面悬臂板的设计方法[15]。规范中规定混凝土护栏构件的设计采用屈服线分析和强度设计理论。屈服线理论作为一种极限荷载的分析方法,其通过模拟车辆以一定的动能和碰撞角度撞击混凝土护栏,假设护栏为刚体,在碰撞过程中不发生位移,根据能量守恒原理建立车辆撞击混凝土护

栏过程的能量方程。根据混凝土护栏在碰撞过程中可能出现的塑性变形的破坏模式,按照结构动力学原理和能量守恒原理求解混凝土护栏的极限承载力及屈服线长度。对于不同混凝土护栏等级,最小的极限承载能力所对应的破坏变形即混凝土护栏设计控制破坏模式。设计中按照混凝土护栏配筋,计算出混凝土护栏对应的横向碰撞荷载的抗力标准值,计算的抗力值应大于横向碰撞力的设计值。

碰撞发生在混凝土护栏标准段时的破坏模式如图6所示。碰撞发生在标准段时,混凝土护栏屈服面(破坏面)沿车辆碰撞中心对称分布,混凝土护栏的内侧与外侧均发生屈服破坏,破坏面呈楔形,屈服线范围内侧两条破坏面直通护栏顶部与桥面板交界处,在向外侧冲击的作用下,护栏板顶端发生的横向位移,外侧有一条撞击破坏面。

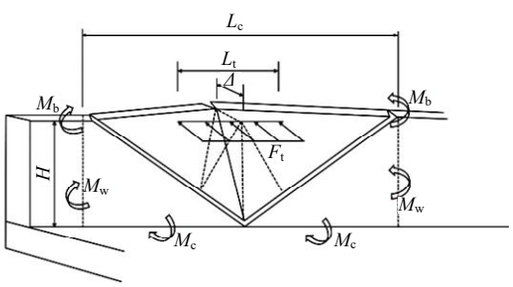


图6 屈服线分析法

Fig. 6 Yield line analysis method

护栏顶部位移值达到Δ时,护栏发生屈服破坏,此时护栏的极限强度R_W按式(3)计算[21]:

$$R_W=\frac{2}{2L_c-L_t}\left(8M_b+8M_w+\frac{M_cL_c^2}{H}\right) \quad (3)$$

护栏的屈服线临界长度L_C按式(4)计算[22]:

$$L_c=\frac{L_t}{2}+\sqrt{\left(\frac{L_t}{2}\right)^2+\frac{8H(M_b+M_w)}{M_c}} \quad (4)$$

式中:R_w为护栏的总的横向承载能力,kN;H为护栏有效高度,m;L_c为屈服线破坏模式临界长度m;L_t为碰撞荷载分布纵向长度,m;M_w为护栏关于其竖向轴的弯曲承载力矩,kN•m;M_b为护栏顶部除M_w外的横梁附加弯曲承载力矩,kN•m;M_c为悬臂型护栏关于桥梁纵轴的弯曲承载力矩,kN•m。

3.2 护栏静力学分析

车辆与混凝土护栏发生碰撞时,会在混凝土护栏的一定范围产生较大的冲击荷载。车辆与护栏之间的碰撞主要采用两种方法进行分析研究:实验碰撞测试和计算仿真模拟。实验性事故测试准确可靠,但存在费用高、重复性低等缺点。因此,在研究混凝土护栏的极限荷载时通常采用仿真分析的方式。美国国家公路与运输协会标准(AASHTO LPFD)中提供了车辆撞击混凝土护栏的准静态等效载荷的具体标准,其根据混凝土护栏构件的尺寸规格分为6个测试等级(TL-1~TL-6),研究中混凝土护栏尺寸符合其TL-5测试等级要求(护栏的最小高度大于1 070 mm),其对应车辆碰撞等效荷载的加载高度为1 070 mm、荷载宽度为2 440 mm,如图7所示。

图8为静力加载护栏损伤云图,通过损伤云图分析可知,混凝土护栏在变坡点A处发生破坏,以A点为水平线向上形成倒梯形的屈服线。

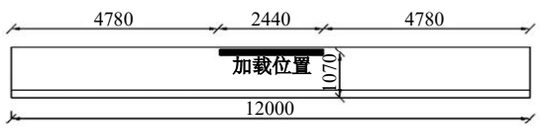


图7 护栏静态加载示意图

Fig. 7 Guardrail static loading diagram

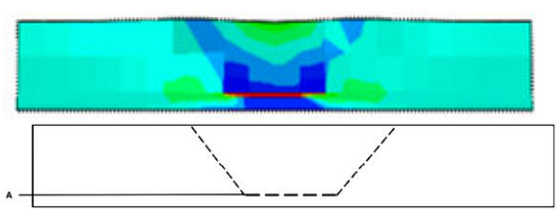


图8 护栏屈服示意图

Fig. 8 Cloud image of guardrail damage

在相同碰撞荷载分布纵向长度L_t下,新型组合护栏具有比既有普通混凝土护栏更长的屈服线临界长度L_c。因此,混凝土护栏发生破坏时,新型组合护栏的屈服线临界长度L_c更大,发生屈服破坏所需的加载力F_t更高,极限强度R_W较现有普通混凝土护栏提升了42%,说明了装配防撞泡沫铝的外包U型钢-混凝土组合护栏结构是可行的。

3.3 护栏动力学分析

对新型组合混凝土护栏进行动力学分析,以便更好地验证新型组合混凝土护栏的结构性能。建立质量块-混凝土护栏动态模型,通过控制质量块的碰撞高度来模拟车辆撞击的高度。采用10 t的质量块,以30 m/s的速度对新型组合混凝土护栏进行碰撞分析,碰撞高度采用货车的保险杠高

度65 cm,碰撞模型如图9所示。碰撞后的位移云图如图10所示。

如图10所示,由动态碰撞位移云图可知,当碰撞物作用到混凝土护栏上时会产生一定的冲击力,冲击力首先对混凝土护栏中的防撞泡沫铝产生作用,致使其发生形变,当防撞泡沫铝达到最大变形时,碰撞物所产生的冲击力继续作用于混凝土,直至混凝土破坏,护栏失效。因此,用泡沫铝材料装配到混凝土护栏中作为防撞吸能材料是可行的。

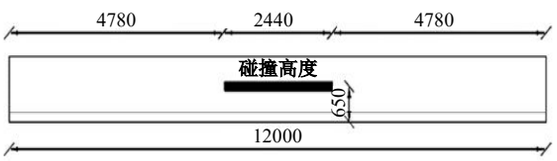
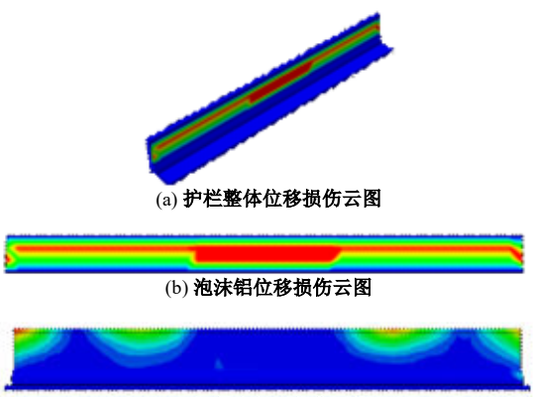


图9　护栏动态碰撞示意图

Fig. 9　Dynamic collision diagram of guardrail



(a) **护栏整体位移损伤云图**

(b) **泡沫铝位移损伤云图**

(c) **混凝土位移损伤云图**

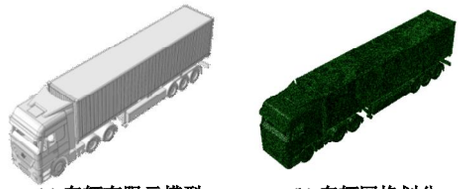
图10　护栏动态加载损伤云图(mm)

Fig. 10　Dynamic loading damage cloud diagram of guardrail (mm)

4　货车与护栏碰撞耦合系统

4.1　车辆有限元模型

中国公路货运周转量绝大多数是由以49 t车型为代表的大型6轴铰接列车完成的,从车辆数上,6轴铰接列车已是货运的主要车型[20]。因此,仿真碰撞车辆选取6轴铰接货车,由于车辆的车身主要为三维薄壁金属壳结构,因此,单元类型以三维壳单元为主,同时为获得良好单元以保持数值计算的稳定性,车身各部分以刚性连接为主。车辆轮胎与悬挂的连接等采用铰链形式模拟实现。同时定义轮胎的旋转轴并施加相应的角速度。车辆有限元模型如图11所示。



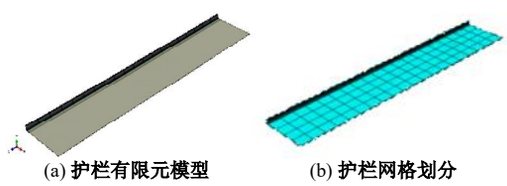
(a) **车辆有限元模型**　　(b) **车辆网格划分**

图11　车辆模型

Fig. 11　Vehicle model

4.2　护栏有限元模型

建立护栏精细化有限元模型,新型组合土护栏主要由混凝土护栏主体、外包U型钢外壳、防撞泡沫铝板、栓钉等构成。栓钉采用四面体单元划分网格。由于缩减积分对位移的求解精度较高,且对网格的扭曲不敏感,因此,混凝土护栏主体采用三维八节点六面体线性缩减积分单元进行网格划分。外包U型钢板采用三维壳单元,护栏长度为60 m。有限元模型如图12所示。



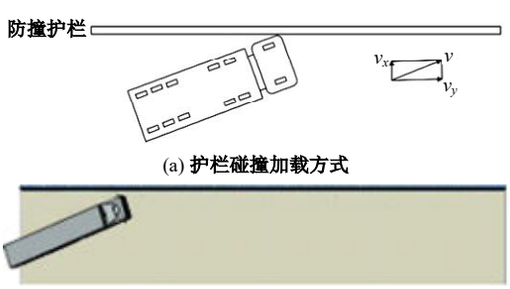
(a) **护栏有限元模型**　　(b) **护栏网格划分**

图12　新型组合护栏模型

Fig. 12　New combined guardrail model

4.3　碰撞条件

根据《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01—2013)[18]给出的相关碰撞条件,实车碰撞中测试车辆碰撞角度为20°,碰撞速度为60 km/h。由于仿真时碰撞车辆只能采用90°垂直方向进行速度定义,而车辆的碰撞角度为20°,因此,需要将车辆碰撞速度进行分解,速度分解如图13所示。同时,由于车辆和护栏的碰撞过程十分复杂,判断车体各接触面的接触发生方向较为困难,本文中选用通用接触。



(a) **护栏碰撞加载方式**

(b) **护栏碰撞有限元模型**

图13　车辆护栏碰撞系统

Fig. 13　Vehicle guardrail collision system

5 碰撞系统仿真性能的验证

在模拟车辆与护栏碰撞的过程时,需要对所建立的碰撞系统性能进行验证。已有研究通过碰撞力[11]、能量转换[11,21]等验证仿真的正确性。本文将理论碰撞力与有限元模拟仿真碰撞力进行比对,确定碰撞过程中的碰撞力是否与标准要求相符合。一般情况下,如果碰撞力的理论计算值与有限元计算值的误差在20%以内,则认为碰撞过程的仿真性能良好。此外,可通过沙漏能量与总能量的比较,验证仿真过程的稳定性。如果碰撞系统的沙漏能量能控制在10%以内,则认为碰撞过程的仿真性能良好。除此之外,本文通过栓钉的屈服及混凝土主体的滑移进一步验证了模型的有效性。

5.1 碰撞力验证

根据《公路交通安全设施设计规范》(JTG D81—2017)[17]可知,车辆与护栏的数学碰撞模型如图14所示,车辆作用在护栏上的最大横向力按式(5)计算:

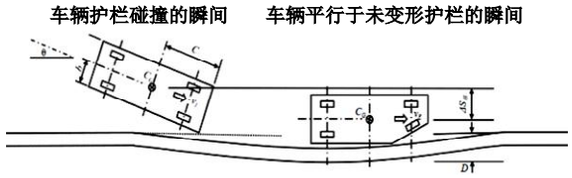


图14 车辆与护栏碰撞的数学模型

Fig. 14 Mathematical model of vehicle-guardrail collision

$$F_{横max}=\frac{\pi}{2}\cdot\frac{m(v_1\sin\theta)^2}{2\,000\left[C\sin\theta-b(1-\cos\theta)+D\right]} \tag{5}$$

式中:$F_{横max}$为车辆作用在护栏上的最大横向力;m为车辆质量;v_1为车辆碰撞速度;θ为车辆的碰撞角度;C为车辆重心距前保险杠的距离;b为车辆宽度的一半;D为护栏的最大横向动态变形,混凝土护栏$D=0$,金属护栏$D=0.3\sim0.6$ m。

利用式(5),计算出理论碰撞力的大小为1 738.4 kN。为了与理论碰撞力进行对比,验证碰撞系统的可靠性,给出了图15碰撞系统横向碰撞力与纵向碰撞力的历程图。

由图15可知,新型组合护栏最大横向碰撞力出现在0.17 s,最大横向碰撞力为1 691.56 kN,与基于规范计算的理论碰撞力相比,差异约为2.7%。因此,认为有限元模拟结果是可靠的。

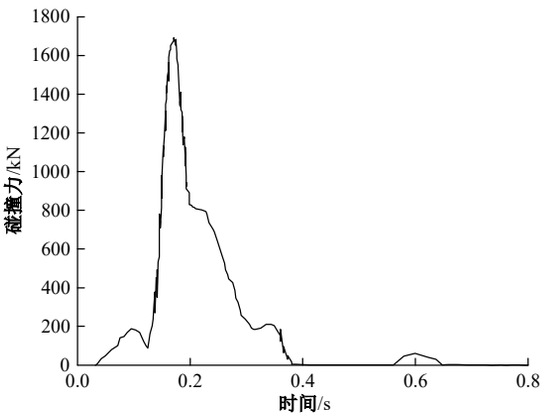


图15 新型组合护栏横向碰撞力历程曲线

Fig. 15 The lateral collision force history curve of the new composite guardrail

5.2 碰撞能量验证

采用铰接列车碰撞护栏时,碰撞的初始动能逐渐转化为内能,在撞击护栏的过程中,车辆初始动能逐渐转化为车辆和护栏的内能、界面接触能、沙漏能等。碰撞系统能量转换关系曲线如图16所示。

在整个碰撞过程中,系统的总能量是守恒的。动能逐渐减小,而内能逐渐增大,并且沙漏能量小于总能量的10%,这也符合碰撞过程的能量转化规律。表明碰撞过程的模拟性能良好。碰撞中内能仅占总能量的11%,56%的动能仍保留在车辆上,其导向性能良好。

5.3 混凝土滑移验证

栓钉采用内置方式嵌入混凝土护栏主体中。栓钉作为新型组合护栏形式的重要组成部分,其在力的传递、提高护栏主体强度方面具有重要作用。因此,通过对栓钉的应力分析可以检验护栏的可靠性,货车碰撞护栏后栓钉的应力云图如图17所示。

根据栓钉的屈服情况来看,车辆撞击处栓钉发生明显屈服现象,除车辆直接撞击处外,护栏的其余部分并未出现明显的屈服现象,外包U型钢与混凝土护栏主体能较好地协同工作共同抵抗外荷载作用,证明栓钉可以很好地限制混凝土结构的滑移,防止外包U型钢-混凝土组合护栏发生滑移破坏。说明新型组合护栏形式在阻挡货车碰撞保障车辆不冲出路段是可行的。

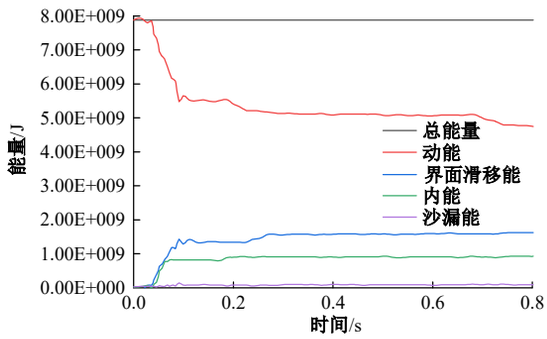


图 16　能量转换历程

Fig. 16　Energy conversion process

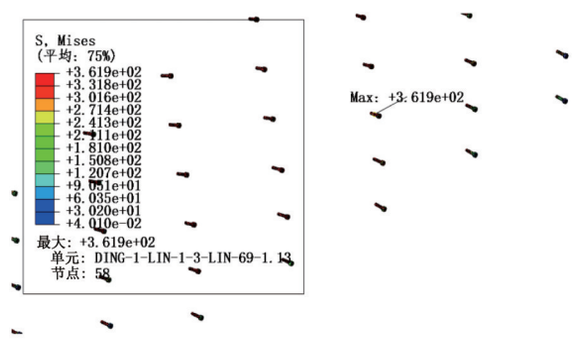


图 17　栓钉应力云图(MPa)

Fig. 17　Stress cloud diagram of stud (MPa)

6　数值计算结果分析

6.1　碰撞力分析

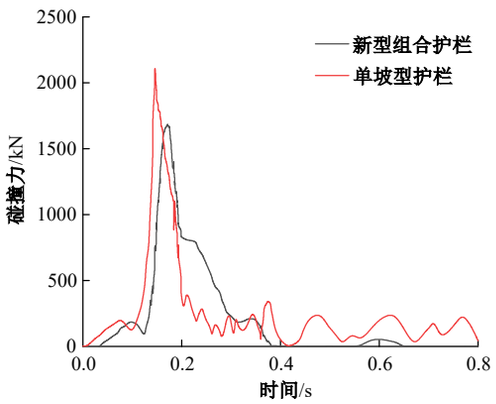
为研究新型组合式护栏的防撞性能,进行49 t大型载重货车碰撞护栏模拟实验。图18给出了新型组合护栏与普通单坡型护栏碰撞过程的碰撞力曲线对比图,可知,碰撞新型组合护栏的横纵向碰撞力均小于现有的单坡型护栏。

为了更好地研究新型组合式护栏的防撞性能,根据《公路护栏性能评价标准》(JTG B05-01—2013)[18],对新型组合护栏的导向功能、缓冲功能、吸能功能三个方面做进一步分析。

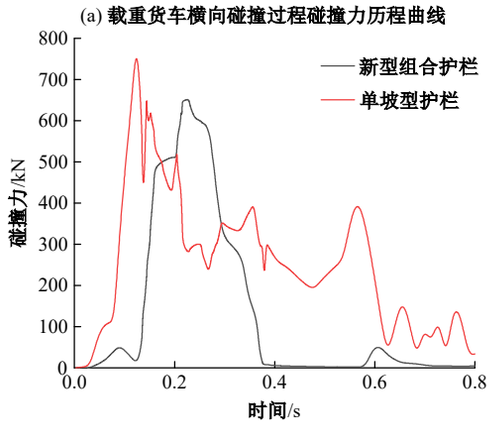
6.2　导向功能

在碰撞过程中,护栏需要对车辆进行有效的引导,防止车辆发生倾覆、骑跨、穿越护栏等情况。本文设计的护栏在被载重货车碰撞过程中未发生失效。新型组合护栏对车辆起到了良好的导向作用,没有产生倾覆、骑跨、穿越护栏的现象。不同时间节点49 t大型载重货车与新型组合式护栏的碰撞轨迹,如图19所示。

由图19可知,载重货车在0.15 s时与新型护栏发生碰撞,在0.21 s车头开始转向且在0.37 s时车头已完成转向并驶离护栏,此时车尾处和护栏



(a) 载重货车横向碰撞过程碰撞力历程曲线



(b) 载重货车纵向碰撞过程碰撞力历程曲线

图 18　载重货车碰撞力历程曲线

Fig. 18　Crash force history curve of heavy truck

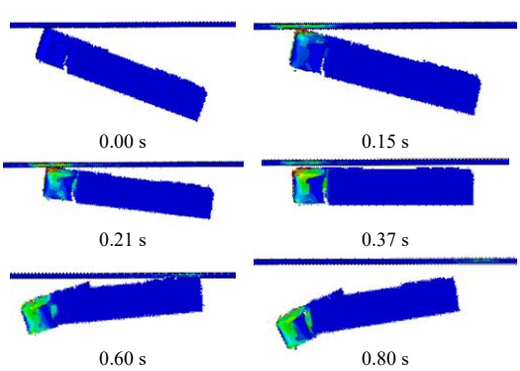


图 19 载重货车碰撞轨迹图

Fig.19　Collision trajectory of heavy truck

平行的位置最后在0.6 s时载重货车整体完成转向并驶离护栏,车尾在整个过程中变形不显著,碰撞轨迹显示载重货车尾部由于甩尾导致护栏与车辆发生轻微二次碰撞,并且其间车辆无翻转、骑跨或冲出护栏的现象,整个过程中,新型护栏能承受49 t大型货车的碰撞而未发生明显破坏。整个转向脱离过程迅速,车辆没有发生翻越护栏现象,从碰撞行驶轨迹可看出新型护栏可有效避免失控车辆冲出道路,护栏状态良好,具有良好的阻挡和导

向功能。

车辆驶出驶离点后的轮迹如图20所示,轮迹经过导向驶出框时均未越出直线F。

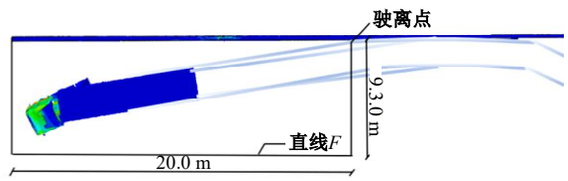
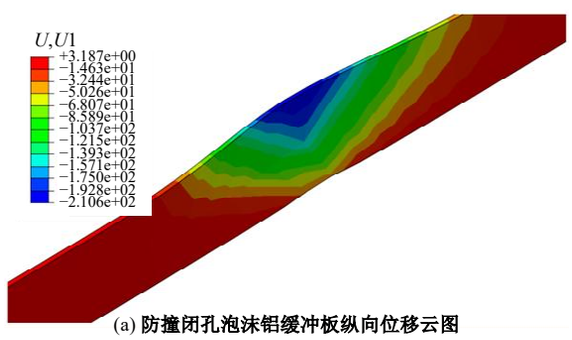


图20 载重货车轨迹图

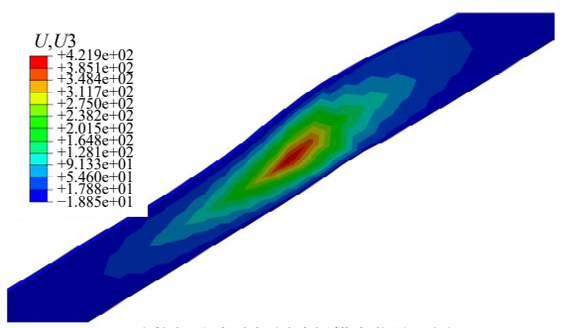
Fig. 20 Trajectory diagram of heavy trucks

6.3 缓冲功能

防撞闭孔泡沫铝缓冲板的特征在于,其既可以纵向压缩又可以横向压缩,能更好地吸收车辆动能,同时保障车辆沿正确方向行驶。由于防撞闭孔泡沫铝缓冲板密度远小于混凝土密度,撞击产生的作用力并不会使缓冲板和混凝土护栏主体共同发生变形,而是使防撞闭孔泡沫铝缓冲板首先发生变形,在防撞闭孔泡沫铝缓冲板变形过程中,将消耗车辆撞击时产生的动能,同时降低对车程人员的伤害程度;当变形达到最大时,防撞闭孔泡沫铝缓冲板失效,车辆冲击产生的剩余作用力继续作用于混凝土护栏主体,图21为车辆撞击防撞闭孔泡沫铝缓冲板后的位移云图。



(a) 防撞闭孔泡沫铝缓冲板纵向位移云图



(b) 防撞闭孔泡沫铝缓冲板横向位移云图

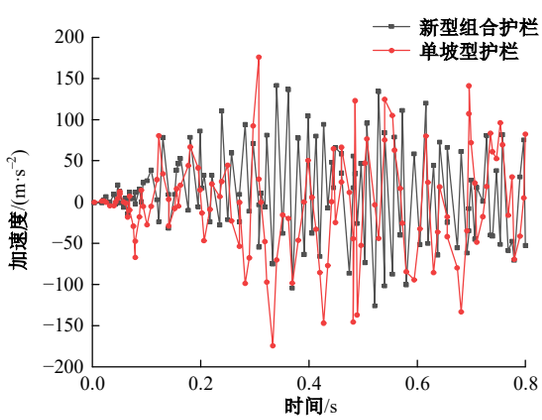
图21 防撞闭孔泡沫铝缓冲板位移云图(mm)

Fig. 21 Displacement cloud diagram of anti-collision closed-cell aluminum foam buffer plate (mm)

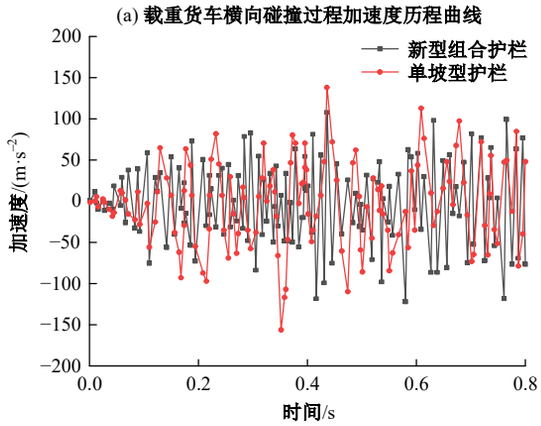
防撞闭孔泡沫铝缓冲板通过自身细胞孔结构压缩,从而较好地吸收车辆冲击荷载所产生的能量,降低了车辆撞击区域的局部刚度,实现压缩变形和摩擦耗能,减小撞击力,有效提高护栏的安全性。

护栏的缓冲作用主要用碰撞后的垂直和水平最大加速度值来描述。碰撞过程中最大加速度越小,护栏的缓冲作用越强,对车辆和乘员的伤害越小。《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01—2013)[18]规定,碰撞后乘员位置的横向(X方向)与纵向(Y方向)加速度分量不得超过200 m/s^2。车辆与护栏碰撞过程中,会受到冲击加速度作用,碰撞过程中车辆重心加速度曲线如图22所示。

从加速度曲线可以看出,货车与护栏碰撞产生的横向加速度最大值为141.458 m/s^2,纵向加速度最大值为122.011 m/s^2,49 t大型货车与新型护栏碰撞的纵横向加速度都低于200 m/s^2,符合规范要求。新型护栏与大型货车碰撞体现了较好的安全防护性能。



(a) 载重货车横向碰撞过程加速度历程曲线



(b) 载重货车纵向碰撞过程加速度历程曲线

图22 载重货车碰撞加速度历程曲线

Fig. 22 Collision acceleration history curve of heavy truck

6.4　吸能功能

为了更好地表示吸能构件的吸能性能，研究者们根据构件的吸能效果，定义了一系列的评价参数[22]，来评价构件能量吸收效果的优劣性，同时评价构件的耐撞性。主要参数有总能量吸收值（Energy absorption，EA）、碰撞过程中结构的平均碰撞力（Mean crushing force，MCF）、峰值荷载（Peak load，Pm）、结构的整体碰撞力效率（Crushing force efficiency，CFE）及比吸能（Specific energy absorption，SEA），各参数具体定义如下。结构的总能量吸收EA表示结构在整个碰撞过程中所吸收的总体能量，按式(6)进行计算：

$$EA=\int_0^{\delta}P(s)\mathrm{d}s \tag{6}$$

式中：δ为结构的压缩位移；$P(s)$为随压缩位移变化的压缩载荷。

平均碰撞力MCF表示结构单位距离变形所吸收的能量大小，MCF值越高，代表结构的能量耗散能力越强，能量的吸收率越高，按式(7)进行计算：

$$MCF=\frac{\int_0^{\delta}P(s)\mathrm{d}s}{\delta} \tag{7}$$

结构的碰撞力效率CFE是指平均碰撞力MCF与结构峰值荷载Pm的比值，用来评价结构峰值荷载与平均碰撞力的一致性，其值越接近1，两者越一致，结构的能量吸收性能越稳定，结构的能量吸收性能就越好，按式(8)进行计算：

$$CEF=\frac{MCF}{Pm} \tag{8}$$

通过计算，$EA=431$ kJ，$CFE=91.25\%$，说明本文提出的新型组合护栏具有较高的冲击力效率。

护栏碰撞过程中，普通护栏受到力的作用，混凝土护栏会超过其抗拉强度而产生裂缝，承载力下降。为验证新型组合护栏的可持续使用情况，通过分析防撞泡沫铝的能量吸收情况及新型组合护栏能量吸收分配情况来检验新型组合护栏结构的可靠性，如图23所示，新型组合混凝土护栏的防撞泡沫铝吸收293 kJ的能量，使混凝土护栏主体只承担了129 kJ的碰撞能量，占总能量的29%，由此可知，新型组合护栏具有更好的有效性及持续使用性。

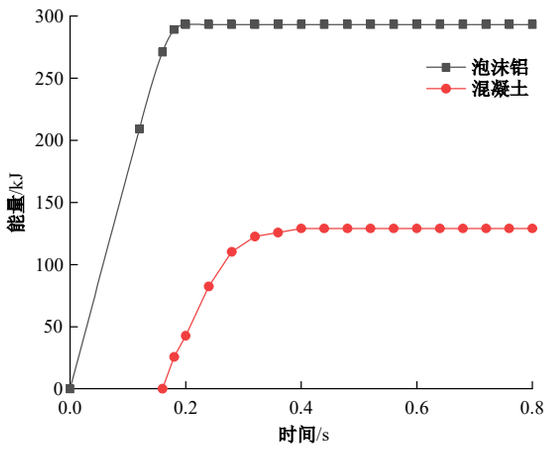


图23　吸收能量分配曲线图

Fig. 23　Absorption energy distribution curve

7　结　论

(1)防撞泡沫铝外包U钢-混凝土护栏满足护栏强度需求，具有良好的防护能力，同时，在护栏迎撞面嵌入部分泡沫铝材料适当降低单坡型混凝土护栏刚度，既对混凝土起到了良好的保护作用，也改善了混凝土护栏的导向性。

(2)载重货车碰撞新型组合护栏产生的纵向加速度与横向加速度均低于200 m/s^2，且新型护栏由于防撞泡沫铝的使用可有效减小大型载重货车甩尾的影响，达到缓和冲击、吸收能量的目的，能够更好地保护乘车人员的安全。

(3)新型组合护栏在受到冲击作用时，吸收能量效果明显，可降低对乘员的伤害程度及结构的损害程度，同时在冲击荷载作用下结构各部分能量分配合理，保障混凝土护栏主体结构的可靠性，可为降低事故严重程度提供新思路。

参考文献：

[1] Amirarsalan M M, Mahdi R, Khaled K. Investigating the relationship between crash severity, traffic barrier type, and vehicle type in crashes involving traffic barrier[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering(English Edition), 2020, 7(1): 125-136.

[2] Zou Y, Tarko A P, Chen E, et al. Effectiveness of cable barriers, guardrails, and concrete barrier walls in reducing the risk of injury[J]. Accident Analysis & Prevention, 2014, 72: 55-65.

[3] Kurtulu E, Yıldız A R, Sait S M, et al. A novel hybrid Harris hawks-simulated annealing algorithm and RBF-based metamodel for design optimization of highway guardrails[J]. Materials Testing, 2020, 62(3):

251-260.

[4] Li Z, Fang H, Fatoki J, et al. A numerical study of strong-post double-faced W-beam and Thrie-beam guardrails under impacts of vehicles of multiple size classes[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 159: 106286.

[5] Noh M H, Lee S Y. Construction tolerance effects of reinforced posts on crash performances of an open-type guardrail system[J]. Thin-Walled Structures, 2017, 120: 138-152.

[6] Gutowski M, Palta E, Fang H. Crash analysis and evaluation of vehicular impacts on W-beam guardrails placed on sloped medians using finite element simulations[J]. Advances in Engineering Software, 2017, 112: 88-100.

[7] Vijayakumar K P, Kumar K P, Kottilingam K, et al. An adaptive neuro-fuzzy logic based jamming detection system in WSN[J]. Soft Computing, 2019, 23(8): 2655-2667.

[8] Shanmugam L, Mani P, Joo Y H. Stabilization of event-triggered-based neural network control system and its application to wind power generation systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2020, 14(10):1321-1333.

[9] Yin H, Xiao Y, Wen G, et al. Design optimization of a new W-beam guardrail for enhanced highway safety performance[J]. Advances in Engineering Software, 2017, 112:154-164.

[10] Yang J, Xu G, Cai C S, et al. Crash performance evaluation of anew movable median guardrail on highways[J]. Engineering Structures, 2019, 182: 459-472.

[11] Sun S, Li H, Zhu C, et al. Study on the anti-collision performance of basalt fiber reinforced polymer beam-column guardrail[J]. Composite Structures, 2021, 276: 114588.

[12] 蒋键锆, 王银辉, 李志勇, 等. 超高性能混凝土节段拼装混凝土护栏受力性能分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(15): 6463-6471.
Jiang Jian-gao, Wang Yin-hui, Li Zhi-yong, et al. Mechanical performance analysis of ultra-high performance concrete segmental assembled concrete barrier[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(15): 6463-6471.

[13] Amudha G, Narayanasamy P. Distributed location and trust based replica detection in wireless sensor networks[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 102: 3303-3321.

[14] 单成林, 黄兆亮. 圆端形夹层结构桥墩防撞浮箱的碰撞性能分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2019, 47(2): 113-119.
Shan Cheng-lin, Huang Zhao-liang. Collision performance analysis of curved-shaped anti-collision floating box of bridge pier with sandwich structure[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(2): 113-119.

[15] 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.
Song Xu-ming, Pan Peng-yu, Rong Ya-wei, et al. Protection performance of new fabricated guardrail based on collision simulation[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition) 2019, 47(2): 113-119.

[16] 郑植, 耿波, 王福敏, 等. 既有低等级混凝土护栏防护能力提升[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2022, 52(6): 1362-1374.
Zheng Zhi, Geng Bo, Wang Fu-min, et al. Improvement of protective ability for existing low-grade concrete guardrail[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(6): 1362-1374.

[17] JTG D81—2017. 公路交通安全设施设计规范[S].

[18] JTG B05—01—2013. 公路护栏安全性能评价标准[S].

[19] GB50017—2017. 钢结构设计标准[S].

[20] JTG/T D81—2017. 公路交通安全设施设计细则[S].

[21] 郭腾峰, 张志伟, 刘冰, 等. 适应6轴铰接列车动力性的高速公路最大纵坡坡度和坡长[J]. 交通运输工程学报. 2018, 18(3): 34-43.
Guo Teng-feng, Zhang Zhi-wei, Liu Bing, et al. Maximum grade and length of longitudinal slope adapted to dynamic performance of six-axis articulated vehicle[J]. Journal of Transportation Engineering, 2018, 18(3): 34-43.

[22] 邓小林, 杨馥模, 覃善甘. 新型仿竹六边形梯度层级多胞管耐撞性对比分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2024, 54(2): 333-345.
Deng Xiao-lin, Yang Fu-mo, Qin Shan-gan. Comparative analysis on crashworthiness of a novel bamboo-like hexagonal gradient hierarchical multicellular tube[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(2): 333-345.