

新型预制拼装防撞护栏防撞性能研究

胡 苏, 彭佳伟, 刘彬斌

(成都市市政工程设计研究院有限公司, 四川 成都 621000)

摘 要: 为研究一种新型UHPC预制装配式防撞栏杆的防撞性能,以某城市桥梁为工程背景,基于ABAQUS软件建立数值分析模型,在1.5 t小型客车、18 t大型客车和33 t大型货车三种工况下进行实车模拟碰撞仿真,分析不同车辆类型撞击护栏时车辆的运行轨迹、护栏撞击点区域的应力分布和损伤情况,以及护栏的变形、速度、加速度的动力时程响应,研究UHPC预制装配式防撞栏杆的安全性能。结果表明,护栏对大型货车以阻挡作用为主,对小型客车以导向作用为主,预制护栏能够有效阻挡车辆冲出桥梁;车辆撞击时,护栏的损伤部位主要出现在撞击段,对相邻段护栏影响较小;车辆撞击作用下,护栏与UHPC界面处的应力最大,应对两者界面处进行特别设计。

关键词: 预制拼装护栏;UHPC;车辆碰撞;有限元仿真;动力时程

中图分类号: U443.5;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0076-07

Analysis on Anti-collision Performance of New Prefabricated and Assembled Guardrails

HU Su, PENG Jiawei, LIU Binbin

(Chengdu Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 621000, China)

Abstract: In order to study the anti-collision performance of a new type of UHPC prefabricated and assembled guardrail, taking an urban bridge as the engineering background, and based on ABAQUS software, a numerical analysis model was established. The real vehicle collision simulation was carried out under three working conditions of 1.5 t minibus, 18 t bus and 33 t truck to analyze the vehicle trajectory, the stress distribution and damage in the impact point areas of guardrail, and the dynamic time-history response of deformation, speed and acceleration of guardrail, and to study the safety performance of UHPC prefabricated and assembled anti-collision guardrails. The results show that the guardrail is mainly used to stop large trucks and mainly used to guide minibuses. The prefabricated guardrail can effectively prevent vehicles from rushing out of the bridge. When a vehicle collides, the damaged parts of the guardrail mainly appear in the collision section, which has little influence on the adjacent guardrail. The stress at the interface between guardrail and UHPC is the largest under the impact of vehicles. Therefore, the interface between guardrail and UHPC should be specially designed.

Keywords: prefabricated and assembled guardrail; ultra-high performance concrete (UHPC); vehicle collision; finite element simulation; dynamic time history

0 引 言

随着城市交通的快速发展和道路安全标准的提高,对道路安全设施的要求也日益严格。防撞栏杆作为道路安全的重要组成部分,其性能关系到交通参与者的人身安全。因此,具有高防护等级的防撞护栏在保障桥上行车安全方面发挥着至关重要的作

用^[1]。相较于现浇护栏,预制拼装节段护栏因符合城市桥梁绿色施工理念,具有良好的应用前景^[2-4],但传统预制护栏多采用钢材和混凝土材料,在耐久性、环境适应性和维护成本方面都具有一定的局限性^[5]。具体而言,钢护栏易出现锈蚀现象,需要进行防腐处理^[6];混凝土护栏存在耐久性、抗裂性差等问题^[7]。此外,传统护栏在施工效率和成本方面也存在一定的不足,现场施工护栏易受环境因素的影响,容易出现过早劣化、频繁维修等问题^[8]。

超高性能混凝土(UHPC)以卓越的强度、密实度、出色的耐久性和显著的延展性在混凝土结构的

收稿日期: 2025-07-20

作者简介: 胡苏(1991—),女,硕士,高级工程师,从事桥梁隧道设计工作。

通信作者: 彭佳伟(1998—),男,工程师,从事桥梁隧道设计工作。电子信箱: 535916963@qq.com。

局部加固和构件连接方面发挥着重要作用^[9]。同时,UHPC 的使用不仅能显著减小钢筋的锚固长度^[10],还在施工过程中展现出高流动性和良好的和易性^[11],成为预制护栏与桥面连接的理想材料,有效解决现场施工中的质量控制问题。

本文旨在探究一种新型 UHPC 预制装配式防撞护栏在车辆撞击下的防撞性能。以 SS 级护栏为研究对象,采用小型客车、大型客车、大型货车三种车型,基于 ABAQUS 软件建立考虑车皮屈服变形对碰撞能量吸收作用的有限元模型,分析不同车型撞击护栏时车辆的运行轨迹、护栏撞击点区域的应力分布、损伤情况,以及护栏的变形、速度、加速度动力时程响应,评价护栏的安全性能,为 UHPC 预制装配式防撞护栏的设计和应用提供科学依据。

1 工程概况

某城市桥梁采用现浇箱梁结构形式,桥梁防撞护栏等级为 SS 级,采用 UHPC 预制拼装护栏,护栏标准段长 10 m,节段之间设置真缝,护栏高 1.1 m。预制护栏普通混凝土等级为 C40,UHPC 等级为 C150;钢筋采用 HRB400 级钢筋,纵筋及箍筋的直径分别为 10 mm 和 20 mm,UHPC 预埋钢筋直径为 25 mm。防撞护栏由预制段和 UHPC 后浇连接带组成,具体构造和钢筋布置如图 1 所示。

预制防撞护栏节段长度需综合考虑防撞护栏的防撞性能及吊装和安装要求。根据我国的实车足尺碰撞试验经验,单坡面混凝土刚性护栏的变形范围长度为 6 m^[12]。因现场吊装高度高、边界条件复杂、施工工期紧,预制护栏吊装重量宜控制在 150 t 以下,即护栏节段长度需控制在 10.3 m 以下。因此,本例将节段长度设置为 10 m,既大于变形范围长度,也满足护栏的吊装和安装要求。

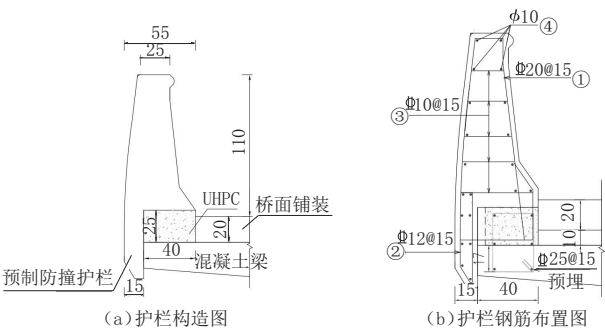


图 1 预制护栏构造(单位:cm)

2 有限元模型建立

本文采用 ABAQUS 显式计算模块 (ABAQUS/Explicit) 对新型 UHPC 预制装配防撞栏杆进行车辆撞击有限元分析。目前,护栏防撞模型计算方法主要有伪静力法、动力法和能量法^[13]。伪静力法将汽车和护栏作为刚性结构考虑,忽略了碰撞能量的消耗,计算过于保守。动力法考虑了车辆与护栏之间的相互作用,具有较高计算精度。能量法虽然考虑了车辆的冲击能量,但忽略了汽车速度、加速度随时间、空间的变化,以及车辆撞击位置对栏杆的影响^[14]。因此,本文采用动力法研究小型客车、大型客车和大型货车撞击作用下护栏的力学性能和动力性能。

2.1 材料性能

2.1.1 UHPC 与混凝土

UHPC 材料参数主要包括单轴受压和单轴受拉两方面,由于 UHPC 的受压性能与普通混凝土较为相似,因此采用 ABAQUS 软件中内置的塑性损伤 (CDP) 本构模型来描述 UHPC 的受压行为,同时基于文献^[15] UHPC 轴向拉伸试验所获得的数据,确定 UHPC 受拉性能相关参数。C40 采用混凝土强度标准值计算,UHPC 与普通混凝土的详细材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

材料	剪胀角/(°)	偏心率	f_{bo}/f_{co}	K	黏度	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
C40	40	0.1	1.16	0.667	0	32 500	26.8	2.4
UHPC	54	0.1	1.07	0.667	0.01	39 500	150	8

2.1.2 钢筋

为模拟实际结构中钢筋的应力应变变化规律,钢筋本构采用三折线模型,弹性模量 $E=200\,000\text{ MPa}$,泊松比为 0.3, $\varepsilon_{wy}=0.02$, $\varepsilon_u=0.2$,钢筋密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$,屈服强度 $f_y=400\text{ MPa}$, $f_u=540\text{ MPa}$ 。

2.2 有限元模型

鉴于护栏在承受车辆撞击时的传力机制较为复

杂,本文采取了整体建模的方法,主要包括车辆、护栏及桥面板等关键结构。本文的研究重点在于深入探究护栏在车辆撞击过程中的力学响应,因此将桥面板简化为弹性构件,以便更准确地模拟实际撞击过程。对于直接参与撞击的车辆和护栏,采用弹塑性本构模型进行计算,以便准确捕捉撞击过程中的非线性行为。

2.2.1 护栏模型

根据《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01—2013)^[12],模型中护栏的长度为30 m(见图2),其中护栏与UHPC后浇连接带采用实体单元模拟,钢筋采用桁架单元模拟。本次模型中护栏长度为30 m,节段之间接缝断开,共有三个节段。钢筋与混凝土、UHPC之间采用“embedded region”连接,护栏节段之间为硬接触,混凝土与UHPC、护栏与桥面板之间采用“tie”进行连接。以车辆行进方向为 x 轴正方向,垂直护栏向内为 y 轴正方向,模型中的点位1为车辆直接撞击点,在点位1,以及相邻点位2、3分别设置一个测量点,提取相关动力参数用于分析护栏受撞时的动力性能。

2.2.2 车辆模型

根据相关标准^[12],SS级护栏的碰撞条件应包括

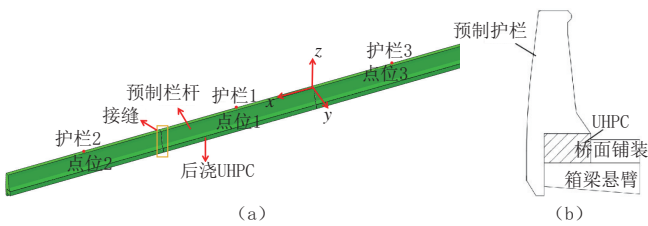


图2 防撞护栏模型

1.5 t小型客车、18 t大型客车和33 t大型货车,碰撞角度为20°,车辆的相关参数如表2所示。模型中车轮、车轴分别采用实体单元和壳单元模拟。其中,车轮依据材料属性划分为轮胎和车毂两部分,采用“无摩擦接触对”模拟车轮的转动和车轴的转向。模型中,实体结构均采用C3D8R单元进行网格划分,车辆壳体等结构采用S4R单元进行网格划分,车辆模型如图3所示。

表2 车辆模型数据

车辆类型	前轮轮距/ mm	车辆总质量/ kg	车轮半径/ mm	轴距/ mm	车辆总长/ mm	车辆总宽/ mm	重心距地面高度/ mm	碰撞速度/ (km·h ⁻¹)	碰撞角 度/(°)
小型客车	1 500	1 500	320	2 610	4 600	1 770	580	100	20
大型客车	2 050	18 000	520	6 010	11 910	2 520	1 290	80	20
大型货车	11 460	33 000	520	7 610	11 910	2 490	1 910	60	20

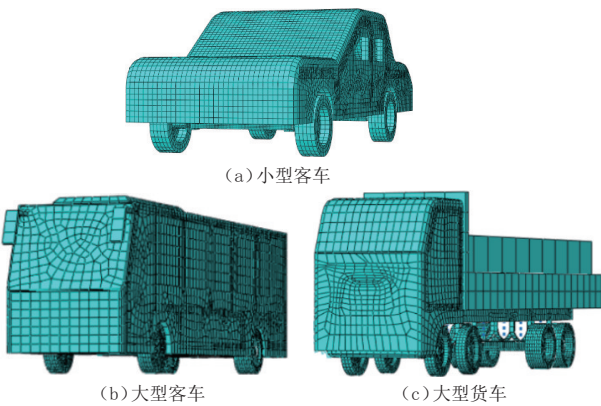


图3 汽车有限元模型

2.3 加载过程

模型的加载过程分两阶段完成。首先为模型添加自重和二期恒载,在smooth step中设置9.8 N/kg的重力加速度来模拟重力作用,二期铺装荷载以Pressure的形式施加,总分析步长为0.015 s。第二步为车辆撞击护栏阶段,通过赋予车辆一定的初速度实现,由于车辆在撞击前需要通过旋转调整角度,因此将预设的初速度通过正交分解后施加。车辆撞击示意图如图4所示,撞击速度的具体数值如表3所示。

3 车辆撞击过程及护栏应力分析

通过撞击前、撞击时和撞击后车辆与护栏之间

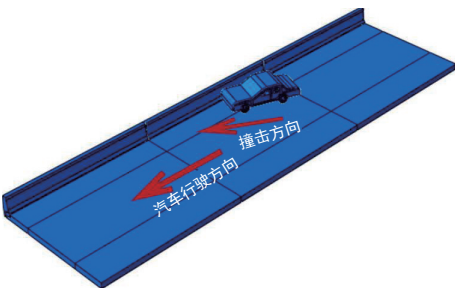


图4 车辆撞击示意图

表3 不同车辆速度参数

车辆类型	纵向速度/ (mm·s ⁻¹)	横向速度/ (mm·s ⁻¹)	夹角/(°)	总速度/ (mm·s ⁻¹)
小型客车	26 300	9 500	20	27 778
大型客车	21 000	7 600	20	22 333
大型货车	15 975	5 815	20	17 000

的夹角变化分析护栏对车辆的导向作用,角度变化越大,说明护栏对车辆的导向作用越强。当护栏遭受撞击时,应力水平是评估护栏力学性能的关键指标,应力越大,表明该区域在撞击过程中承受的力越大,越有可能成为结构的薄弱环节。护栏的塑性应变区域是衡量护栏损伤范围的直接指标,塑性应变区域的扩展程度直接揭示了护栏在撞击后的损伤程度,具体而言,塑性应变区域越大,护栏在撞击过程中的损伤范围越广。通过分析撞击后护栏的应力大小和塑性应变区域的范围可以得出护栏的受力性能

和损伤程度,将塑性应变超过 0.001 的区域定义为护栏的损伤区域,将应力超过 2.4 MPa 的区域定义为护栏的不利位置。

3.1 撞击过程角度变化分析

图 5 为不同车型撞击护栏的角度变化图,由图 5 (a)、(b)可以看出小型客车撞击护栏后,车辆与护栏的夹角发生了明显的变化。撞击前,小型客车与护栏的夹角约为 20°,撞击后仅为 2°左右,说明护栏对小型客车具有较强的导向功能。小型客车虽然速度较快,但护栏使小型客车在撞击过程中有效地朝道路方向发生了偏转,从而避免了车辆冲出桥梁的危险局面。

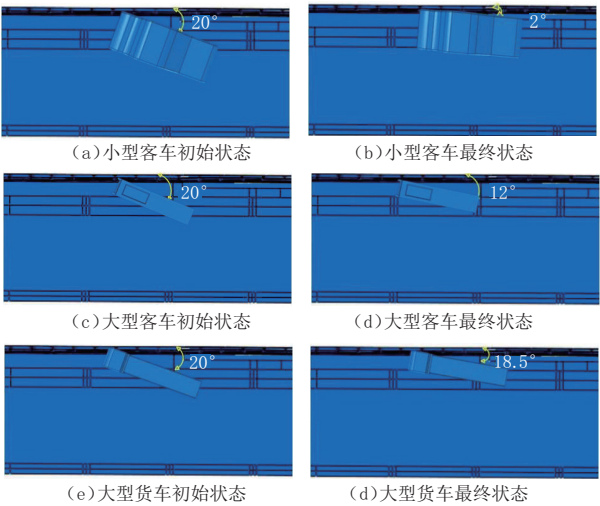


图 5 不同车型撞击护栏角度变化

由图 5(c)、(d)可以看出,大型客车与护栏的夹角从撞击前的 20°减小为撞击后的 12°左右,车辆与护栏之间的夹角发生了一定程度的减小,说明护栏在车辆撞击过程中发挥了一定的导向作用。

由图 5(e)、(f)可以看出,大型货车撞击护栏后,车辆与护栏之间的夹角变化较小。撞击前大型货车与护栏之间的夹角为 20°,撞击后减小值不到 2°,说明护栏对大型货车的导向作用较弱。根据车辆运行轨迹可以看出,护栏对大型货车的导向作用较小。这是因为大型货车重量较重,且后箱较驾驶室重量占比较大,导致撞击后前轮发生翘起,从而降低了护栏的导向作用。

从车辆撞击护栏后小型客车、大型客车和大型货车车辆位置的变化和护栏的受力情况可以看出,护栏均能有效阻挡车辆冲出桥梁,具有较好的阻挡导向功能,护栏对小型客车的导向性能最强,对大型货车的导向性能最弱。

3.2 撞击过程中护栏应力分析

小型客车撞击护栏后,护栏的应力、塑性应变云

图如图 6(a)、(b)所示。预制护栏与 UHPC 交界处的应力较大,最大应力为 6.362 MPa,而撞击点附近 UHPC 的最大应力约为 1.6 MPa,护栏应力沿纵向桥向对称分布。通过塑性应变图可以看出,在小型客车撞击作用下,在撞击位置附近 1.8 m 范围内塑性应变最大值为 0.008,可认为该范围内护栏损伤失效,需进行更换修复,而相邻护栏未产生明显的塑性损伤。

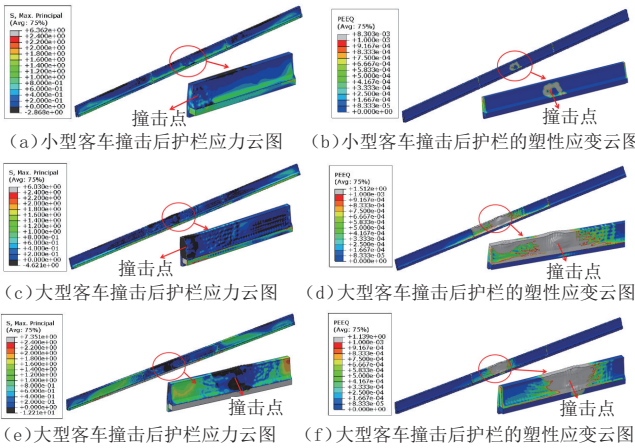


图 6 撞击后护栏的应力及塑性应变云图

大型客车撞击护栏时,护栏与 UHPC 交界处的应力较大,且相邻护栏底部的 UHPC 也产生了较大的应力,撞击点附近处护栏的最大应力为 6.03 MPa,略小于小型客车撞击时护栏的应力,主要原因是在车辆行驶过程中,大型客车的车速较低。由图 6(d)可以发现,大型客车撞击作用下撞击点附近 6.6 m 范围内出现了较大的塑性应变,且在撞击点附近 UHPC 也出现了塑性应变,产生了一定的损伤。撞击后车身与护栏之间的摩擦作用使护栏产生了一定范围的损伤,但依然阻止了车辆冲出桥梁。

大型货车撞击时,预制护栏与 UHPC 交界处应力较大,最大值约 7.35 MPa,且相邻预制节段也出现较大的应力。由图 6(f)可以发现,大型货车撞击下,护栏在撞击位置附近 5.2 m 范围内产生了较大的塑性应变,同时撞击点附近的 UHPC 也出现了塑性应变,在撞击后需对护栏及 UHPC 层进行更换和修复。由于货车速度较小,护栏有效阻止了车辆冲下桥梁,撞击后车身与护栏之间的摩擦使护栏产生一定范围的损伤。这与大型客车撞击护栏时的情形类似。

护栏受到撞击时,预制护栏与 UHPC 接触位置处的应力最大,在设计时应注意预制节段与 UHPC 层连接的牢固性,防止护栏在车辆撞击过程中导致预制节段与 UHPC 层分离。护栏受到车辆撞击后,大型客车对护栏造成的损伤范围最大,长度达 6.6 m 左右,小型客车造成的损伤范围最小。

4 车辆撞击作用下护栏的动力性能分析

在不同车辆撞击作用下,记录点位1(车辆撞击位置)、点位2(对应护栏2)和点位3(对应护栏3)位

置的变形、速度、加速度时程曲线,分析护栏受到撞击后的动力性能,进一步评价护栏的缓冲性能和损伤情况。将动力参数沿护栏的平行方向和垂直方向进行分解,如图7、图8所示。

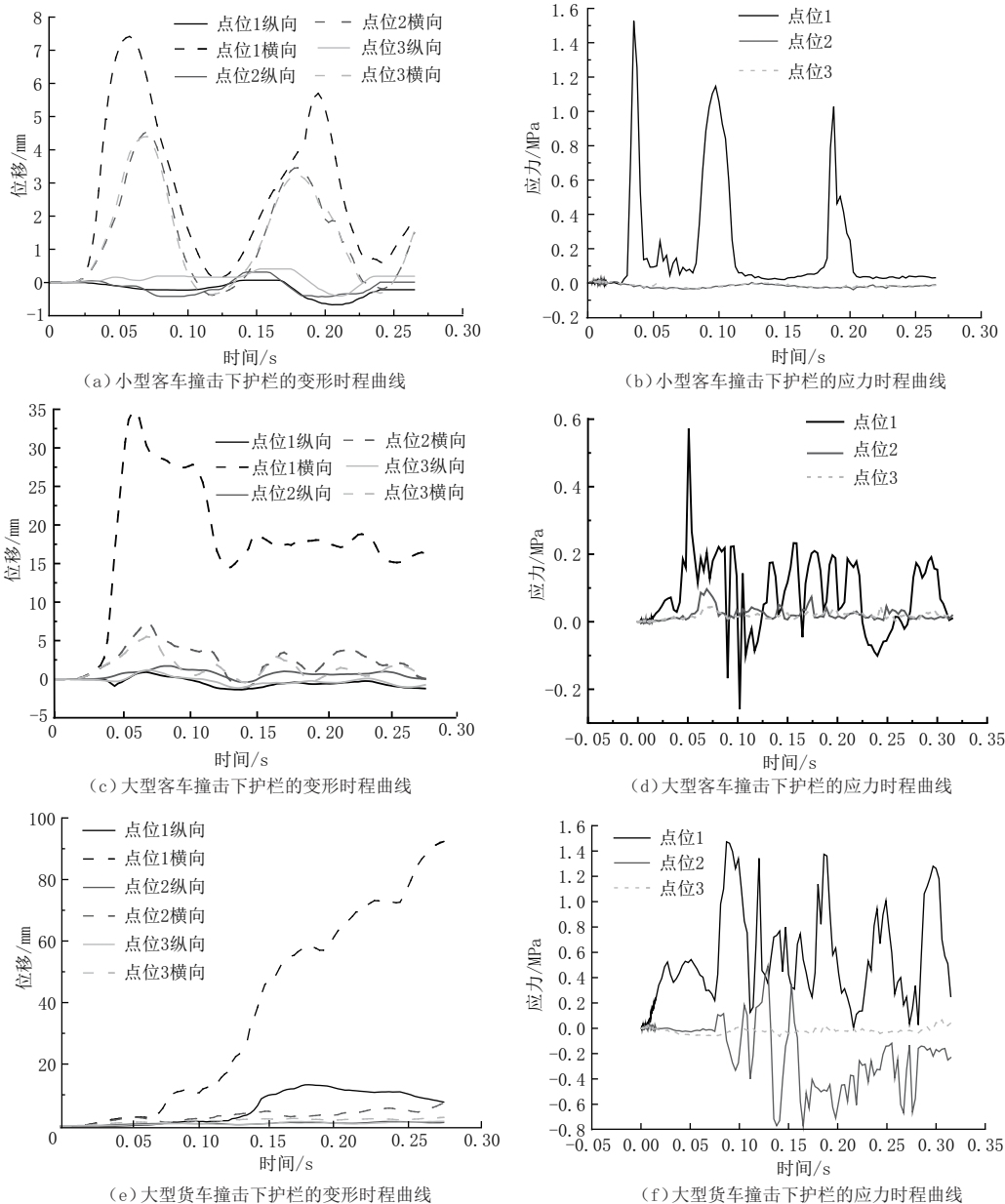


图7 车辆撞击作用下护栏的变形及应力时程曲线

4.1 车辆撞击过程中护栏的变形及应力时程曲线

由图7(a)可以看出,小型客车撞击时护栏的横向变形远大于纵向变形,横向最大变形值为7.4 mm,护栏2和护栏3的变形时程曲线接近且最大横向变形值为撞击点变形值的60%左右。小型客车撞击护栏时横向变形曲线出现了两次峰值,这是由于小型客车撞击护栏的过程分为车头撞击、车头转向、车尾撞击三个过程。第一个波峰为车头撞击护栏时产生,第二次波峰为车尾撞击护栏时产生,车头撞击时产生的应力大于车尾撞击时产生的应力。由图7(b)

可以看出,小型客车撞击护栏时仅影响撞击点附近的应力,并未影响相邻段护栏。

由图7(c)可以看出,大型客车撞击过程中,护栏的横向最大变形值为34.6 mm,且车辆撞击后护栏2的横向变形大于护栏3的横向变形,最大变形值分别为7.3 mm和6.2 mm;车辆撞击后,护栏撞击点位置出现了15.13 mm的残余变形,进一步说明护栏出现了一定的损伤。由图7(d)可以看出,大型客车的撞击主要对护栏1造成了显著的受力影响,对相邻护栏影响较小。

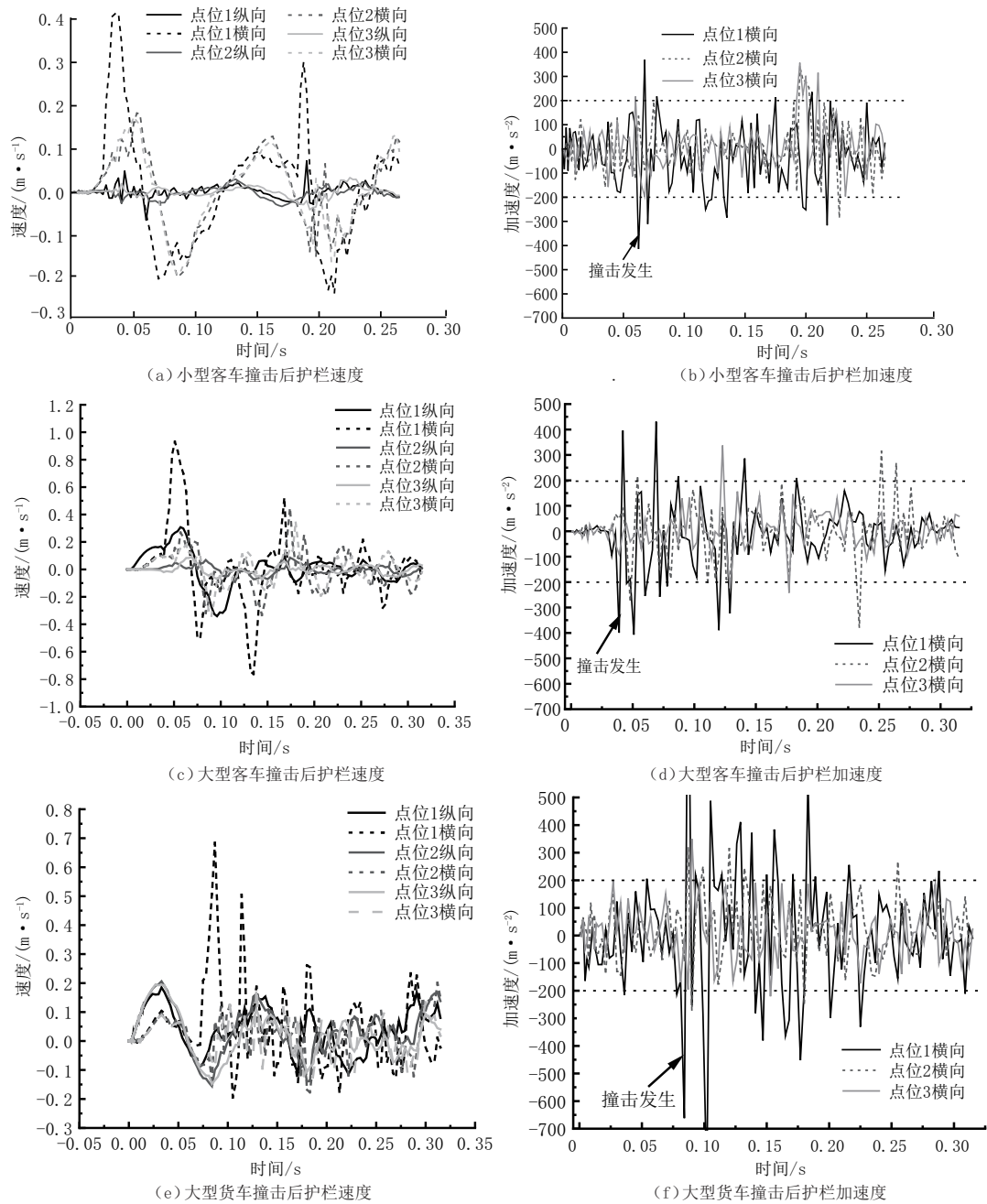


图8 车辆撞击护栏速度及横向加速度时程曲线

由图 7(e) 可以发现, 撞击时护栏撞击位置的最大横向变形值为 92.3 mm, 且护栏 2 的横向变形大于护栏 3 的横向变形, 最大变形值分别为 7.4 mm 和 6.3 mm, 可以看出在撞击过程中护栏 1 的横向变形不断增加, 表明护栏在撞击过程中出现了不可逆的塑性变形, 局部混凝土可能被撞碎。由图 7(f) 可以看出, 大型货车的撞击主要影响护栏 1 和护栏 2 的受力, 护栏 3 的受力基本不受影响。

综上所述, 大型货车撞击下护栏的变形最大, 为 92.3 mm, 大型客车次之, 小型客车撞击下护栏的变形最小。小型客车与大型客车虽然速度较快, 但整体而言对护栏的变形及受力影响较小, 且护栏 2 和

护栏 3 基本不受影响。大型客车与大型货车撞击作用下, 护栏出现了残余变形, 撞击后需要更换部分护栏; 大型货车的撞击对护栏影响较大, 并对行进方向的相邻段护栏(护栏 2)产生了一定的影响。

4.2 车辆撞击护栏的速度与加速度时程曲线分析

图 8(a) 为小型客车撞击过程中护栏的纵横向速度时程曲线, 可以看出小型客车撞击作用下护栏的速度变化呈现出了强迫振动的趋势, 且撞击点位置附近护栏的横向速度远大于护栏 2 和护栏 3, 在撞击过程中撞击点的最大速度为 0.4 m/s。由图 8(b) 可以发现, 在碰撞过程中护栏的加速度出现了两次峰值, 进一步说明小型客车与护栏之间产生了二次碰撞,

碰撞后护栏的加速度小于 200 m/s^2 ,说明护栏对小型客车具有良好的缓冲作用。

由图8(c)可知,在大型客车撞击护栏的过程中,护栏的速度呈现出周期性变化的趋势,且随时间的增加,速度峰值不断衰退,撞击点位置护栏的横向速度远大于护栏2和护栏3,护栏的最大速度为 0.93 m/s 。如图8(d)所示,大型客车开始碰撞时护栏的加速度最大,约 400 m/s^2 ,而撞击结束时护栏2的加速度大于护栏1,达到 300 m/s^2 ,说明大型客车会影响到行车方向相邻段的护栏。

由图8(e)可知在大型货车撞击护栏的过程中,护栏速度的变化趋势与大型客车撞击下的类似,且撞击点位置附近护栏的横向速度远大于护栏2和护栏3,护栏振动的最大速度为 0.7 m/s 。图8(f)为大型货车撞击护栏过程中护栏的横向加速度时程曲线,可以看出碰撞开始时护栏的加速度出现最大值,约 $1\,300 \text{ m/s}^2$,而撞击结束后护栏的加速度较小。

综上所述,大型客车撞击作用下,护栏的速度最大,为 0.93 m/s ;车辆撞击时护栏产生的横向最大加速度均大于 200 m/s^2 ,之后护栏1的加速度开始衰减,护栏2与护栏3的加速度开始增加,说明冲击作用对相邻段护栏的加速度具有一定的影响;大型货车撞击后护栏的最大加速度大于 200 m/s^2 ,说明大型货车对护栏的动力性能影响较大。

5 结 语

本文通过模拟小型客车、大型客车和大型货车等不同车型对SS级新型UHPC预制装配式护栏的撞击,分析撞击过程中车辆位置、撞击点应力和塑性应变的变化,以及护栏变形、速度和加速度的时程曲线,深入探究了该新型护栏的防撞性能,主要研究成果如下:

(1)护栏对小型车辆主要起导向作用,撞击过程中护栏承受二次碰撞,车辆运行状态为车头撞击、车头转向、车尾撞击三个过程。护栏对大型车辆主要起阻挡作用,新型UHPC预制装配式护栏均有效阻挡了车辆冲出护栏,对车辆具有一定的阻挡保护作用。

(2)车辆撞击下,预制护栏与UHPC界面处出现了较大应力,应对界面进行单独设计,并保证预埋钢筋与UHPC能有效地协同工作。

(3)不同车辆类型撞击下护栏的损伤范围不同,

小型客车、大型客车和大型货车撞击下护栏的受损长度分别为 1.8 m 、 6.6 m 和 5.2 m 。本例预制护栏节段长设置为 10 m ,节段之间采用真缝处理,护栏满足防撞性能的要求,且撞击后仅需对受撞击节段进行维修,对相邻护栏影响较小。

(4)大型货车撞击下护栏的变形最大,为 92.3 mm ;大型客车与大型货车撞击作用下护栏出现了残余变形;小型客车与大型客车对护栏的变形及受力影响较小,且对相邻护栏基本没有影响,大型货车的撞击对相邻护栏影响较大。

(5)大型客车撞击作用下护栏的速度最大,为 0.93 m/s ;车辆撞击时护栏产生的横向最大加速度均大于 200 m/s^2 ;大型货车撞击后护栏的最大加速度大于 200 m/s^2 ,说明大型货车对护栏的动力性能影响较大。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Yao J, Wang B, Hou Y, et al. Analysis of vehicle collision on an assembled anti-collision guardrail[J]. Sensors, 2021, 21(15): 5152.
- [3] Li Y, Li Z, Luo Z, et al. Research and application of rapid reconstruction technology to existing bridge guardrails based on UHPC connection[J]. Advances in Bridge Engineering, 2024, 5(1): 24.
- [4] 于海霞,黄祥谈,林宇曦,等.基于预制工艺的高速公路中央分隔带单片式混凝土护栏研究[J].公路,2013(8):293-297.
- [5] 张新晨,方海,张喆,等.新型再生发泡混凝土墙式护栏防撞试验与模拟[J].中国公路学报,2024,37(5):122-137.
- [6] 孙胜江,朱长华,梅葵花.玄武岩纤维复合材料梁-柱式护栏防撞性能[J].振动与冲击,2019,38(21):265-270.
- [7] 刘泽.寒区高速公路混凝土护栏防腐涂层抗氯离子性能仿真研究[J].材料保护,2022,55(6):34-40;47.
- [8] 刘家宝,王立权,刘彦彦,等.利用抛填骨料工艺提升混凝土护栏抗盐冻性能效果分析[J].材料导报,2023,37(增刊1):186-189.
- [9] 曹君辉,樊伟,李立峰,等.基于UHPC的高性能桥梁结构研究与应用[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(11):1-32.
- [10] 张永涛,田飞.预制桥面板UHPC-U形钢筋湿接缝受力性能试验研究[J].桥梁建设,2018,48(5):48-52.
- [11] Zhou Z, Qiao P. Bond behavior of epoxy-coated rebar in ultra-high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 182: 406-417.
- [12] JTG B05-01—2013 公路护栏安全性能评价标准[S].
- [13] 石雪飞,高毅,曹胜会.预制安装桥面板UHPC接缝的受力性能试验研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(12):82-90;124.
- [14] 刘唐志,张翔,刘通,等.基于ABAQUS有限元仿真的车辆碰撞护栏动力响应[J].科学技术与工程,2023,23(25):10997-11005.
- [15] 杲晓龙,王俊颜,郭君渊,等.循环荷载作用下超高性能混凝土的轴拉力学性能及本构关系模型[J].复合材料学报,2021,38(11):3925-3938.