

新型装配式组合护栏车辆碰撞仿真性能分析

马恩高¹, 傅晨曦², 黎思源², 刘交通¹, 王自豪³, 李枝军³

(1. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450004; 2. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014;

3. 南京工业大学, 江苏 南京 211816)

摘要: 提出一种适用于高速公路环境的新型预制装配式组合护栏, 该结构融合刚性护栏的高强度与半刚性护栏的缓冲特性, 创新性地采用超高性能混凝土UHPC(ultra-high performance concrete)后浇开口式组合设计, 旨在提升防护能力的同时, 兼顾经济性与施工便捷性, 其建造成本介于传统钢护栏与混凝土护栏之间, 具备良好的工程应用前景。基于LS-DYNA软件建立可靠的有限元模型, 系统模拟小客车、大客车及货车等多种车型在规定速度下与护栏的碰撞过程, 评估其安全防护性能。在不同类型车辆碰撞条件下, 护栏各连接部位均未发生破坏, 整体结构保持稳定, 表现出优良的防撞性能和抗变形能力, 验证了其在实际道路防护中的可靠性与有效性; 同时, 该设计通过优化材料与施工工艺, 实现了成本效益与安全性能的平衡, 为高速公路安全设施提供了高效解决方案。

关键词: 预制护栏; 超高性能混凝土; 安全性能评估; 数值模拟

中图分类号: U417.1²; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)02-0101-05

Performance Analysis of Vehicle Collision Simulation for New Prefabricated Composite Guardrails

MA Engao¹, FU Chenxi², LI Siyuan², LIU Jiaotong¹, WANG Zihao³, LI Zhijun³

(1. China Construction Seventh Engineering Division Co., Ltd., Zhengzhou 450004, China; 2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing

210014, China; 3. Faculty of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: A new type of prefabricated composite guardrail suitable for expressway environments is proposed. This structure combines the high strength of rigid guardrails with the buffering characteristics of semi-rigid guardrails. The post-poured open combination design of UHPC (ultrahigh performance concrete) is innovatively adopted in order to enhance the protective capabilities while taking into account economy and construction convenience. Its construction cost lies between that of traditional steel guardrails and concrete guardrails, and has a promising prospect for engineering application. Based on LS-DYNA software, a reliable finite element model is established to systematically simulate the collision process of various vehicle models such as small cars, large buses and trucks with guardrails at specified speeds. The safety protective performances of guardrails are evaluated. Under the collision conditions of different vehicle models, none of the connection parts of the guardrail are damaged, and the overall structure remains stable, demonstrating the excellent crashworthiness and anti-deformation ability and verifying the reliability and effectiveness of the guardrails in practical road protection. Furthermore, through the optimization of materials and construction techniques, the design achieves a balance between cost efficiency and safety performance, providing an efficient solution for expressway safety infrastructure.

Keywords: prefabricated guardrail; ultrahigh performance concrete (UHPC); safety performance assessment; numerical simulation

0 引言

护栏作为桥梁中的关键安全组件,其功能不仅

在于引导交通车流,更重要的是在车辆发生碰撞时提供有效的防护,减少事故损失^[1]。在当前桥梁工程建设中,预制装配技术已得到普遍采用。然而,在防撞护栏这一细分领域,相关研究与实践仍显滞后。近年来,随着装配式防撞护栏技术的逐步推进,该领域的研究重点主要集中在连接形式的创新与工程材料的优化上,以平衡防撞性能与工程经济性。

收稿日期: 2025-08-23

作者简介: 马恩高(1989—),男,学士,工程师,从事桥梁施工工作。

通信作者: 李枝军(1978—),男,博士,教授,从事桥梁工程教学研究工作。电子信箱: lizhijun@njtech.edu.cn

Rostami 等^[2]通过试验与数值模拟对采用玻璃纤维筋(GFRP)的混凝土桥梁防撞护栏展开了详细的研究,指出了 GFRP 与混凝土的黏结作用良好,GFRP 在 GFRP—钢筋混凝土桥梁防撞护栏中具有良好的锚固效果。国内外学者针对护栏节段间及与桥面板的连接薄弱环节,探索了灌浆套筒、后张预应力、螺栓连接等方式。研究表明:螺栓连接承载力不足,预应力连接虽具力学优势但增大了位移响应;优化方案(如 UHPC 连接材料、钢结构或共用立柱)在试验中表现出优异抗撞性能,满足高等级防撞标准。但该领域仍缺乏深入的抗车辆撞击机理研究和局部破坏机理分析。本研究创新提出基于 UHPC 连接的预制装配式组合护栏体系,并对该护栏的构造特征进行了系统阐述。

1 护栏方案

在预制节段拼装结构中,连接部位的稳定性对整个构件性能至关重要,因此本研究从保守设计的角度出发,参考护栏防护等级,见表 1,选取了设计速度为 120 km/h 的高速公路上所需的最高防护等级——六级(SS 级)防撞护栏作为研究对象。

表 1 护栏防护等级

公路等级	设计速度/ (km·h ⁻¹)	事故严重程度高	事故严重程度中
高速公路	120	六级(SS、SSm)	五级(SA、SAm)

本研究基于现有研究与工程案例调研,从受力特点、施工效率、经济性等关键点出发,提出了一种采用 UHPC 后浇连接的公路桥梁预制装配式组合护栏,见图 1。此设计结合了刚性护栏与半刚性护栏的优势,且开口式后浇带在施工过程中便于连接钢筋的绑扎,并选取了矩形截面的钢结构横梁(120 mm×80 mm×3.5 mm)与矩形立柱(130 mm×130 mm×6.0 mm)搭配,上部钢结构横梁通过套管的形式与相邻护栏进行连接,且拼接套管的长度取为 45 cm,矩形管立柱与下部混凝土底座之间的连接选取直接埋入的方式,具体如图 1 所示,选取 HR700F 型钢材作为护栏上部钢结构材料。混凝土护栏之间选取纵向连接钢筋作为混凝土底座的连接方式,下部预制混凝土底座采用 C50 混凝土,钢筋采用 HRB400,同时,综合考虑护栏上部高结构高度空间要求,上部钢结构共设两根横梁。工程造价处于适中水平。

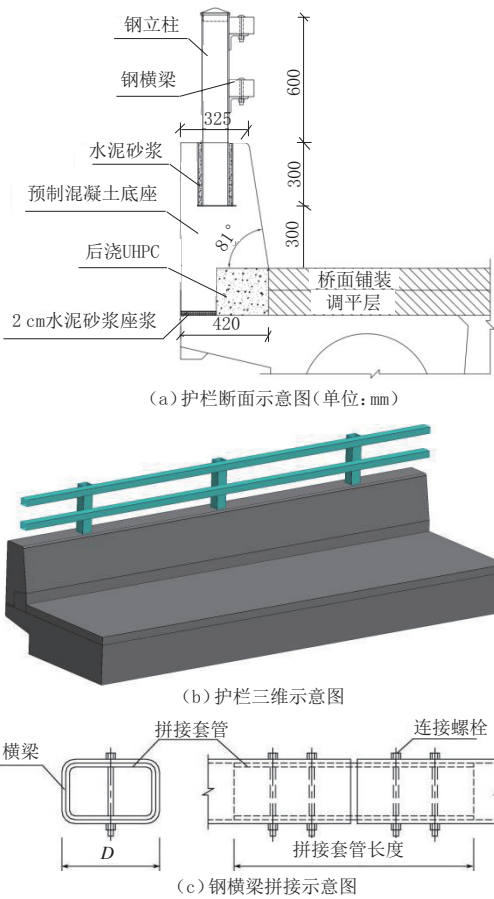


图 1 新型预制装配式组合护栏构造图

2 护栏体系有限元模型

2.1 护栏-车辆有限元模型搭建

本研究车辆模型均由美国国家碰撞分析中心(NCAC)下载,见图 2,试验车辆满足规范^[9]中的相关要求。根据高速公路行驶车辆常见类型,将所有车辆简化为小型汽车、大型客车和大型货车三种类型。在汽车模型的构建过程中,壳单元常用于模拟车辆车身结构,而发动机系统则更多地采用实体单元进行模拟。车辆内部结构十分复杂,使得接触范围和接触形式很难提前预测。鉴于此,为了提高分析效率,在对整车进行模拟时,采用自动单面接触(*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE)来定义车辆内部各部件的自接触。同时,将动、静摩擦系数都设定为 0.2。

混凝土材料本构选择 CSCM 模型,护栏的底座单元类型为 SOLID164 实体单元,钢筋材料本构选择双线性弹塑性模型,钢筋单元类型为 Hughes-Liu 梁单元,混凝土和钢筋通过设置 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 进行耦合,钢结构材料本构选择弹塑性模型,单元类型采用 Belytschko-Tsay 壳单

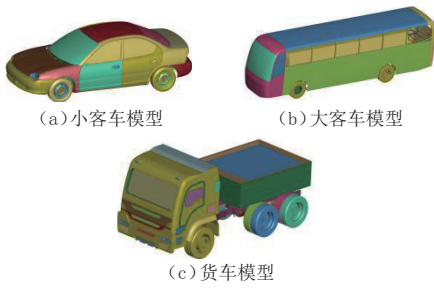


图2 车辆有限元模型

元,上部钢结构立柱和混凝土底座采用绑定(Tie)约束^[10-11]。在确定了护栏的单元类型和材料以后,导入车辆模型,车辆与护栏的碰撞通过设置自动面面接触实现,最终建立了三种车型的车辆-护栏碰撞有限元模型,见图3。

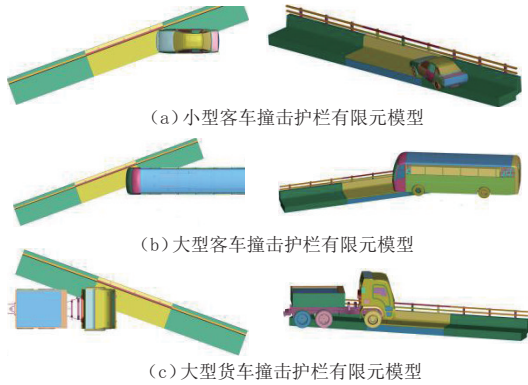


图3 车辆-护栏碰撞有限元模型

2.2 材料本构

(1)钢筋材料本构模型 钢筋的本构模型采用双线性弹塑性模型(*MAT_PLASTIC_KINEMATIC),具体参数设置见表2。

表2 HRB400 钢筋参数标定

钢筋类别	$P(s-1)$	C	ET/MPa	ε_{cu}	E/GPa
HRB400	228 849	7.043	1 100	0.156	200

(2)混凝土材料本构模型 混凝土模型采用CSCM模型,CSCM模型核心在于一个创新的屈服面方程,该方程依据三个核心应力不变量构建,从而能够精确描绘混凝土在多样应力环境下的力学表现。尤为突出的是,该模型采纳了一个平滑过渡的设计,将剪切屈服面与硬化帽盖面完美融合,见图4,这一设计极大提升了模型在模拟混凝土复杂应力响应时的精确度。

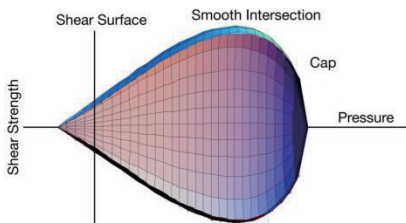


图4 CSCM模型屈服面

该屈服面的特征由三个核心的应力不变量构成: J_1 对应于应力张量的第一不变量, J_2 对应于偏应力张量的第二个特征值, J_3 对应于偏应力张量的第三个特征值。这些不变量由偏应力张量 S_{ij} 和压力 P 定义如下:

$$J_1 = 3P \tag{1}$$

$$J_2 = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} \tag{2}$$

$$J_3 = \frac{1}{3} S_{ij} S_{jk} S_{ki} \tag{3}$$

(3)钢结构材料本构 护栏上部钢结构立柱、横梁、套管均采用*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY模型,此模型在LS-DYNA中应用广泛,常用于模拟金属材料的弹塑性行为,钢结构材料参数见表3。

表3 钢结构材料参数

名称	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	泊松比
材料参数	7 860	210	700	0.26

3 车辆碰撞仿真分析

2013年颁布的规范^[9]将护栏防护等级由五级增加至八级。历史实车足尺碰撞试验数据表明,研究人员发现客车和货车碰撞试验护栏后的运行姿态存在差异,因此,规范^[9]将大中型客车(包括特大型客车)作为碰撞车型之一。六级防护要求的护栏试验碰撞条件应符合表4规定。

表4 碰撞试验条件

防护等级	碰撞车型	车辆总质量/t	碰撞速度/($km \cdot m^{-1}$)	碰撞角度/($^{\circ}$)
六级 (SS级)	小型客车	1.5	100	20
	大型客车	18	80	20
	大型货车	33	60	20

3.1 小客车与护栏碰撞安全性能分析

通过图5可以看到,小客车与护栏发生碰撞后,损伤主要集中在撞击区域以及立柱和底座连接处,且护栏底座损伤因子达到0.799以上的单元占比仅为10.04%,由此可见本护栏的防撞性能表现优异。

图6给出了上部钢结构护栏最大应力出现时刻的应力云图,可以看到,上部钢结构的最大应力在6.2 ms时刻出现,最大应力为212 MPa,未达到HR700F型钢的屈服强度,且安全余量较大。

3.2 大客车与护栏碰撞安全性能分析

如图7所示,护栏的最大动态变形量出现的时间

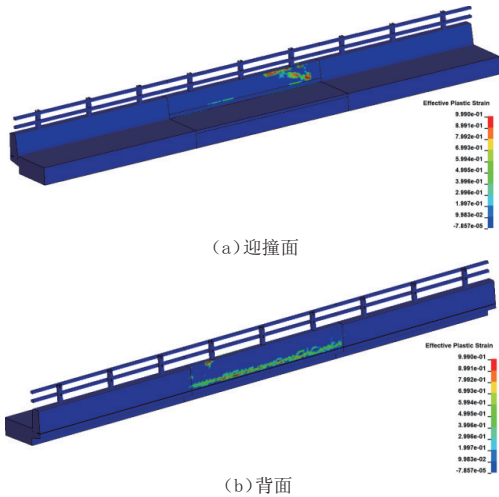


图5 碰撞护栏损伤云图

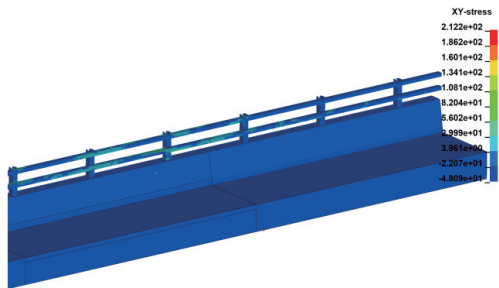


图6 上部钢结构护栏应力云图

为14 ms,发生上部钢结构护栏,节点3102103处,护栏的最大动态变形量为57 mm,符合规范^[7]中对半刚性护栏变形量(300~600 mm)的要求。

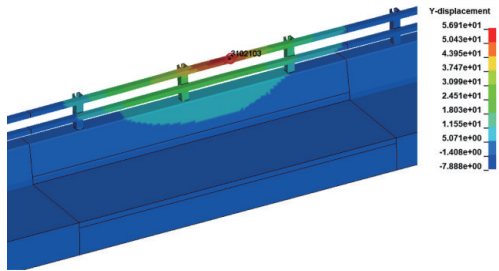


图7 护栏位移云图

图8给出了上部钢结构护栏最大应力出现时刻的应力云图,可以看到,上部钢结构的最大应力在14.5 ms时刻出现,最大应力为570 MPa,未达到HR700F型钢的屈服强度,且安全余量较大。

通过图9所示,发生碰撞后,护栏的损伤主要集中在撞击区域以及立柱和底座连接处,且护栏底座

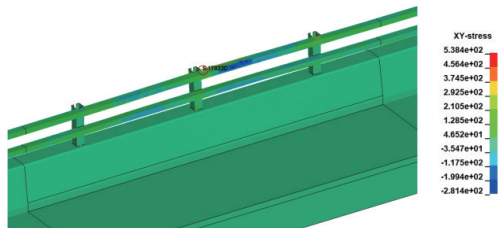


图8 上部钢结构护栏应力云图

损伤因子达到0.799以上的单元占比仅为8.06%,由此可见本护栏的防撞性能表现优异。

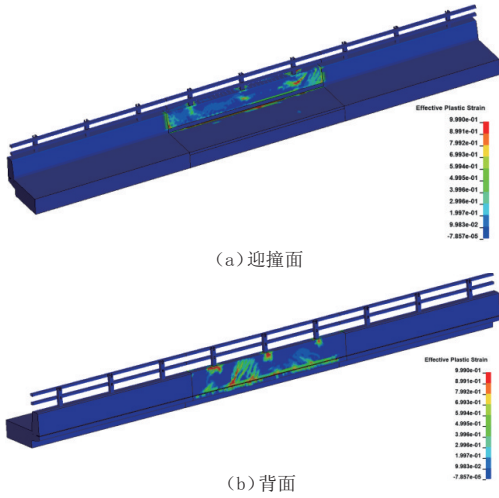


图9 大客车碰撞护栏损伤云图

3.3 大货车与护栏碰撞安全性能分析

如图10所示,护栏的最大动态变形量出现在12.5 ms,发生在上部钢结构护栏,节点3101294处,护栏的最大动态变形量为37 mm,符合规范^[7]中对半刚性护栏最大变形量的要求。

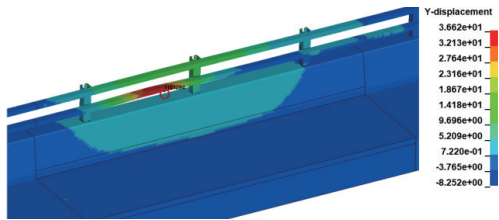


图10 护栏位移云图

图11给出了上部钢结构护栏最大应力出现时刻的应力云图,可以看到,上部钢结构的最大应力同样在14.5 ms时刻出现,最大应力为628 MPa,未达到HR700F型钢的屈服强度,且安全余量较大。

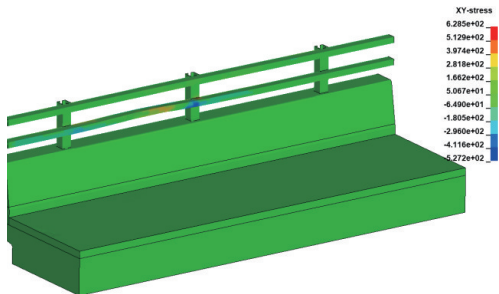


图11 上部钢结构护栏应力云图

通过图12可以看到,货车与护栏发生碰撞后,损伤主要集中在撞击区域以及立柱和底座连接处,且护栏底座损伤因子达到0.799以上的单元占比仅为11.31%,由此可见本护栏的防撞性能表现优异。

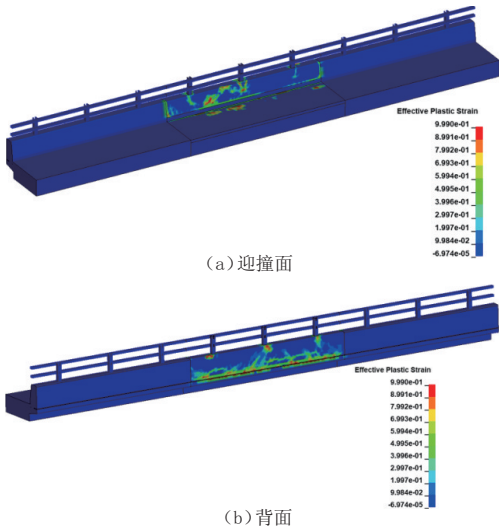


图 12 货车碰撞护栏损伤云图

4 结 语

(1)提出了一种采用超高性能混凝土(UHPC)进行后浇式连接的预制组合型防撞护栏,确定了新型预制装配式组合护栏的结构形式:由上部钢结构和下部混凝土底座两部分组合而成,护栏的总高度为120 cm,上部钢结构通过灌浆套筒的方式直接埋入混凝土底座,上部钢结构材料选择HR700F高强度钢,混凝土底座材料选择C50,钢筋选择HRB400。

(2)通过建立不同车型与护栏的碰撞模型,对新型预制装配式组合护栏的性能进行了评价,结果显示护栏的连接均未失效,同时通过损伤云图显示出护栏的防撞性能表现优异。

参考文献:

[1] El-Salakawy E, Benmokrane B, Masmoudi R, et al. Concrete Bridge Barriers Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Composite

Bars[J]. Aci Structural Journal, 2003, 100(6): 815-824.
[2] Rostami M, Sennah K, Hedjazi S.GFRP Bars Anchorage Resistance in a GFRP-Reinforced Concrete Bridge Barrier[J]. Materials, 2019, 12(15): 2485-2485.
[3] E A Ahmed, B Benmokrane. Static Testing of Full-Scale Concrete Bridge Barriers Reinforced with GFRP Bars[C]//International Conference on Short and Medium Span Bridges.Symposium Paper, 2011.
[4] 焦宇,亢寒晶,龚帅,等.GFRP钢筋混凝土护栏设计与安全性能分析[J]. 城市道桥与防洪,2019(1): 176-18.
[5] Lee J, Jeong Y, Kim K, et al. Experimental and Numerical Investigation of Deformable Concrete Median Barrier[J]. Materials, 2019, 12(19): 3176-3176.
[6] Cho D, Jeong J H, Choi J. A Study of the Bolt Connection System for a Concrete Barrier of a Modular Bridge[J]. International Journal of Engineering and Technology Innovation, 2018, 8(2): 107-117.
[7] JTG D81—2017 公路交通安全设施设计细则[S].
[8] 张海,孙潭,张敬轩.新型装配式混凝土防撞墙动力有限元分析[J]. 北方交通,2019(7): 1-4;9.
[9] JTG B05-01—2013 公路护栏安全性能评价标准[S].
[10] 吴丽丽,刘艳霞,武海鹏,等.L形冷弯薄壁型钢组合钢管混凝土柱轴压性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2025,57(1): 77-91.
[11] 陈安英,王晨曦,王瀚钦,等.大高宽比矩形钢管混凝土柱压弯性能研究[J]. 建筑钢结构进展,2024,26(4): 46-56.
[12] 陈镇,付军,李贯超,等.装配式防撞护栏方案与车辆碰撞仿真性能分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2024,48(3): 515-520.
[13] 王怡祺,张霞,罗春晖,等.一种基于UHPC后浇连接的预制装配式防撞护栏设计[J]. 四川建筑,2024,44(1): 34-38.
[14] 陆罡.预制装配式防撞墙静力试验初步研究[J]. 城市道桥与防洪,2018(2): 166-168;182.
[15] 孙世国,鲁艳朋.超高性能混凝土国内外研究进展[J]. 科学技术与工程,2018,18(20): 184-199.
[16] 邵旭东,樊伟,黄政宇.超高性能混凝土在结构中的应用[J]. 土木工程学报,2021,54(1): 1-13.
[17] 崔冰,王景全,刘加平.UHPC桥梁研究进展与规模化应用技术路径分析[J]. 中国公路学报,2023,36(9): 1-19.
[18] 邵旭东,邱明红.基于UHPC材料的高性能装配式桥梁结构研发[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(2): 160-167.

(上接第 84 页)

能评价[J]. 公路交通科技,2018,35(6): 22-29.
[14] 吴朝阳,任仲山.橡胶粉掺量对高模量沥青及其混合料性能的影响[J]. 武汉大学学报(工学版),2016,49(3): 411-416.
[15] LV S, LIU J, PENG X, et al. Laboratory experiments of various bio-asphalt on rheological and microscopic properties[J]. Journal of

Cleaner Production, 2021, 320(128): 770.
[16] 宋小金,曾梦澜,樊亮.道路沥青材料动力性质的关系[J]. 建筑材料学报,2018,21(6): 920-925.
[17] 黄优,王旭东,刘朝晖,等.SAC13 沥青混合料动态模量梯形梁试验研究[J]. 公路交通科技,2017,34(6): 7-14.