

超高车辆桥梁上部结构碰撞研究与展望

王 伟

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年7月20日; 录用日期: 2025年8月10日; 发布日期: 2025年8月22日

摘 要

随着城镇化建设, 汽车交通量增大, 城市交通负荷持续攀升, 立体交通网络建设已成为缓解道路拥堵的关键举措。在此背景下, 全国范围内立交桥建设规模显著扩大, 但随之而来的超高车辆撞击桥梁事故频发问题日益凸显。这类撞击事故对桥梁结构安全构成严重威胁。据国内外权威统计数据显示, 在航道及高速公路桥梁结构失效事故中, 车船撞击已超越自然灾害等传统因素, 成为导致桥梁坍塌的首要诱因。此类碰撞不仅可能造成桥梁局部损伤, 还可能引发整体稳定性问题, 甚至导致桥梁功能丧失或坍塌。开展超高车辆与桥梁上部结构碰撞机理的系统研究, 建立科学的损伤评估方法, 并研发有效的防护技术措施, 更能为保障桥梁结构安全运营提供关键技术支撑, 对提升城市交通基础设施安全水平和运行效率具有重要意义。

关键词

超高车辆, 桥梁上部结构, 碰撞, 设计理论, 有限元分析

Research and Prospect on Collision of Super-High Vehicles with Upper Structures of Bridges

Wei Wang

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: Jul. 20th, 2025; accepted: Aug. 10th, 2025; published: Aug. 22nd, 2025

Abstract

With the development of urbanization, the volume of motor vehicles has increased, and the load on urban traffic has continued to rise. The construction of a three-dimensional transportation network has become a key measure to alleviate road congestion. Against this backdrop, the scale of overpass

construction across the country has significantly expanded. However, the problem of frequent collisions between overheight vehicles and bridges has become increasingly prominent. Such collisions pose a serious threat to the safety of bridge structures. According to authoritative statistics at home and abroad, in the failure accidents of bridge structures in waterways and highways, vehicle and vessel collisions have surpassed traditional factors such as natural disasters and become the primary cause of bridge collapses. Such collisions not only may cause local damage to the bridge but also may lead to overall stability issues, and even result in the loss of bridge functionality or collapse. Conducting systematic research on the collision mechanism between overheight vehicles and the superstructure of bridges, establishing scientific damage assessment methods, and developing effective protective technical measures can provide key technical support for ensuring the safe operation of bridge structures, which is of great significance for improving the safety level and operational efficiency of urban transportation infrastructure.

Keywords

Overheight Vehicles, Bridge Superstructures, Collision, Design Theory, Finite Element Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究工程背景和目的

近年来我国城市化进程的快速推进,城市人口和机动车保有量持续攀升,城市交通系统面临前所未有的压力。为缓解地面交通拥堵,构建多层次立体交通网络已成为城市发展的必然选择。作为立体交通体系的关键节点,城市桥梁的安全运营直接关系到城市交通命脉的畅通和经济社会活动的正常开展。然而,受部分驾驶员安全意识薄弱、违规操作频发,以及相关监管措施执行不到位等因素影响,超高车辆撞击桥梁上部结构事故屡见不鲜,不仅造成桥梁结构损伤、影响使用寿命,更对城市交通秩序和公共安全构成严重威胁。这一现状凸显了加强桥梁防撞研究和安全管理的紧迫性。2010年以来,我国超高车辆撞击桥梁上部结构事故概况如下:

2010年,北京东三环燕莎桥连续3次遭超高货车撞击,累计造成桥梁伸缩缝损坏30米,1名司机重伤。2011年11月16日,宁波市江北区发生一起典型的车辆-桥墩碰撞事故。一辆满载渣土的重型自卸货车在行驶过程中,因紧急避让前方变道车辆,导致车辆失控并与道路桥墩发生正面碰撞,导致司机被卡在车里面[1]。2012年,北京西四环定慧桥事故导致限高架倒塌,砸中路过出租车致司机重伤。2015年6月25日凌晨3时17分,在S31泰新高速公路北京方向46公里+200米路段,发生一起典型的恶劣天气条件下车辆-桥墩碰撞事故。事故调查原因显示因为突降大雨导致客车操控失灵,撞在桥墩上面[2]。2016年11月30日,唐丰路一辆重载货运卡车在夜间行车期间,由于驾驶员疲劳驾驶,货车撞击该路段桥墩。桥墩下部结构因此受损,货车驾驶舱完全毁坏[3]。2018年3月9号,在美国罗来纳州奥兰治堡县,一辆卡车撞击了公路桥梁桥墩,导致桥梁桥墩垮塌,司机死亡[4]。2021年10月,运输工程机械的重载卡车顶部与道路上的人行天桥发生碰撞,由于这次事故导致人行天桥的主梁发生了较大的位移,部分引桥掉落在绿化带中。2022年3月,甘肃省靖远县境内的一座铁路桥被一辆重型自卸式货车车厢撞击,由于这次事故引起一列运煤火车脱轨,并且坠落至桥下河道,随行4人和火车驾驶员被困在火车车头内。基于对国内外桥梁安全事故的统计分析与工程实践验证,超高车辆撞击已被证实是引发桥梁结构损伤的

主要诱因之一。值得注意的是,即便在基础设施管理水平领先的欧美发达国家,此类事故的年均发生率依然很高,这一现象凸显了开展专项研究的必要性。

2. 研究现状

我国城市化进程的快速推进和立体交通网络的大规模建设,超高车辆与桥梁上部结构的碰撞安全问题已成为当前城市基础设施领域面临的突出挑战。然而,当前国内在该领域的研究仍存在明显不足。现行《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60-2004)[5]虽参考国外标准对车辆撞击力作出了规定(行驶方向 1000 kN,垂直方向 500 kN),但在撞击作用时间、作用区域、能量传递机制以及具体防护措施等方面均缺乏详细的技术指引。国际学术界虽已开展相关实验研究和理论分析,并形成了一定的设计方法体系,但现有研究仍存在系统性不足的问题。更重要的是,由于我国在交通组成(如货车超载现象普遍)、桥梁型式(如大量采用预制装配结构)以及道路运营环境等方面的特殊性,直接套用国外规范显然难以满足我国工程实践的需求。值得注意的是,车辆撞击桥墩、车辆撞击护栏以及船舶撞击桥墩等问题与本研究课题具有相似的动力学特征。国内外学者在这些相关领域已建立了较为完善的理论体系和方法标准。基于国内外相关领域的理论积淀与工程实践经验,立足我国交通基础设施的特殊性,开展超高车辆-桥梁上部结构碰撞安全专项研究,具有多维度的学术价值和实践意义。

3. 车桥碰撞的实验研究

车桥碰撞(包括车撞桥墩、车撞桥梁上部结构)的机理十分复杂,涉及大量的几何非线性、材料非线性、接触非线性以及动力效应,单靠理论研究难度较大,实验研究为此提供了重要手段。试验研究可分为足尺试验和缩尺试验。美国马里兰州以真实案例模拟试验,对车-桥碰撞过程、桥梁破坏模式、如何预防该类事故的发生等进行了针对性研究。国际知名工程咨询机构英国奥雅纳(Arup)公司曾开展过一系列具有里程碑意义的足尺车桥碰撞试验,这些试验为揭示车桥相互作用机理提供了关键科学数据。Woisin [6]制作了缩尺比例为 1/12 和 17.5 的船舶模型,并用这些模型进行了碰撞试验。学者 Abdullatifk Zaouk [7]开展的轻型车辆-桥梁碰撞试验研究具有以下重要特征与研究启示,由于足尺实验经济性不高,足尺实验数量极少,无法对不同车型、不同桥型碰撞问题进行系统化的研究。国内开展的试验研究相对较少。肖岩和肖果[8]了防撞柱的实车碰撞试验,得出了卡车车头变形刚度系数。何水涛[9]设计了超高车辆与钢桥缩尺模型试验。郑秋[10]对钢管混凝土抗冲击性能进行了试验研究。许斌[11]对钢筋混凝土深梁进行了落锤冲击试验。

4. 车桥碰撞的理论研究和设计方法对策

4.1. 车桥碰撞的理论研究

理论分析法是研究车辆撞击桥墩作用力的主要手段,其典型方法包括:静力等效法、应变能法、动力时程分析法以及基于能量守恒的解析方法等,每种方法都建立了相应的力学模型和计算体系。目前,学术界对撞击力的主要影响因素(如车辆质量、速度、刚度特性等)及其与撞击力的定量关系已形成较为完善的理论框架。然而,实际碰撞过程涉及材料非线性、几何非线性以及接触非线性等多重复杂效应,各类理论方法的工程适用性在很大程度上依赖于对车辆-桥墩系统等效刚度的准确模拟与合理简化。刘静[12]采用限定于墩柱响应的近似分析法,比较得出知刚性碰撞和柔性碰撞区别显著,且撞击质量的影响不大。张眷[13]提出一种将汽车和护栏作为一种连续系统的动力计算方法,分析比较得出比静力计算法合理可靠。Krauthammerf [14]考虑材料非线性和应变率效应,基于 Timoshenko 梁理论建立了侧向撞击荷载下 RC 梁(板)的动力学模型,采用显式有限差分法进行求解,并与试验结果进行了比较。虽然目前关于车撞

桥梁上部结构的机理和撞击荷载的理论研究还很缺乏[15],但可参考车撞桥墩问题的有限元分析方法和简化分析方法对此开展理论研究。

4.2. 车桥碰撞的设计方法

我国桥梁规范关于车辆撞击荷载的规定经历了重要演变。2004 年之前实施的旧版通用规范未对车辆撞击荷载作出明确规定。2004 年修订的新规范参考了国外相关标准,首次对车辆撞击荷载作出如下基本规定:车辆行驶方向取 1000 kN,垂直方向取 500 kN 的标准值,二者不叠加考虑;荷载作用点设定为行车道以上 1.2 m 处,并直接作用于被撞构件。然而,现行规范存在明显局限性:其一,未区分桥墩与上部结构等不同构件的撞击特性;其二,未考虑车辆质量、速度等关键参数的影响。虽然既有规范为超高车辆撞击桥梁上部结构的设计提供了基本依据,但我国现行规范在撞击[16]荷载计算方法上仍显不足,亟需结合工程实际开展深入研究,以建立更加科学合理的设计体系。

4.3. 桥梁抗撞击设计对策

国内外学者在桥梁撞击机理和荷载设计方法研究的基础上,对桥梁防撞措施也进行了多方面的探索,主要研究集中在以下两个方向:在设计阶段将车辆撞击荷载纳入承载能力计算体系[17]。目前国内外相关规范对该类荷载的考虑存在差异,部分规范提供了较为详尽的设计参数和计算方法,而部分规范则仅作原则性规定[18],通过改善结构传力机制提升抗撞性能。研究表明,增设横向联系梁可有效改善荷载分布,使桥梁上部结构的横向抗撞击性能获得显著提升[19]。这种构造措施通过改变结构受力模式,在不显著增加材料用量的前提下提高了整体安全性[20]。

5. 有限元分析

理论分析方法在计算精度和应用范围方面存在明显不足,试验方法虽然能获得准确数据,但实施成本较为高昂[21]-[27]。而有限元方法通过科学设置计算参数即可获得可靠结果,随着计算机性能的不不断提升,其计算收敛性和运算效率都得到了显著改善。正因如此,采用有限元软件建立车桥碰撞模型进行研究已成为学界普遍采用的研究手段[28]。现有研究表明,中型及以上吨位车辆产生的撞击力普遍高于我国现行规范的设计取值[29]。值得注意的是,即使在撞击总能量相同的情况下,不同研究得到的撞击力时程曲线仍存在较大差异。这种差异主要源于以下几个方面:首先是数值模拟软件的选择差异,其次是建模精度和建模方法的区别,此外还包括材料本构模型的选用、车桥刚度匹配关系等关键参数,这些因素都会对撞击力峰值、曲线形态以及脉冲持续时间产生重要影响[30]-[33]。从研究现状来看,虽然车辆撞击桥梁上部或下部结构的研究已取得丰硕成果,但现有研究多聚焦于单一构件(如桥墩或上部结构),对桥梁各构件间的协同作用机制探讨不足。在研究对象的选取上,混凝土桥梁占据主导地位,而城市道路系统中广泛应用的钢结构人行天桥,因其自重较轻、结构形式灵活等特点,其抗冲击性能与混凝土桥梁存在本质区别,目前相关研究仍较为匮乏,亟待开展深入系统的研究[34]。通过 LS-DYNA 有限元软件的显示动力分析步对碰撞过程进行数值模拟分析,其对瞬时动力学分析精确有效的特点,能够对碰撞过程进行精确的模拟,分析桥梁上部结构遭受撞击时桥梁的动态响应。技术路线图见图 1。

6. 碰撞桥相关研究

船舶撞击桥墩与超高车辆-桥梁上部结构碰撞问题具有显著的相似性特征。就船桥碰撞机理而言,国内外已开展了较为系统的研究,主要涵盖实验研究与理论分析两个维度。日本学者自 1958 年起持续开展相关研究[35],其特色性工作包括采用钟摆原理模拟船首的低能量碰撞试验,重点考察了船首对船舶舷

侧的撞击效应。我国学者陈泽宏团队同样在该领域做出了重要贡献，他们通过桥墩撞击模型试验获得了具有工程价值的研究成果[36]。在船桥碰撞机理研究中，船撞桥墩的设计方法主要可归纳为以下三类：能量法，基于能量守恒原理，通过计算船舶初始动能完全转化为结构变形能的过程，结合系统变形刚度特性，推导出最大撞击力。该方法的关键参数为船舶动能和结构等效刚度；动量法，运用动量定理，根据船舶初始动量与碰撞持续时间的比值确定平均撞击力。其核心参数为船舶质量-速度积(动量)和碰撞作用时间；经验公式法，通过分析大量实验数据与历史案例，建立半理论半经验的撞击力计算公式。这类方法通常以船舶吨位、速度等关键参数为变量，具有明确的工程适用性。这三种方法分别从能量转换、动量传递和实验统计的角度提供了撞击力计算的解决方案，共同构成了船撞桥墩设计的理论基础和实用工具集。

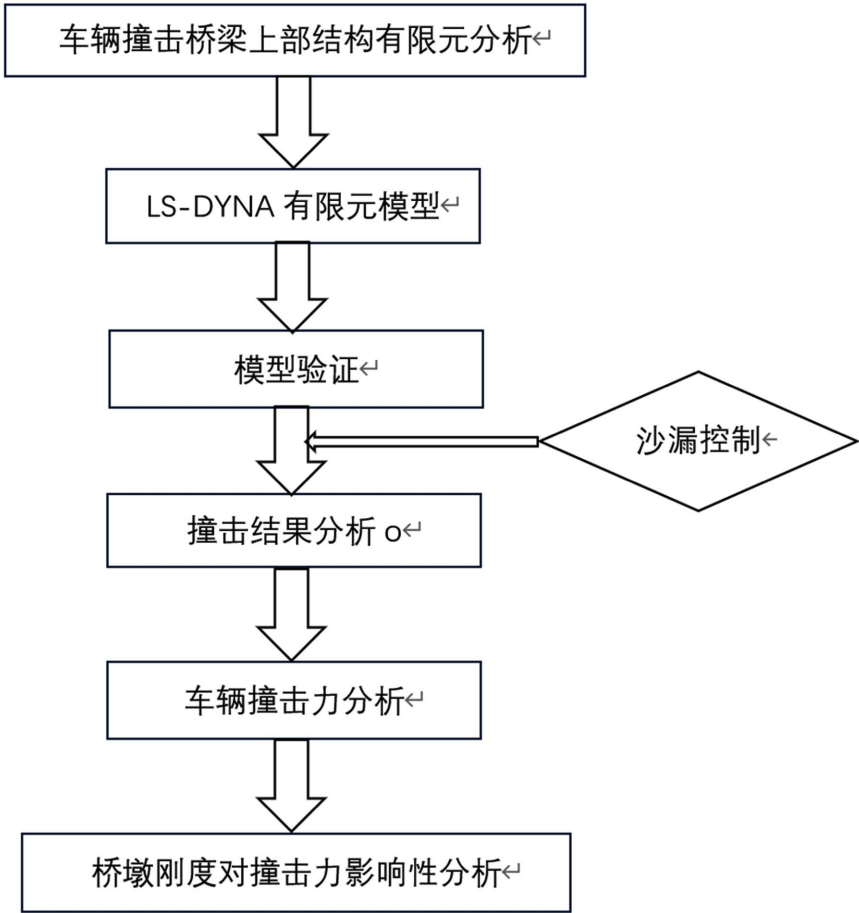


Figure 1. Research technical route
图 1. 研究技术路线图

7. 研究展望

随着城市立体交通体系的快速建设与发展，超高车辆与桥梁上部结构的碰撞风险日趋严峻。然而，国内外对这一新兴问题的研究尚处于起步阶段，工程设计仍缺乏系统性的理论支撑[37]。仍有若干关键问题亟待进一步研究，主要包括以下方面：

(1) 事故现场数据采集与分析研究

事故现场数据是计算机仿真和理论分析的重要依据[38]-[45]。随着结构健康监测和智能交通技术的

快速发展,可在超高车辆撞击事故易发路段布设监测系统,实时采集碰撞过程中的关键参数(如撞击力、结构响应等),并建立标准化的事故数据库,为后续研究提供可靠的数据支撑。

(2) 超高车辆撞击实验研究

有限元分析的准确性高度依赖于参数的合理选取。尽管本文借鉴了相关领域的成熟研究成果,但由于超高车辆撞击桥梁上部结构具有独特的力学特性,部分关键参数(如材料动态本构关系、接触刚度等)仍需通过专项撞击试验进行标定,以提高数值模拟的可信度[46]。

(3) 防护装置优化与设计方法研究

借鉴船撞桥墩的防护经验,合理设置缓冲或吸能装置可显著降低桥梁结构的损伤程度。例如,缓冲装置可降低瞬时冲击力峰值,避免局部破坏;吸能装置可耗散撞击能量,控制整体变形。然而,目前针对桥梁上部结构的防撞装置仍较为匮乏,其工作机理和设计方法尚未形成完整体系。因此,亟需加强新型防护装置的研发,并结合数值模拟与实验验证,建立科学的设计理论[47][48]。

参考文献

- [1] 曹飞翔. 浙江宁波: 江北区发生一起车祸! 渣土货车撞上桥墩致车辆受损严重[Z]. 2011-11-16.
- [2] 孙静波. 泰新高速公路发生客车单方交通事故, 5 人当场死亡[Z]. 2015-06-25.
- [3] 吴艳丽. 唐丰路小汽车“骑上”桥墩驾驶人受伤[Z]. 2016-11-30.
- [4] 韦雅欣. 美国发生货车与桥墩撞击事件已致 2 死 50 伤[Z]. 2018-02-04.
- [5] 中华人民共和国交通部. JTGD60-2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [6] Woisin, G. (1976) The Collision Tests of the GKSS. *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft*.
- [7] Zaouk, A.K., Bedewi, N.E., Kan, C. and Marzougui, D. (1996) Validation of a Non-Linear Finite Element Vehicle Model Using Multiple Impact Data. *National Crash Analysis Center*. <https://doi.org/10.1115/imece1996-1017>
- [8] 肖岩, 陈林, 肖果, 等防撞柱实车碰撞性能研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(11): 1-6.
- [9] 何水涛, 陆新征, 卢啸, 等. 超高车辆撞击钢桥上部结构模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(5): 31-35.
- [10] 郑秋, 霍静思, 陈柏生, 等. 不同温度下钢管混凝土冲击力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(5): 142-147.
- [11] 许斌, 曾翔. 冲击作用下钢筋混凝土深梁动力性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(4): 6-13, 39.
- [12] 刘静, 叶莉, 汪晶. 车辆撞击桥墩近似分析方法及结构防护措施[J]. 中外公路, 2009, 29(4): 331-336.
- [13] 张誉, 赵鸣. 汽车冲撞刚性护栏冲击力的计算[J]. 土木工程学报, 1995(6): 37-42.
- [14] Krauthammer, T., Assadi-Lamouki, A. and Shanaa, H.M. (1993) Analysis of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Structural Elements—I. Theory. *Computers & Structures*, **48**, 851-860. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(93\)90507-a](https://doi.org/10.1016/0045-7949(93)90507-a)
- [15] 戴彤宇. 船撞桥及其风险分析[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2002.
- [16] 陈泽宏. 船舶对大桥桥墩的撞击及其参数测试的初步研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 1995.
- [17] 张景峰, 孔令云, 韩万水, 等. 超高车辆撞击下预应力混凝土空心板桥损伤机理及撞后承载力研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 177-187.
- [18] 尹越, 黄逸群, 王秀泉. 车辆撞击钢结构人行天桥有限元分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2016, 49(S1): 129-136.
- [19] 王秀泉. 车辆撞击钢结构人行天桥仿真分析[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.
- [20] 杨旭, 王蕊, 颜宗旺, 等. 圆端形钢管混凝土桥墩抗车辆力学性能研究[J/OL]. 工程力学: 1-13. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20240402.0904.006>, 2025-04-10.
- [21] 邹育麟, 邹品德, 申鹏, 等. 超高车辆-预应力混凝土箱梁桥碰撞荷载分析及撞后承载力评估[J]. 公路交通科技, 2022, 39(3): 91-99, 132.
- [22] 陈林. 桥墩防车辆撞击研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [23] 张炎圣, 陆新征, 宁静, 等. 超高车辆撞击组合结构桥梁的仿真分析[J]. 交通与计算机, 2007, 25(3): 65-69.
- [24] 赵武超, 钱江. 重型车辆撞击桥墩的破坏模式及抗撞性能分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(1): 67-74, 88.

- [25] 王娟, 钱江, 周德源. 城市桥梁下部结构抗重型车辆撞击的数值仿真分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 88-95.
- [26] 刘莉萍, 刘万锋, 郭建博, 等. 车撞混凝土桥墩精细化建模方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(6): 1666-1674.
- [27] 曹东生. 车辆撞击作用下桥梁损伤破坏与基于性能的抗撞设计方法[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- [28] 赵武超, 钱江, 王娟. 重型车辆撞击下桥墩碰撞力简化模型[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(4): 47-58.
- [29] 周德源, 刘长勋. 车辆撞击作用下 RC 桥墩动力响应[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(2): 11-19.
- [30] Yang, M. and Qiao, P. (2010) Analysis of Cushion Systems for Impact Protection Design of Bridges against Overheight Vehicle Collision. *International Journal of Impact Engineering*, **37**, 1220-1228. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.06.007>
- [31] Lu, L. and Dai, F. (2022) Automated Visual Surveying of Vehicle Heights to Help Measure the Risk of Overheight Collisions Using Deep Learning and View Geometry. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **38**, 194-210. <https://doi.org/10.1111/mice.12842>
- [32] Cheng, S., Qiao, P. and Chen, F. (2016) Numerical Analysis of I-Lam Honeycomb Sandwich Panels for Collision Protection of Reinforced Concrete Beams. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, **19**, 497-522. <https://doi.org/10.1177/1099636215623816>
- [33] 杨旭, 王蕊, 赵晖, 等. 考虑上部质量的双柱 CFST 桥墩抗车辆撞击力学性能研究[J]. 工程力学, 2023, 40(9): 61-73.
- [34] 康俊涛, 张小康. 车辆撞击作用下预制拼装桥墩动力响应数值分析[J]. 武汉理工大学学报, 2023, 45(11): 62-70.
- [35] Ge, J., Jiang, C., Yu, G.J., Su, B. and Sun, T. (2017) Preparation and Research on a Kind of Magnetorheological Grease Materiel Used Anti-Collision System. *Materials Science Forum*, **893**, 395-399. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.893.395>
- [36] 鲍莉霞, 刘赛博, 肖晨, 等. 桥梁防船撞波纹钢夹层吸能结构耐撞性研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(5): 57-62.
- [37] 冯清海. 特大型桥梁钢箱防撞性能研究及碰撞过程推理[J]. 力学季刊, 2018, 39(4): 859-865.
- [38] Thilakarathna, H.M.I., Thambiratnam, D.P., Dhanasekar, M. and Perera, N. (2010) Numerical Simulation of Axially Loaded Concrete Columns under Transverse Impact and Vulnerability Assessment. *International Journal of Impact Engineering*, **37**, 1100-1112. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.06.003>
- [39] Joshi, A.S. and Gupta, L.M. (2012) A Simulation Study on Quantifying Damage in Bridge Piers Subjected to Vehicle Collisions. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, **4**, Article No. 8. <https://doi.org/10.1186/2008-6695-4-8>
- [40] 李伟然. 桥墩车撞数值模拟与防护技术[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [41] 巫祖烈, 全瑞金, 李世亚, 等. 泡沫铝桥墩防撞装置的试验研究[J]. 结构工程师, 2009, 25(3): 125-130.
- [42] 李嵩林, 耿波, 尚军年. 环保型浮式柔性防撞装置试验与数值仿真研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(1): 78-81.
- [43] Nguyen, B. and Brilakis, I. (2016) Understanding the Problem of Bridge and Tunnel Strikes Caused by Over-Height Vehicles. *Transportation Research Procedia*, **14**, 3915-3924. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.481>
- [44] Dai, F., Park, M., Sandidge, M. and Brilakis, I. (2015) A Vision-Based Method for On-Road Truck Height Measurement in Proactive Prevention of Collision with Overpasses and Tunnels. *Automation in Construction*, **50**, 29-39. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.005>
- [45] 雷玲香, 马少群, 沈科. 纤维增强复合材料桥梁防撞设施技术[J]. 中国高新科技, 2019(18): 10-12.
- [46] 肖波, 杨光. Origami 结构在桥梁复合材料防车撞结构中的应用及其耐撞性优化[J]. 工程与建设, 2018, 32(4): 506-509.
- [47] 刘占辉, 卢治谋, 张锐, 等. 桥梁撞击问题 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(S1): 242-251.
- [48] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.