

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.116

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 桥梁撞击问题 2019 年度研究进展

刘占辉,呼瑞杰,姚昌荣,李永乐,李亚东

(西南交通大学 土木工程学院,成都 610031)

**摘要:**桥梁撞击是影响桥梁建设和运营的一个关键问题,学者们对此进行了大量工作,并取得了积极的进展。为进一步促进桥梁撞击与防护方面的研究,回顾了2019年桥梁撞击事件及科学研究现状,主要从船撞、落石撞击、车撞等3方面对目前研究热点进行简要归纳总结,并从已有研究的拓展、新材料、新型结构、新的理论方法等方面展望桥梁撞击灾变和防控的研究趋势。近场动力学研究方法的引入将有助于加深对碰撞本质的认识,也将为桥梁撞击问题分析突破传统思维瓶颈提供新的路径。

**关键词:**桥梁撞击;船撞;崩塌落石;车撞;近场动力学

**中图分类号:**U447 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2020)05-0235-12

## State-of-the-art review of bridge impact research in 2019

Liu Zhanhui, Hu Ruijie, Yao Changrong, Li Yongle, Li Yadong

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** The impact of the bridge is a key problem that affects the construction and operation of the bridge. Scholars have conducted a large amount of research on it and made positive progress. To promote research on the impact of bridges, the authors review the bridge collision events and the current situation of scientific research in 2019, summarize the current analysis hot spots from three aspects of ship collision, rockfall impact and vehicle collision, look forward to the research trend of bridge collision disaster, prevention and control, and the research trend of bridge impact disaster and prevention and control from the aspects of existing research expansion, new materials, new structures and new theoretical methods, among which the introduction of peridynamic research method will open a new window for the mechanism analysis of bridge collision. Among them, the introduction of peridynamic research method will help to deepen the understanding of the nature of collision, and provide a new path for the analysis of bridge impact problems to break through the bottleneck of traditional thinking.

**Keywords:** bridge impact; ship-bridge collision; rockfall impact; vehicle-ship collision; peridynamic.

**收稿日期:**2020-04-12

**基金项目:**四川省科技厅应用基础研究(2020YJ0077);中央高校基本科研业务费(2682016CX010);西南交通大学高层次人才队伍建设科研项目(10101X10096077)

**作者简介:**刘占辉(1983-),男,博士,主要从事大跨桥梁结构动力灾变及其振动控制研究, E-mail: liuzhanhui@swjtu.edu.cn.

**Received:**2020-04-12

**Foundation items:** Applied Basic Research Project of Sichuan Science and Technology Department (No. 2020YJ0077); Science and Technology Innovation Project for the Central Universities (No. 2682016CX010); Scientific Research Projects for High-level Faculty in Southwest Jiaotong University (No. 10101X10096077)

**Author brief:** Liu Zhanhui (1983-), PhD, main research interests: dynamic disaster and vibration control of long-span bridges, E-mail: liuzhanhui@swjtu.edu.cn.

桥梁是“跨越障碍的通道”。桥梁的建设与人类社会息息相关,从“横木为梁”、“结藤成索”、“垒石为拱”3种古代基本桥式的诞生,逐渐发展演变到现代桥梁的造型多样、超长大跨,其跨越对象为大江大河、深沟峡谷、海峡滩涂、既有线路等,对应的就有跨河桥、跨谷桥、跨海桥、跨线桥等。据中国2019年桥博会公布数据显示,在长江干流上已建成的各类长江大桥就达115座。这些桥梁构成了当地交通系统的关键环节,并进一步推动着社会和经济的发展。

对于跨河桥、跨海桥,一般有通航的要求。无论是大跨缆索承重桥梁的桥塔结构还是梁桥、拱桥等的墩台对河流和海洋环境都有一定程度的影响,同时,通航船只和漂流物对桥梁的撞击作用也是跨河、跨海桥面临的一大威胁。而山区修建的跨谷桥与平原和浅丘地区的桥梁相比,通常具有“两高一大大”(桥面高、桥墩高,桥梁跨径大)的显著特征<sup>[1]</sup>。跨谷桥梁施工和运营阶段都有可能面临地震、崩塌滚石、泥石流、滑坡等多种灾害的侵扰,其造成破坏的事故并不少见,崩塌滚石、泥石流等对桥梁的撞击问题值得重视。跨线桥遭受汽车撞击的事故时有发生,损失一般不大;跨铁路桥梁如若列车脱轨,其撞击后果不堪设想。

桥梁撞击问题是既有和在建桥梁工程长期面临的问题;大跨桥梁等复杂结构的灾变和防控问题也被列入了2006年国务院颁布的《2006—2020年国家中长期科学和技术发展纲要规划》中。2019年国家自然科学基金在“桥梁撞击与防护方面”批准资助的项目有4项,2019年仍在执行期的有7项。桥梁撞击及防治是国家发展需求,也是近年来的研究热点。

2020年作为“十三五”科技创新规划的收官之年,也是面向“十四五”部署科技重点任务的关键之年。“明镜所以照形,古事所以知今”,笔者主要回顾了2019年桥梁撞击事件及科学研究现状,对目前分析热点进行归纳总结,展望撞击灾变和防控的研究趋势。

## 1 桥梁船撞事故及船桥碰撞研究进展

跨越水上航线的桥梁结构(如跨河桥、跨海桥等)船撞事故频发,其导致的桥梁损伤、倒塌危害巨大;船撞风险在桥梁结构规划、设计以及运营全寿命过程中不可忽视。1980年,美国阳光大桥船撞事故

之后,桥梁界开始对船撞问题高度重视。美国交通部统计数字显示:大型桥梁通航运营期间,约1/10会因船撞而垮塌,如不加以重视,甚至会达到50%以上<sup>[2]</sup>。在中国,船撞桥事故也频繁发生。仅以武汉长江大桥、南京长江大桥和重庆白沙沱长江大桥这3座桥为例,自建成以来,桥梁船撞事故就分别发生了70起、30起和100起以上。据不完全统计,仅发生在中国长江、珠江、黑龙江三大水系干流上的船撞桥事件就达到300起以上<sup>[3]</sup>。2019年发生了多起桥梁船撞事故:1月,广深高速的东洲河桥B2~B3通航孔被一艘货船船头传送带的支撑柱碰撞,导致桥上部承重梁体严重受损;4月6日,巴西帕拉州首府贝伦一座横跨莫茹河(Moju)的桥梁遭货船撞击坍塌;4月20日凌晨,中国四大古桥之一的潮州广济桥遭货船碰撞,多处受损;7月10日,中国湖南衡阳衡东县洋塘河坝水电站桥被3艘失控货船轮番撞击;7月16日,中国广西贵港平南大桥拱肋被“粤云138”砂石船撞击,船舶驾驶台与大桥桥拱碰撞,破损严重。在桥梁的非通航孔跨,由于船舶操作失误也会有发生船撞事故的风险。如2008年3月27日,货船撞上在建的金塘大桥非通航孔桥箱梁,被撞落后压在肇事货船的驾驶台上。另外,随着民用航空器使用越来越普遍,偶尔也有飞机撞桥事件发生,如2016年7月20日,幸福通用航空一水上B-10FW飞机在由上海金山—舟山航线起飞过程中撞上大桥发生事故。

桥梁船撞规范或标准目前有美国道路工程师协会(AASHTO)于1991年编写的《公路桥梁船撞设计指南》(该指南于2009年进行了修订),其专门针对美国内河桥梁提出了基于风险的船撞设计技术标准和设计方法。1996年美国铁路工程协会(AREMA)出版了《防撞保护系统设计规范》。欧洲用于指导桥梁船撞设计的规范是1997年出版的欧洲统一规范中的Eurocode 1.2.7分册。中国《公路桥涵设计通用规范》(JTGD 60—2015)和《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)对船撞有所涉及;中国第一部专门的船撞设计指南是地方标准《重庆市三峡库区跨江桥梁船撞设计指南》(DBJ/T 50-106—2010)。中国公路学会2018年发布了《公路桥梁防船撞装置技术指南》,以此来规范公路桥梁防船撞装置的技术要求,提升桥梁防船撞产品的质量水平。

桥梁船撞理论分析模型研究方面:张可成<sup>[4]</sup>综

合考虑航迹、航角、停船距离和水位等因素的影响,优化了现有船撞桥梁风险分析模型,考虑了变动水位的影响。考虑水位因素的船-桥碰撞概率模型表示为

$$P_c = \int_{z_1}^{z_2} f(z) \int_{\mu_x - 3\sigma_x}^{\mu_x + 3\sigma_x} f(x) \int_0^D \lambda(s) \times [1 - F(s)] \int_{\theta_1}^{\theta_2} f(\theta) d\theta dx dy dz \quad (1)$$

式中: $F(z)$ 为水位概率密度。其他符号具体含义参见文献[4],此处不再赘述。

Song等[5]提出了一种简化的桥梁冲击荷载时程分析模型,以预测桥梁在船舶撞击下的动态响应。其简化模型通过一种用抛物线表达式修正的半正弦波函数来捕捉冲击力时程的上述特征,函数的形式为

$$F_s(t) = c \left[ 1 + \alpha_1 \left( \frac{t}{T} \right) + \alpha_2 \left( \frac{t}{T} \right)^2 \right] \sin \left( \pi \frac{t}{T} \right), \quad (0 \leq t \leq T) \quad (2)$$

该模型的有效性在两个桥梁模型的案例分析中得到了验证。宋彦臣等[6]还以一座连续梁桥为例进行了接触碰撞反应与撞击力时程反应分析,并将修正半波正弦荷载模型的响应求解误差分为3类,并讨论了这3种误差对结构响应的影响大小。

桥梁船撞响应分析方面:跨通航水道特大型桥梁结构设计的一个关键问题是保证桥梁在船舶碰撞事故中的安全性。袁龙文等[7]以润扬长江大桥为背景,采用LS-DYNA分析了桥墩混凝土强度、配筋率、船舶行驶速度等主要影响因素对内河桥梁受船舶撞击的具体作用规律。付涛等[8]对AASHTO规范公式、欧洲规范公式、铁路规范公式、陈诚公式的船撞力计算结果进行比较,总结了各种方法的适用性、考虑的影响因素和优缺点,并给出了工程建议。Wan等[9]以石臼湖大桥为研究背景,提出了简化船舶模型,进行了准静态压缩试验和数值模拟,研究了船舶的静刚度特性并与其动力特性进行了比较;以此船舶模型为例,分析了撞击后桥墩的损伤过程和破坏模式,之后对欧洲规范和AASHTO LRFD桥梁设计规范规定的设计冲击荷载进行了评估。赵英策等[10]以船舶撞击力、撞击持续时间等为主要研究目标,从船舶撞击角度、受撞沉井基础顶面与海平面高差等方面考虑,研究了跨海大桥撞击力设防标准,并探讨了撞击力与撞击角度的关系。邓江涛等[11]为研究船撞桥过程中深水桥梁的碰撞力及响应,在

对比等效密度系数法和流体有限元方法的基础上,提出了考虑墩-水相互作用的桥墩与船舶撞击的实用分析方法。

桥梁下部结构(包括桥墩和桥塔)应有足够的防撞能力,这方面引起了足够的重视,但上部结构的撞击却往往被忽略。Sha等[12]建立了船舶结构和桥梁的高保真有限元模型,研究了船舶冲击作用下桥梁的结构响应;并提出了一种简单而有效的加固方法——“双层横隔梁端部”,有效地提高了钢主梁的横向抗冲击性能,并很好地控制了成本和施工工作量的增加。

桥梁船撞风险评估方面:罗嘉敏等[13]调查广东高速公路某次船撞桥梁上部结构事故原因时,结合人工接触式检查结果,确定损伤实际状况,之后采用静载试验实测车辆荷载下的结果,总结梁体变形、关键截面应变和主梁裂缝等指标的分布规律,评估船舶撞击的影响,然后提出维修建议。李志荣等[14]从分析危险源与船撞桥事故的关系出发,提出人、船、桥、环境、管理等5类船撞桥危险源;结合DPSIR模型中各指标间的制约关系,从驱动力、压力、状态、影响、响应等5方面筛选出12个评价指标,建立船撞桥风险评价指标体系,并对其进行风险评价。刘静文[15]以武汉天兴洲大桥为工程背景,建立ANSYS全桥模型,研究了在相同船舶撞击下不同碰撞角度对桥梁横向位移响应的影响;得到了塔顶对碰撞较为敏感、通过增大碰撞角能有效降低桥梁船损风险的结论。

Chen等[16]从海事安全管理的宏观角度,对船舶碰撞事故定量风险分析进行了系统回顾和分析,探究了主要利益相关者及其在风险分析中的偏好,并对藤井和Shiobara(1971年)及Macduff(1974年)提出的框架下的风险分析方法进行了研究。在因果概率分析中,统计分析、故障树分析和贝叶斯网络模型被选为主要的类别。

在船桥碰撞预警研究方面:Wu等[17]提出了一种基于模糊逻辑的船桥碰撞预警方法,该方法综合考虑了船舶特性、桥梁参数和自然环境。具体来说,建立了包括输入层、模糊推理层和输出层的3层框架,将碰撞风险分为临界条件和自然环境两部分。从船舶位置、船舶轨迹方向、船舶与桥梁的距离、船舶速度等方面分析了船桥碰撞情况。这些因素与自然环境一起作为输入变量,然后通过引入船-桥碰撞

条件,对船-桥碰撞过程中的船舶细节和桥梁参数进行了考虑和模糊化,建立 IF-THEN 规则,进行模糊推理,得出船舶与桥梁的碰撞风险。在以后的工作中,可以将避碰模块与船舶桥梁避碰系统的碰撞评估模块结合在一起。还应考虑船舶碰撞,以获得桥梁航道区域的综合海事安全结果。此外,由于作者只使用了一些具体的场景进行验证,因此,在未来的实际船桥碰撞预警中,需要应用该模型进行进一步的分析。

陈琼等<sup>[18]</sup>提出的智能化桥梁管理系统主要包含 3 个方面:主动安全防护系统、复合防撞及报警系统、可追溯式监控系统,通过主被动结合的方式可实现对船撞桥事故的全方位、多角度管控,为桥梁防撞提供了有益的思路。

在桥梁防船撞设施方面:船舶撞击是航道桥墩的潜在危险。为避免船舶与桥墩直接接触,目前,桥梁设计中广泛采用不同类型的防护结构,以防船舶撞击。马志敏等<sup>[19]</sup>基于 ANSYS 软件分析了某大桥钢管防撞墩结构的 15 个不同撞击点在船撞工况荷载作用下的应力分布情况,并提出了新的防撞墩结构。其通过减小系杆跨度、增加节点刚度和撞击点系杆数量等方式改进防撞墩性能的措施值得借鉴。王纪锋等<sup>[20]</sup>以京港澳高速沙河大桥某两个桥墩进行防撞能力评估,并针对 500 t 级船舶撞击下桥墩自身抗撞能力不足的问题,添加了自浮式钢覆复合材料防撞设施,船舶撞击力削减了 26%,基本满足桥梁设防要求。Wang 等<sup>[21]</sup>采用有限元模拟方法,对广东湛江海湾大桥采用的柔性浮式防撞装置进行了有效性评价。

Zhu 等<sup>[22]</sup>提出了一种新颖的纤维增强聚合物(FRP)蒙皮泡沫填充格构复合材料防撞体系(FLCBS),并将其作为桥墩抗船舶碰撞的防护结构。利用显式有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 进行计算,峰值冲击力的显著减小和冲击过程的有效延长表明了 FLCBS 的优越性能,部分结果可见图 1。模块化的制造和更换、方便快捷的安装和高度可设计的结构,使得 FLCBS 在船舶碰撞中作为桥梁防护结构具有很大的吸引力。左杨等<sup>[23]</sup>以重庆白居寺公铁两用斜拉桥为背景,基于 LS-DYNA3D 对船撞荷载作用下该桥的梁轨相互作用进行了分析研究。选取钢-泡沫铝填充材料的防撞钢套箱装置,并将其安装于桥塔下部适当位置处,跨中和 1/4 跨处的梁轨

相对位移有了明显改善,保证了桥梁使用的安全。樊伟等<sup>[24]</sup>提出了由钢和超高性能纤维混凝土(UHPFRC)组成的新型护舷结构,并对其低速冲击行为进行了落锤冲击实验和数值研究,证实了其耐久性和耐用性,提出可通过优化配置的方式以挖掘该装置的防撞潜力。

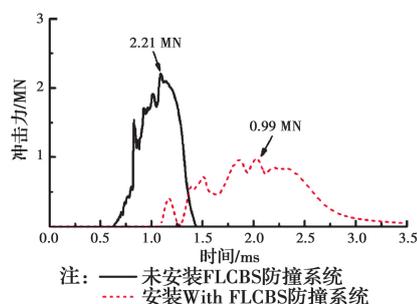


图 1 速度为 1 m/s 时正面碰撞冲击力历程<sup>[22]</sup>

Fig. 1 The time history of the impact forces for head-on collision with a velocity of 1 m/s<sup>[22]</sup>

陈国虞等<sup>[25]</sup>在柔性耗能防撞装置的选型、研发及相关试验技术上取得了明显的进步并已应用到能通行 5 万 t 级船舶的湛江海湾大桥、象山港跨海大桥等实际工程中。

船舶撞击桥梁上部结构是船撞桥梁事故的种类之一。在上部结构防撞限高架的设计、施工和选型方面,徐光中<sup>[26]</sup>对川槎大桥通航孔水上防撞限高架进行了刚性和柔性方案比选、设计及施工方法介绍,属于中国首例水上钢结构限高防撞工程。郑宏鸿<sup>[27]</sup>结合实际工程案例,总结了防止超高船舶撞击桥梁上部结构的“软措施”,并对上部结构设置的“钢桁架”和“固定拉索”这两种水上限高架进行受力分析和计算,给出了其适用范围。林光峰<sup>[28]</sup>以对某连续箱梁桥上部结构被船舶撞击事故调查为出发点,提出 3 种防船撞技术措施并进行了比选,确定了具体的对策。这些分析计算均可作为桥梁工程上部结构防撞提供经验和参考。

船撞桥问题属于典型的交叉学科,船撞桥事故的发生涉及人、船舶、通航条件和环境、管理等多个方面。为了从根源上解决这一安全隐患,除了规范航道管理,谨慎通行以外,桥梁设计过程中还要采用合理的船舶撞击力设防标准,加强结构设计,加设防撞装置和主被动监测防控系统,因地制宜、多管齐下才能切实维护好通航水域的桥梁安全和桥区水域的水上交通安全<sup>[29]</sup>。

## 2 崩塌落石对桥梁的撞击

位于山区的桥梁易受落石碰撞的影响,这可能危及这些桥梁上的高速列车或汽车的行驶安全。何思明等<sup>[30]</sup>为了减轻落石对桥梁的危害,研制了一种新型的柔性、耗能的桥墩防撞装置。在冲击过程中考虑了材料非线性、几何非线性和接触非线性等影响,数值模拟结果表明,该防护结构能有效缓冲落石冲击,显著提高桥墩抗冲击能力。张迅等<sup>[31]</sup>利用有限元程序 LS-DYNA 对落石与桥墩碰撞进行了数值模拟,研究了落石速度、落石直径、落石位置和列车速度对冲击力、墩顶位移和列车运行安全指标的影响。樊伟等<sup>[32]</sup>开展了 UHPC 墩柱和普通钢筋混凝土墩柱的落锤冲击试验,并在此基础上,建立一种简化分析方法,用于分析受压墩柱的冲击响应和破坏形态。成永刚<sup>[33]</sup>在公众号文章中对崩塌落石常用防治技术的主要特点和适用范围进行了简要汇总,还根据崩塌机制分析,对川藏高速公路陡崖坡脚特大桥提出了具体防治措施<sup>[34]</sup>。

通常情况下,桥隧相接地段桥面危岩落石防护有刚性和柔性的明洞、棚洞等。唐建辉等<sup>[35-36]</sup>以大跨度拱形明洞为研究对象,基于 ANSYS/LS-DYNA 软件分析了落石质量、冲击速度和回填土厚度等对拱形明洞的冲击影响,提出了计算落石冲击力、冲击压应力的方法,并做了模型试验来探明其作用力传递机理。王玉锁等<sup>[37]</sup>提出了落石冲击下有回填土拱形明洞结构方面的概率可靠度设计方法,并授权申请了发明专利。柏雪松<sup>[38]</sup>对现有落石冲击力计算公式进行总结,对比分析各个公式之间的异同;系统地分析了落石质量、下落高度、冲击角度以及形状对冲击效应的影响;进一步探讨了垫层厚度、材料对棚洞抗冲击性能的影响。

西南交通大学土木工程学院防护结构研究中心联合四川奥思特边坡防护工程有限公司,研制建造了大型专业落石冲击试验平台(图2)。余志祥、赵世春课题组基于该平台在结构防护,尤其是柔性防护系统方面,做了很多有意义的工作。环形网是被动柔性防护系统中的重要结构单元。赵雅娜等<sup>[39]</sup>为了建立环形网的计算模型,通过柔性被动网整体结构的足尺冲击试验,获取了环形拦截网的区域化变形特征以及网环的3种典型变形状态,建立了分区等代计算模型;实验结果校验了模型的准确性。

另外,还提出了一种适用于多跨布置式柔性被动网结构的数值计算方法<sup>[40]</sup>。刘成清等<sup>[41]</sup>以实际被动柔性防护网为原型,基于 LS-DYNA 分析含减压环及不含减压环的两种被动柔性防护网在不同冲击能量及冲击位置下的动力响应;提出的三折线分析模型能够很好地反映减压环荷载-位移曲线特点,给出的耗能计算公式便于减压环的设计及工程应用。李华东等<sup>[42]</sup>采用 LS-DYNA 的显式分析,得到了落石冲击下被动柔性防护体系的动力响应时程,对比分析了不同运动模式下的位移、冲击力、能量变化规律。

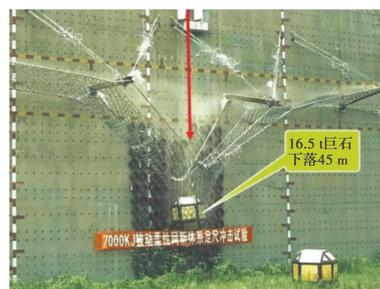


图2 7000 kJ 能级足尺冲击试验

Fig. 2 Full scale impact test of 7000 kJ energy level

以上崩塌落石作用研究主要集中在对桥梁墩柱以及防护结构方面,其他的研究还有:陈科宇等<sup>[43]</sup>考虑了落石冲击对车桥的影响,采用 Rockfall、LS-DYNA 和 BANSYS 等软件,依次就落石运动特性、落石冲击力计算以及落石-车-桥相互作用进行了研究。朱俊宇<sup>[44]</sup>对连续梁桥进行有限元建模,分析桥面板在不同落石冲击荷载工况作用下的动、静力响应,总结了动力响应放大系数变化规律并明确了不同截面内力响应动力放大系数的影响因素。古松等<sup>[45]</sup>利用落锤试验机对6组混凝土板进行试验研究,分析了不同冲击速度、混凝土板强度和长厚比对混凝土板冲击破坏效应的影响。姚昌荣等<sup>[46]</sup>综合考察流变特性、流速、桥墩形状以及冲击力的关系,进行了两种形状(圆形、方形)的桥墩缩尺模型试验。

以往针对落石冲击的研究主要包括崩塌落石运动特性、落石运动路径计算与威胁区域预测(包括对桥墩的冲击破坏以及对行车安全性的影响等)、落石冲击特性与冲击力计算表达式、崩塌落石灾害风险评估与防治决策、崩塌落石灾害的工程防治措施、崩塌落石灾害防治工程监测与维护等方面,篇幅有限,不再赘述。在艰险山区的高速铁路或公路的修建过程中,如在以上几方面结合具体桥梁工程实例开展

系统崩塌落石影响研究,将会为山区重大桥梁(如川藏公路、铁路等)的设计与施工提供重要依据。

### 3 车辆对桥梁的撞击

因城市快速扩张、城市交通迅猛发展、立交跨线桥梁增多,汽车撞击问题突出。按车辆高度划分,可分为超高车辆撞击和非超高车辆撞击。非超高车辆的撞击部位大多是桥墩,如 2019 年 5 月 15 日,104 国道东郭段上跨甬金高速一辆集装箱车撞击到桥墩,导致东郭立交桥立柱、防震挡块多处开裂,见图 3。超高车辆的撞击部位大多是梁跨结构,撞击导致其垮塌或局部破损。如 2019 年 5 月 7 日,在德国汉诺威,一辆装载有挖掘机的平板挂车撞伤了 A352 公路的一座跨线桥,造成了约 30 万欧元损失。2019 年 5 月 18 日,一辆大货车因载物超高,碰撞杭州市庆春东路口钢结构人行过街天桥,导致其东南侧垮塌。2019 年 7 月 28 日,四川绵阳二环路八角人行天桥被超高货车撞击,造成梁体破损、位移,桥面铺装破裂、墩台基础裂缝等病害。



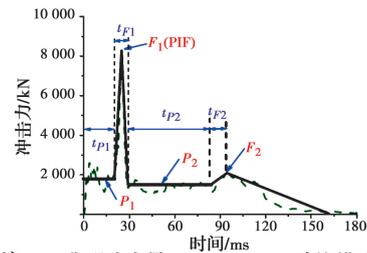
图 3 东郭立交桥车撞事故(百度图片)

Fig. 3 Collision accident of Dongguo overpass

目前,针对车辆撞击桥墩和桥跨结构的研究也不少。陈林等<sup>[47]</sup>基于 LS-DYNA 软件对车辆与典型钢筋混凝土桥墩的碰撞进行了非线性有限元模拟,重点考察了不同边界条件和箍筋直径的桥墩在车辆撞击作用下的动力响应及损伤特征,特别是钢筋混凝土桥墩的典型破坏形态。

Do 等<sup>[48]</sup>建立了中型货车与大型挂车碰撞下全桥立柱的有限元模型,探讨钢筋混凝土桥柱在车辆碰撞下的冲击行为;分析了 3 种不同荷载条件下柱参数对冲击力时程和柱响应的影响,并基于对前人研究的理解和中型卡车数值分析结果,将卡车撞击 RCB 柱的冲击力时程理想化为 4 个阶段,如图 4 所示。此外,根据冲击荷载作用下钢筋混凝土柱的剪切机理,还确定了车辆碰撞作用于柱的最大冲击力;将 RCB 柱的响应和失效分为弯曲响应和剪切响应

两类,定义了柱的最大动剪承载力,为工程人员预测 RCB 柱的冲击性能提供了指导。



注:--典型冲击量 —建议模型

图 4 中型货车冲击力时程的简化模型<sup>[48]</sup>

Fig. 4 A simplified model of the impact force time histories from the medium truck<sup>[48]</sup>

Saini 等<sup>[49]</sup>调查了钢管混凝土(CFST)桥墩在车辆碰撞下的结构响应,对存在较高车辆碰撞风险情况下使用钢管混凝土桥墩代替常规钢筋混凝土桥墩的可行性进行研究。Fan 等<sup>[50]</sup>通过圆形钢筋混凝土柱的冲击试验,提出一种基于碰撞后状态(变形和损坏模式)的评估方法,并证明了该方法能够预测碰撞后的残余轴向承载力,并通过参数研究结果推导了经验公式来估算残余强度。

针对现行的 AASHTO、CEN 等设计标准将车辆碰撞所产生的冲击力简化为等效静态力的方式存在的缺陷,Do 等<sup>[51]</sup>采用解析研究与数值模拟相结合的方法,探讨了钢筋混凝土桥柱在车辆碰撞下的动态特性。

Chen 等<sup>[52]</sup>采用替代撞击器来模拟卡车对桥梁的碰撞试验,一项测试对墩造成了中度损伤,一项造成了轻度损伤,试验测试与模拟数值结果较吻合。作者还强调了制定针对卡车与撞车事故基于性能的设计准则的必要性。Auyeung 等<sup>[53]</sup>提出一种基于桥梁的结构特点和碰撞车辆动能的新的损伤率指标(DRI),它可以用来定义车辆撞击桥墩时的预期损伤。作者在桥梁车撞研究中引入了基于性能的设计理念,允许设计者或桥梁所有者根据不同的参数选择目标性能水平。

结构设计应考虑多种极限状态函数,以保证结构的性能水平。在 AASHTO LRFD 设计规范中,考虑了 4 种极限状态,包括强度、使用、疲劳和极端事件。极端事件极限状态下有地震组合和车辆碰撞组合。由于 AASHTO LRFD 桥梁设计规范的本质建立在可靠性分析基础上,因此,有必要对此类极端事件进行可靠性分析。Hosseini 等<sup>[54]</sup>确定了一种车辆碰撞下桥墩基于性能的设计方法。相应地,桥

墩的性能水平根据车辆碰撞时桥墩的损坏状态进行分类。

钢筋混凝土梁柱的冲击特性通常采用三维实体单元的有限元模型来模拟。然而,该方法通常需要大量的时间和精力来模拟混凝土和钢筋,并且要进行非线性接触冲击分析。樊伟等<sup>[55]</sup>提出了一种有效的低速度冲击荷载作用下钢筋混凝土梁柱弯曲和剪切性能的模拟方法;提出了一种基于宏单元的接触模型,用以捕捉碰撞物体与钢筋混凝土构件之间的相互作用行为。只要有传统的光纤截面单元和离散宏单元,该方法就可以在任何有限元软件中实现,而无需编码。这一特性在评估桥梁结构在船舶和车辆碰撞下的响应和易损性的时候具有很大优势。樊伟等<sup>[56]</sup>还开发了一种由超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)面板和波纹钢管作为能量吸收构件的新型防护结构,并提出了一种多目标优化设计程序,以在车辆碰撞时找到拟保护结构的最佳配置。此外,Fan等<sup>[57]</sup>还开发了基于超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)的增强方法,该方法的数值和试验结果均表明UHPFRC强化技术可为提高RC柱的抗冲击性能提供替代解决方案。

城市中,超高车辆在桥下由于净空不够造成的冲击损坏较为频繁。Mi-kiewicz等<sup>[58]</sup>基于详细的物体损坏评估、3D激光扫描和数值模拟,分析了某具体车撞桥事件,提出了诊断梁体内部损伤并评估修复的方法。陆新征等<sup>[59]</sup>以广西某高速公路连续T梁桥为研究背景,针对超高车辆撞击和地震作用两种工况下容易发生的难于修复的落梁破坏和桥墩塑性破坏,提出了功能可恢复连续梁桥体系。杨树志<sup>[60]</sup>以金汇斜拉桥为背景,对斜拉桥运营风险进行了评估,考虑了车辆撞击的影响。但风险评估结果的精确度、可信度仍有待提高。

跨线桥遭受汽车撞击的事故时有发生,但损失一般不大。假若高速列车脱轨撞击桥梁,后果则不堪设想。张景峰等<sup>[61]</sup>对城市轨道交通U型梁在极端状况下受到列车脱轨施加的侧向撞击作用情况进行了模拟。采用LS-DYNA显式动力有限元软件建立列车-U型梁精细化模型,探讨其碰撞过程和作用机理,并分析了U型梁的碰撞损伤模式。

## 4 近场动力学思想概述

近场动力学(Peridynamics,简称PD)是一种非

局部作用理论,其核心思想就是将连续体之间的相互作用转变为非局部作用,将临界伸长率作为强度破坏准则,能成功模拟材料的损伤形成及演化过程。目前,很多研究者已经做了相关理论和工程研究工作,研究具体涉及冲击、爆炸、疲劳、热力耦合、电化学、破冰等问题;针对的具体材料包含金属、混凝土、复合材料、功能梯度材料等。郭居上<sup>[62]</sup>重点研究了格子模型PD理论,对不同格子优缺点进行了评估,并将其推向常规态型的格子模型中,成功模拟了金属材料 and 复合材料的失效问题。沈峰等<sup>[63]</sup>对混凝土材料进行冲击模拟,研究在一定冲击速度下混凝土结构的损伤演化问题。

作为新兴的非局部连续力学理论体系,近场动力学(PD)理论用空间积分方程代替偏微分方程,用以描述物质的受力情况,从而避免了传统连续力学中的微分计算在遇到不连续问题时的奇异性,并且兼有分子动力学方法和无网格方法的特点,特别适用于模拟材料自发的断裂过程。然而,因为近场动力学的数学理论内容丰富且与传统理论差别较大,目前的相关文献又以英文表述为主,在桥梁撞击研究中尚未得到重视。笔者结合郭居上等<sup>[62]</sup>在复合材料研究中的一些成果和沈峰等<sup>[63]</sup>的最新论文,认为在桥梁在船舶、落石、车辆等撞击作用下桥墩、防撞结构以及桥梁主梁等混凝土、钢材或复合材料构件的撞击问题分析中引入近场动力学思想,利用PD模拟裂纹自发萌生和扩展等非连续问题<sup>[64]</sup>,将有助于加深对碰撞本质的认识;也将为桥梁撞击问题分析突破传统思维瓶颈提供新的突破口。

## 5 结论

对桥梁撞击问题2019年研究文献进行总结、分类,并根据个人理解详细检视了其中几项研究的相关成果。通过对桥梁遭受船撞、落石冲击、车辆撞击等方面的近期研究成果进行分析,认为以下几方面的研究在未来的工作中需要进一步考虑:

1)已有研究成果的拓展方面:①在单个影响因素的研究基础上,对两个或两个以上因素组合作用的桥梁撞击研究理论,值得进一步探索。如地震同时伴随崩塌落石、泥石流等对跨谷桥梁撞击作用的耦合效应;考虑水流作用的船桥碰撞数值模拟和试

验研究;地震、强风、波浪和船撞等极端情况同时出现时,跨海桥梁结构响应研究及安全性评估。②在桥梁撞击事故中人为因素和组织因素引起的因果概率分析方面,仍然缺乏数据和具有不确定性。为了得到可靠的结果,需要进一步发展考虑不确定性的概率推理方法。③基于有限元建模的桥梁撞击分析计算量庞大,较高计算精度和计算效率的简化计算模型或分析方法的提出,将对深入认识桥梁碰撞影响规律有很大帮助。

2)新材料的应用方面:高强轻质材料或者新型材料的更多应用是中国桥梁工程的发展方向,如泡沫铝、UHPC、UHPFRC等应用于桥梁防撞及桥梁加固方面的研究已经开始,该方面的系统研究需要进一步加强。

3)新型结构的防撞研究方面:中国及其他国家和地区的有关设计规范中,尚缺乏桥梁组合构件防撞设计方面的规定,钢管混凝土、钢-混组合梁柱等桥梁结构构件的关键设计参数对防撞特性的影响规律方面的研究将是未来研究的热点。

4)新理论、新方法的发展方面:①基于性能的桥梁防撞设计理论研究将得到发展。基于性能的设计理念,是允许设计者或桥梁所有者根据结构物的重要性和用途选择目标性能水平,由不同的性能目标提出相应的设防标准,以使结构具有预期功能。该思想是21世纪世界各国抗震理论的发展方向,应用于桥梁撞击问题研究将推动相关理论的发展。②依据模拟材料的损伤形成及演化过程的已有PD成果,在桥梁撞击问题研究中引入近场动力学思想,将有助于加深对碰撞本质的认识;也将为桥梁撞击问题分析突破传统思维瓶颈提供新的路径。③船舶桥梁碰撞评估新方法在智能桥梁防撞管理系统中的应用研究。如基于模糊逻辑的船桥碰撞预警方法的发展,在考虑各种危险源的前提下,还应考虑船舶碰撞,从而建立综合的船撞桥风险评价指标体系,以协助保证桥梁航道区域的综合海事安全。

综上所述,在未来研究中,应重点考虑主被动结合来实现桥梁全方位、多角度防撞智能管控,保障桥梁运营安全;同时,应结合新的理念和分析方法深入认识桥梁撞击问题发生和损伤演化机理,推动桥梁防撞相关理论的发展。

## 参考文献:

- [1] 李亚东. 亚东桥话[M]. 北京:人民交通出版社, 2018.  
LI Y D. Talking about bridge by Yadong [M]. Beijing: China Communications Press, 2018. (in Chinese)
- [2] 韩娟, 方海, 刘伟庆, 等. 桥墩防船舶撞击研究概述[J]. 公路, 2013, 58(10): 60-66.  
HAN J, FANG H, LIU W Q, et al. Review of studies on ship collisions on piers [J]. Highway, 2013, 58(10): 60-66. (in Chinese)
- [3] 于涛. 非通航跨海桥梁的受撞分析及防撞措施[D]. 南京:东南大学, 2018.  
YU T. Collision analysis and anti-collision measures of nonnavigation cross-sea bridge [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [4] 张可成, 伏耀华, 王小川. 考虑变动水位因素的船舶撞击风险分析[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2019, 42(4): 1-6, 60.  
ZHANG K C, FU Y H, WANG X C. Risk analysis of ship colliding with bridge for water level change [J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2019, 42(4): 1-6, 60. (in Chinese)
- [5] SONG Y C, WANG J J. Development of the impact force time-history for determining the responses of bridges subjected to ship collisions [J]. Ocean Engineering, 2019, 187: 106182.
- [6] 宋彦臣, 王君杰, 尹海蛟, 等. 轮船-桥墩碰撞简化荷载模型[J]. 振动与冲击, 2019, 38(5): 60-70.  
SONG Y C, WANG J J, YIN H J, et al. Simplified impact load model for ship-bridge collisions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(5): 60-70. (in Chinese)
- [7] 袁龙文, 郝艳广, 韩劲龙, 等. 内河桥梁船撞损伤影响因素及影响规律数值模拟分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(6): 84-90.  
YUAN L W, HAO Y G, HAN J L, et al. Numerical simulation and analysis of the factors influencing the collision damage of bridges in inland river and its influencing laws [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(6): 84-90. (in Chinese)
- [8] 付涛, 宋明康, 路鹏. 桥梁船撞响应计算分析方法比较

- 研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(5): 199-201, 227.
- FU T, SONG M K, LU P. Comparative study on calculation and analysis methods of ship collision response of bridge [J]. China Water Transport, 2019, 19(5): 199-201, 227. (in Chinese)
- [9] WAN Y L, ZHU L, FANG H, et al. Experimental testing and numerical simulations of ship impact on axially loaded reinforced concrete piers [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 125: 246-262.
- [10] 赵英策, 冯清海. 跨海大桥船舶撞击力设防标准研究[J]. 公路, 2019, 64(10): 127-130.
- ZHAO Y C, FENG H Q. Study on the design standard of ship impact force for sea crossing bridge [J]. Highway, 2019, 64(10): 127-130. (in Chinese)
- [11] 邓江涛, 李永乐, 余传锦. 墩水相互作用对深水桥墩与船舶撞击的影响研究[J]. 铁道建筑, 2019, 49(10): 32-36, 53.
- DENG J T, LI Y L, YU C J. Research on the influence of pier-water interaction on ship-bridge collision in deep water [J]. Railway Engineering, 2019, 49(10): 32-36, 53. (in Chinese)
- [12] SHA Y Y, AMDAHL J, LIU K. Design of steel bridge girders against ship forecastle collisions [J]. Engineering Structures, 2019, 196: 109277.
- [13] 罗嘉敏, 陈东亮. 预应力混凝土 T 型挂梁船撞后检测评估[J]. 广东公路交通, 2019, 44(4): 195-200, 207.
- LUO J M, CHEN D L. Detection and evaluation of T-shaped suspended beam after ship collision [J]. Guangdong Highway Communications, 2019, 44(4): 195-200, 207. (in Chinese)
- [14] 李志荣, 朱金善, 王哲凯, 等. 基于 DPSIR 模型的船撞桥风险评价指标体系[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(11): 70-74.
- LI Z R, ZHU J S, WANG Z K, et al. Study on DPSIR-based index system for risk assessment of ship-bridge collision [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(11): 70-74. (in Chinese)
- [15] 刘静文. 碰撞角对船舶碰撞下桥梁动力响应的影响分析[J]. 四川建筑, 2019, 39(3): 177-179.
- LIU J W. Impact analysis of collision angle on dynamic response of bridge under ship collision [J]. Sichuan Architectural, 2019, 39(3): 177-179. (in Chinese)
- [16] CHEN P F, HUANG Y M, MOU J M, et al. Probabilistic risk analysis for ship-ship collision: State-of-the-art [J]. Safety Science, 2019, 117: 108-122.
- [17] WU B, YIP T L, YAN X P, et al. Fuzzy logic based approach for ship-bridge collision alert system [J]. Ocean Engineering, 2019, 187: 106152.
- [18] 陈琼. 桥梁防撞的探究及对策[J]. 建筑, 2019(20): 78-79.
- CHEN Q. Research and countermeasures of bridge anti-collision [J]. Construction and Architecture, 2019(20): 78-79. (in Chinese)
- [19] 马志敏, 赵金霞, 杨应松, 等. 某钢管防撞墩 ANSYS 模拟计算[J]. 武汉工程大学学报, 2019, 41(6): 597-601.
- MA Z M, ZHAO J X, YANG Y S, et al. ANSYS simulation calculation of anti-collision pier of steel pipe [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2019, 41(6): 597-601. (in Chinese)
- [20] 王纪锋, 关梁超, 葛晶, 等. 京港澳高速沙河大桥桥墩抗船撞能力评估及防撞设施方案研究[J]. 中国水运, 2019(10): 62-66.
- WANG J F, GUAN L C, GE J, et al. Evaluation of ship collision resistance capacity of piers of Shahe Bridge of Beijing Hong Kong Macao high speed and study of anti-collision facilities [J]. China Water Transport, 2019, (10): 62-66. (in Chinese)
- [21] WANG J J, SONG Y C, WANG W, et al. Evaluation of flexible floating anti-collision device subjected to ship impact using finite-element method [J]. Ocean Engineering, 2019, 178: 321-330.
- [22] ZHU L, LIU W Q, FANG H, et al. Design and simulation of innovative foam-filled lattice composite bumper system for bridge protection in ship collisions [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 157: 24-35.
- [23] 左杨, 肖祥, 何雄君. 船撞荷载作用下大跨度斜拉桥梁轨相互作用规律研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(6): 1109-1112, 1119.
- ZUO Y, XIAO X, HE X J. Research on beam-rail interaction of long-span cable-stayed bridge under ship collision load [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43(6): 1109-1112, 1119. (in Chinese)
- [24] FAN W, GUO W, SUN Y, et al. Experimental and

- numerical investigations of a novel steel-UHPFRC composite fender for bridge protection in vessel collisions [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 165: 1-21.
- [25] 陈国虞. 深水航道桥梁防船撞方法[J]. *船舶与海洋工程*, 2019(5): 1-7.  
CHEN G Y. Protection of bridge piers against ship collision in deep water channels [J]. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2019(5): 1-7. (in Chinese)
- [26] 徐光中. 川槎大桥通航孔水上防撞限高架设计研究[J]. *珠江水运*, 2019(2): 93-97.  
XU G Z. Study on the design of viaduct with anti-collision height limit frame over water for navigable span of Chuancha bridge [J]. *Pearl River Water Transport*, 2019(2): 93-97. (in Chinese)
- [27] 郑宏鸿. 关于水上防撞限高架结构型式的探究[J]. *珠江水运*, 2019(3): 111-115.  
ZHENG H H. Research on the type of anti-collision limit frame over water [J]. *Pearl River Water Transport*, 2019(3): 111-115. (in Chinese)
- [28] 林光峰. 某连续箱梁桥上部结构防船撞措施分析及对策[J]. *福建交通科技*, 2019(4): 64-67.  
LIN G F. Analysis and countermeasures of ship collision prevention measures for superstructure of a continuous box girder bridge [J]. *Fujian Communications Technology*, 2019 (4): 64-67. (in Chinese)
- [29] 刘占辉, 李亚东, 李永乐. 主被动结合实现桥梁多角度防船撞管控[J]. *大桥养护与运营*, 2020(2): 40-45.  
LIU Z H, LI Y D, LI Y L. Multi-angle collision prevention and control of bridge based on active and passive combination [J]. *Bridge Maintenance and Operation*, 2020(2): 40-45. (in Chinese)
- [30] HE S M, YAN S X, DENG Y, et al. Impact protection of bridge piers against rockfall [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(4): 2671-2680.
- [31] ZHANG X, WANG X Y, CHEN W S, et al. Numerical study of rockfall impact on bridge piers and its effect on the safe operation of high-speed trains [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020: 1-19.
- [32] 樊伟, 杨涛, 申东杰, 等. 受压 UHPC 圆形墩柱抗冲击试验及简化分析方法[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(11): 165-175.
- FAN W, YANG T, SHEN D J, et al. Experiments and a simplified analytical method of an axially loaded circular UHPC column under impact loading [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32 (11): 165-175.
- [33] 成永刚. 崩塌处治工程措施应用杂谈[EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/sqrcPTcKIXXzb45xl63DHA>, 2019-7-14.  
CHEN Y G. Discussion on the application of engineering measures of collapse treatment [EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/sqrcPTcKIXXzb45xl63DHA>, 2019-7-14. (in Chinese)
- [34] 成永刚. 川藏高速公路崩塌危岩发生机制与防治[EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/PHqMt97aRHiwk5P9wXMSqQ>, 2019-12-23.  
CHEN Y G. Mechanism and prevention of collapse and dangerous rock in Sichuan Tibet Expressway [EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/PHqMt97aRHiwk5P9wXMSqQ>, 2019-12-23. (in Chinese)
- [35] 唐建辉, 王玉锁, 徐铭, 等. 落石冲击拱形明洞结构作用力传递机理模型试验研究[J]. *铁道建筑*, 2019, 59(11): 79-83.  
TANG J H, WANG Y S, XU M, et al. Model test study on force transfer mechanism of arch-shaped open tunnel structure under rockfall impact [J]. *Railway Engineering*, 2019, 59(11): 79-83. (in Chinese)
- [36] 唐建辉, 周晓军, 蒋敦荣, 等. 落石冲击大跨度拱形明洞结构作用机理研究[J]. *铁道工程学报*, 2019, 36(11): 62-66.  
TANG J H, ZHOU X J, JIANG D R, et al. Research on the action mechanism of rockfall impacting large span arched open cut tunnel structure [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2019, 36 (11): 62-66. (in Chinese)
- [37] 王玉锁, 吴正群, 唐建辉, 等. 落石冲击下有回填土拱形明洞结构概率可靠度设计方法: CN107247858B [P]. 2019-11-05.  
WANG Y S, WU Z Q, TANG J H, et al. Probability reliability design method of arch open-cut tunnel with backfill under rockfall impact: CN107247858B [P]. 2019-11-05. (in Chinese)
- [38] 柏雪松. 落石冲击棚洞结构的动力响应研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.

- BAI X S. Study on the dynamic response of rock fall impact of shed structure [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019. (in Chinese)
- [39] 赵雅娜, 余志祥, 赵世春. 柔性防护系统环形拦截网分区等代模型[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(4): 808-815.
- ZHAO Y N, YU Z X, ZHAO S C. Ring-net subdivision equivalent model of flexible protection system [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(4): 808-815. (in Chinese)
- [40] 赵雅娜, 余志祥, 赵世春. 多跨布置式环网柔性被动网结构数值计算方法[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17): 211-219.
- ZHAO Y N, YU Z X, ZHAO S C. Numerical computing method for a flexible passive network structure with multi-span distributed ring-net [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 211-219. (in Chinese)
- [41] 刘成清, 陈林雅, 陈驰, 等. 被动柔性防护网中减压环力学试验及有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1245-1254.
- LIU C Q, CHEN L Y, CHEN C, et al. Full scale test and FEM simulation to ring-type brake energy dissipater in falling rock protection [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(6): 1245-1254. (in Chinese)
- [42] 李华东, 左明宇, 李浦, 等. 多落石冲击被动柔性防护体系的动力响应分析[J/OL]. 西南交通大学学报. <http://kns.cnki.net/kcms/details/51.1277.U.20190912.1737.017.html>
- LI H D, ZUO M Y, LI P, et al. Dynamic response analysis of passive flexible protection system in rockfalls impact [J/OL]. Journal of Southwest Jiaotong University. <http://kns.cnki.net/kcms/details/51.1277.U.20190912.1737.017.html> (in Chinese)
- [43] 陈科宇. 落石冲击及对车桥的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- CHEN K Y. Impact of rockfall and its influence on vehicle and bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [44] 朱俊宇. 落石冲击作用下桥梁上部结构动力响应特性研究[D]. 四川 绵阳: 西南科技大学, 2019.
- ZHU J Y. Study on dynamic response characteristics of bridge superstructure under rockfall impact [D]. Mianyang, Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [45] 古松, 彭丰, 余志祥, 等. 低速冲击作用下混凝土板破坏效应试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(24): 107-114.
- GU S, PENG F, YU Z X, et al. An experimental study on the damage effects of the concrete slabs under low-velocity impact [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 107-114. (in Chinese)
- [46] 王友彪, 姚昌荣, 刘赛智, 等. 泥石流对桥墩冲击力的试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 616-623.
- WANG Y B, YAO C R, LIU S Z, et al. Experimental study of debris flow impact forces on bridge piers [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 616-623. (in Chinese)
- [47] 陈林, 曾玉焯, 颜泽峰, 等. 车辆撞击下钢筋混凝土桥墩的动力响应及损伤特征[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 261-267, 273.
- CHEN L, ZENG Y Y, YAN Z F, et al. Dynamic response and damage characteristics of a RC pier under vehicle impacting [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(13): 261-267, 273. (in Chinese)
- [48] DO T V, PHAM T M, HAO H. Impact force profile and failure classification of reinforced concrete bridge columns against vehicle impact [J]. Engineering Structures, 2019, 183: 443-458.
- [49] SAINI D, SHAFEI B. Performance of concrete-filled steel tube bridge columns subjected to vehicle collision [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(8): 04019074.
- [50] FAN W, LIU B, CONSOLAZIO G R. Residual capacity of axially loaded circular RC columns after lateral low-velocity impact [J]. Journal of Structural Engineering, 2019, 145(6): 04019039.
- [51] DO T V, PHAM T M, HAO H. Proposed design procedure for reinforced concrete bridge columns subjected to vehicle collisions [J]. Structures, 2019, 22: 213-229.
- [52] CHEN X, AGRAWAL A K, EL-TAWIL S, et al. Inelastic behavior of a bridge bent subjected to truck impact: Experimental and computational study [J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109543.
- [53] AUYEUNG S, ALIPOUR A, SAINI D. Performance-based design of bridge piers under vehicle collision [J].

- Engineering Structures, 2019, 191: 752-765.
- [54] HOSSEINI P, GHASEMI S H, JALAYER M, et al. Performance-based reliability analysis of bridge pier subjected to vehicular collision: Extremity and failure [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 106: 104176.
- [55] FAN W, LIU B, HUANG X, et al. Efficient modeling of flexural and shear behaviors in reinforced concrete beams and columns subjected to low-velocity impact loading [J]. Engineering Structures, 2019, 195: 22-50.
- [56] FAN W, SHEN D J, ZHANG Z Y, et al. A novel UHPFRC-based protective structure for bridge columns against vehicle collisions; Experiment, simulation, and optimization [J]. Engineering Structures, 2020, 207: 110247.
- [57] FAN W, SHEN D, YANG T, et al. Experimental and numerical study on low-velocity lateral impact behaviors of RC, UHPFRC and UHPFRC-strengthened columns [J]. Engineering Structures, 2019, 191: 509-25.
- [58] MI Ś KIEWICZ M, BRUSKI D, CHRÓ Ś CIELEWSKI J, et al. Safety assessment of a concrete viaduct damaged by vehicle impact and an evaluation of the repair [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 106: 104147.
- [59] 徐梁晋, 陆新征, 叶列平. 地震及超高车辆撞击下功能可恢复混凝土连续梁桥研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- XU L J, LU X Z, YE L P. Research on resilient concrete continuous bridges under earthquake and over-height truck collision [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [60] 杨树志. 海河斜拉桥运营风险评估[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
- YANG S Z. Operational risk assessment of cable-stayed bridge on the Haihe River [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2019. (in Chinese)
- [61] 张景峰, 韩万水, 景媛, 等. 列车脱轨撞击 U 型梁动力仿真模拟及损伤分析[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(1): 48-53.
- ZHANG J F, HAN W S, JING Y, et al. Dynamic simulation and damage investigation on the U-type girder subjected to derailed train collision [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(1): 48-53. (in Chinese)
- [62] 郭居上. 近场动力学格子模型及其在动态脆性断裂中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- GUO J S. Research on peridynamic lattice model and its applications on dynamic brittle fracture modeling [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [63] 沈峰, 章青, 顾鑫. 弹丸侵彻混凝土靶板破坏过程的近场动力学模拟[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(1): 64-69.
- SHEN F, ZHANG Q, GU X. Peridynamics modeling for projectile penetrating into concrete [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2019, 42(1): 64-69. (in Chinese)
- [64] 陈智勇, 苏国韶, 黄小华, 等. 近场动力学研究进展与岩石破裂过程模拟[J]. 固体力学学报, 2019, 40(4): 354-371.
- CHEN Z Y, SU G S, HUANG X H, et al. Recent progress in peridynamics and its numerical simulation in rock fracture process [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2019, 40(4): 354-371. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)