

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.227



桥梁撞击问题 2020 年度研究进展

刘占辉, 卢治谋, 张锐, 姚昌荣, 李亚东

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:桥梁撞击是既有以及在建桥梁长期面临的一个关键问题, 撞击与防护问题研究符合发展需求, 学者们近年来对其的关注度也不断增多。继《桥梁撞击问题 2019 年研究进展》, 对 2020 年桥梁船撞、落石冲击和车撞桥梁等 3 方面的进展进行归纳总结。其中, 对于桥梁船撞问题, 新规范明确提出了公路桥梁主体结构宜采用基于性能的抗撞设计方法。2020 年也发生了采砂船撞击桥梁事故、雅西高速桥梁被落石砸断等, 以及多起车桥碰撞事件, 对这些桥梁撞击事件进行了梳理, 并根据个人理解对近一年的相关成果进行分析, 提出了在未来研究中需要进一步考虑的问题。

关键词:桥梁撞击; 船撞; 落石冲击; 车撞

中图分类号: U447 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0242-10

State-of-the-art review of bridge impact research in 2020

LIU Zhanhui, LU Zhimou, ZHANG Rui, YAO Changrong, LI Yadong

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

Abstract: Bridge impact is a key problem for existing bridges and bridges under construction for a long time. The research on impact and protection problems meets the needs of development. In recent years, scholars have paid more and more attention to bridge impact, and conducted a lot of researches. Following *the New Progress and Prospect of Bridge Impact Research in 2019*, the author continues to summarize the progress in 2020 in three aspects, such as bridge ship collision, rockfall impact and vehicle collision bridge. Among them, for the bridge ship collision problem, the new code clearly proposes that the main structure of highway bridge should adopt the performance-based anti-collision design method. In 2020, sand mining vessel collision accidents, the broken of Yaxi high-speed bridge, and many vehicle bridge collision events have occurred. This paper sorts these bridge impact events, analyzes and summarizes the relevant achievements in the past year according to personal understanding, and then puts forward the problems that need to be further considered in the future research.

Keywords: bridge impact; ship collision; rockfall impact; vehicle collision

在桥梁发展史上, 先进技术和理论的出现会推动桥梁工程的发展。在桥梁毁坏事件中积极探究致灾机理、寻求解决办法, 则对桥梁相关技术改进、“桥梁人”的成长有着巨大的正面意义。“桥梁撞击”不仅与桥梁抗风、抗震一样是国内外既有和在建桥梁长期面临的问题, 也是近些年逐渐兴旺的一个具有交叉性、综合性、实用性的学科方向。对桥梁撞击和防控问题的研究符合国家发展需求, 也是学者们近年来的关注热点。2011 年笔者曾听过一场谢礼立院士《地震本不该是灾害》的主题报告, 也一直在思考“桥梁撞击本不该是事故”:

一方面将桥梁抗震相关理念(如基于性能的设计)在桥梁撞击及防护领域进一步推广和完善; 另一方面“桥梁撞击不再是事故”, 可理解为解决桥梁撞击问题的一个最终目标。

全球学者对桥梁撞击的研究从未停歇, 掌握桥梁撞击发生机理和影响规律, 具备桥梁防撞的理念、知识和方法, 遇到该类问题能够从容应对是达到“桥撞不再是事故”的前提。2020 年学者们对桥梁撞击及防护问题的研究取得了长足的进步。继“桥梁撞击问题 2019 年研究进展”之后, 笔者尝试对近一年桥梁船撞、落石冲击和车撞桥梁等方面的新进展进

收稿日期: 2021-07-06

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, 主要从事桥梁结构动力学、冲击动力学及大跨网壳结构动力学研究, E-mail: liuzhanhui@swjtu.edu.cn.

行归纳总结,并期待借此抛砖引玉,为该方向的同仁提供些许信息,共同致力于桥梁防撞理论的研究与实践。依据所查桥梁撞击文献,大体分为三大类:桥梁船撞、崩塌落石冲击和车撞等。

1 船桥碰撞

与地震或风荷载一样,船只对桥梁的冲击不仅可能导致人员伤亡、经济损失和环境污染,还可能造成灾难性后果。2020 年发生多起采砂船撞击桥梁事件:2020 年 3 月 19 日在 G72 泉南高速全州往湖南方向 K973+615(湘江大桥处)发生一起挖沙船撞桥事件;2020 年 7 月 7 日,江西鄱阳县太阳埠大桥水域发生运砂货船撞击桥梁事件,致桥面坍塌,压迫货船倾斜沉没;2020 年 7 月 11 日,赣江吉安段一艘重约 40 t 的采砂船不慎脱锚,头尾分别与白鹭洲拱桥桥墩相撞。另外,近些年改装船只非法采砂问题不但破坏了河流生态环境,还严重影响了航道、堤防和桥梁安全。据报道,2020 年仅芜湖市抓获非法采砂船和非法运砂船就达 200 余艘。公安部也曾部署开展打击长江流域黑恶势力非法采砂违法犯罪专项行动^[1]。船桥碰撞事故的频繁发生,造成了重大的安全隐患和经济损失。针对该问题,下面对 2020 年船桥碰撞方面的科学研究进展做出梳理,以寻找解决对策。

在桥梁船撞规范或标准方面,2020 年中华人民共和国交通运输部发布《公路桥梁抗撞设计规范》(JTG/T 3360-02—2020),明确提出公路桥梁主体结构宜采用基于性能的抗撞设计方法,并给出两个作用水准。这两个水准的失效概率主要参考了美国《公路桥梁船撞设计指南》。其中桥梁的船撞重要性等级、桥梁的抗船撞设防目标、桥梁结构的抗船撞性能等级和桥梁构件的抗船撞性能等级这四个表格构成了基于性能抗撞设计的目标体系,即设计要达到的目标和对设计结果进行评价的标准。其中抗船撞性能验算的条款给出了偶然组合需要考虑的作用类型,明确了温度作用等不参与撞击组合,这是对现行《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)的补充。汽车荷载参与船撞组合时取其准永久值,而美国《公路桥梁设计规范》中船撞组合考虑了 0.55 倍的汽车荷载,与本条规定类似。同样,出于简化工程设计的目的,该规范考虑轮船撞击桥梁的动态过程时,以中国 8 艘代表性轮船(3 000~50 000 DWT)的船撞动态时间过程为依据,用一个等效静力来近似代替。它还将设防代表船型简要划分为轮船和驳船,给出了轮船撞击力设计值、甲板室撞击力设计值、桅杆撞击力设计值和驳船撞击力设计值的计算公式。同时推荐采用概率-风险分析方法确定设防船撞力^[2]。

在桥梁船撞响应分析方面,大型船舶撞击桥梁事故的严重性引起了越来越多人们的关注。Zhou 等^[3]在对海洋环境下不锈钢混凝土桥墩累积冲击力的研究中,通过试验验证和相关规范比较分析,建立了考虑桥墩累积冲击损伤的碰撞力计算公式。结果表明,随着桥墩冲击损伤的增加,冲击力逐渐减小,在计算冲击力时必须考虑损伤的影响。与规范公

式相比,作者所提出的具有损伤因子的碰撞力公式曲线与试验结果曲线也更吻合,能够更好地反映不锈钢混凝土桥墩在碰撞损伤后的冲击力状况,具有一定应用潜力。

Gholipour 等^[4]探讨了某斜拉桥在船舶撞击作用下的渐进损伤特性和破坏模式;建立了一种二自由度的混凝土材料应变率效应简化理论模型。根据桥墩挠度、桥墩吸收的内能和桥墩柱的轴向承载能力,提出了 3 种不同的损伤指标,对桥墩的损伤等级进行了分类;并通过将损伤指数结果与船桥碰撞有限元模拟观测到的渐进损伤行为进行比较,确定了一种有效的损伤水平评价方法。邓超等^[5]通过对比常用船桥撞击力经典理论公式与 ANSYS 仿真分析计算结果,发现我国公路桥规计算的撞击力值与数值模拟得出的撞击力值最为接近。

戴志伟等^[6]提出了一种考虑墩顶约束作用的船桥碰撞理论模型,综合桥墩刚度、船舶质量及船艏刚度等因素,建立了峰值撞击力简化计算公式。进一步分析结果表明:一定范围内,峰值撞击力与船艏刚度呈正相关;顶端约束刚度对船桥碰撞力具有一定的影响。

桥梁抗撞击与防护的基础性试验数据尚较为缺乏^[7]。Guo 等^[8]以浙江省某跨海大桥的非通航跨径为工程背景,进行了模型试验,并建立了由桩基础、承台、墩、梁体组成的精有限元模型。作者分析了不同速度冲击下桥梁的冲击力大小、各结构的动力响应和能量分布,并对试验结果和有限元结果进行了比较。结果表明,冲击力可分为两个阶段:上升阶段和塑性阶段。在第一阶段,冲击力突然上升到最大;在第二阶段,由于船头的塑性变形,冲击力减小。试验中观察到横向惯性力引起的梁与墩之间的相对位移最大达到 8.32 mm。在船桥碰撞过程中,船舶由于船艏的变形而吸收了大部分能量,占总能量的 80% 以上。对于桥梁结构,大部分的能量集中在桩基础和支座的变形上。通过小波分析,发现被测桥梁结构所吸收的能量主要集中在低频波段。

桥梁结构在使用时间内可能同时遭受多种危害,洪水冲刷是桥梁破坏的一个主要原因。Guo 等^[9]采用显式非线性动力分析方法研究了一座大跨度双塔斜拉桥在不同基础冲刷和船舶撞击作用下的动力响应和结构性能。结果表明,冲刷对最大冲击力的影响较小,但对碰撞力的时程曲线影响较大;桩顶弯矩随冲刷深度的增加而增大,从而导致桩基弯矩破坏。张琛^[10]、陈伟^[11]也开展了冲刷桥墩-驳船碰撞试验,在此基础上进行了冲刷和船撞双重灾害共同作用下连续梁桥和斜拉桥的非线性动力响应研究并给出了加固措施。

飓风也是可能对沿海基础设施造成破坏的极端事件之一。关于驳船碰撞损坏的桥梁对飓风引起的波浪荷载的响应,已有文献中并没有提供有益的参考。为弥补这一研究空白,Oppong 等^[12]制定了一个多灾害框架,对驳船碰撞和飓风事件下桥梁动力响应进行分析并对结构易损性进行了全面评估。通过对变形模式和破坏模式的深入了解,确定了这两个极端事件的累积后果,有助于提高通航航道桥梁的风险评

估水平。

在桥梁船撞风险评估方面,由于经济的快速发展,中国长江流域存在着大量与河流方向平行的岸边桥。岸边桥梁的广泛分布不可避免地增加了船舶与桥梁碰撞的风险,而其空间分布、涉水状态、船舶可达性等与跨河桥梁不同,因此用跨河桥梁的常规评估方法来评价岸边桥梁的船舶碰撞风险并不合适。Zhang 等^[13]建立了一种新的评估船舶与河岸桥梁碰撞风险的概率方法,并应用于重庆沙滨路岸边桥的船舶碰撞风险评估中,给出其船桥碰撞风险为低至中等。Zhang 提出的岸边桥梁船舶碰撞全概率风险评估框架考虑了船舶信息、河道宽度、水位、桥墩信息和水流速度等影响因素。同时,在研究岸边桥梁特性的基础上,结合改进的 KUNZI 模型,将船舶航迹积分区间扩展到船舶到桥墩的横向距离,将原模型的偏航角 θ 直接设置为 90° ,提出了一种新的岸边桥梁船舶碰撞概率危险性分析模型。改进的 KUNZI 模型包含三个随机参数,即船舶轨迹分布、偏航角和停泊距离。由此得到船舶在 i 水位下与岸边桥碰撞的年概率 P_{wi} 计算公式,具体见文献^[13],在此不再赘述。

有通航需求的桥梁具有较高的船舶碰撞危险性,同时由于周围环境的侵蚀,桥梁也面临着严重的“老化”危险。Fan 等^[14]在考虑腐蚀引起的结构退化的情况下,建立了一种新的钢筋混凝土桥梁在船舶碰撞下的易损性评估框架。结果表明,腐蚀对桥梁结构在船舶碰撞中的易损性有着重要的影响。由于氯离子腐蚀削弱了桥梁柱的承载能力,每个损伤水平的失效概率都大大增加。在大多数情况下,条件相同时(例如,船舶质量和速度),当撞击船的动能不大时,驳船撞击引起的问题占主导地位。然而,当动能较大且桥梁经历了较长时间腐蚀劣化的情况下,轮船碰撞导致的失效概率要高于驳船碰撞的失效概率。这主要是因为驳船船舶与轮船船舶之间的差异造成了撞击载荷的显著差异。

Wang 等^[15]针对驳船撞击下钢筋混凝土单柱损伤识别问题提出了两种不同的识别策略:一种是基于实测柱位移和模态参数的直接识别方法;另一种作为一种替代方法,是基于实测柱位移来确定冲击力时程的间接识别方法。通过将识别出的损伤量与用已有的耦合多自由度模型进行精确变形分析生成的基准输出数据进行比较,评估所提出策略的预测质量发现:前者可以非常合理地量化受损钢筋混凝土柱的状态,而不需要事先提供导致柱损伤的荷载信息;后者在准确测量柱顶位移的情况下不仅能够非常准确地识别冲击力的时程,还能根据实测的柱顶位移合理地识别驳船的质量和撞击速度。刘少康^[16]在对船舶载况、撞击速度、碰撞角度等影响下的船桥碰撞响应进行数值分析后,结合 BP 神经网络和 Elman 神经网络方法构建船桥碰撞力预测代理模型,实现了对船桥碰撞力的快速预估。宋明康^[17]分析了桥梁船撞的破坏模式,确立了桥梁船撞极限状态功能函数,同时采用基于响应面的方法对桥梁结构船撞时变可靠度进行了分析。林志丹^[18]结合三起船桥撞击事件,基于外观检查结果对桥梁

损伤进行了诊断分析,给出了处置措施和改进建议。郭健等^[19]建立了风险层次评价指标模型,基于桥区通航监控统计数据,运用 AHP 法、熵权法和模糊数学理论,对朱家尖跨海大桥船舶撞击风险进行综合评估并给出了风险控制措施。陈兵等^[20]通过水文地质资料调查和实地勘测后,参照美国 AASHTO 规范计算了牛湾特大桥发生碰撞事故的概率,并对比了中、美、欧洲规范所得的船舶撞击力,总结了该桥船撞风险因素。

与通航孔相比,非通航孔桥抗撞能力差,一旦发生船撞,造成的经济损失和人员伤亡不容小觑。从经济、美观的角度出发,朱俊羽等^[21]认为非通航孔桥防船撞宜采用拦截系统,代表船型为 2 000 t 级在船速为 2.5 m/s 的 LS-DYNA 撞击动态数值算例表明,可以在较短时间内有效拦截船舶。朱俊羽等^[22]还对某航道桥下部结构受船舶撞击后的安全性能进行了评估,总结了船撞安全评估一般流程,提出了加固和防撞设计方案。

在桥梁防船撞及其设计方面:对于重要桥梁或高船撞风险的桥梁,可以考虑外加防护装置系统增强桥梁的抗撞击能力。钢护舷作为典型的防护体系之一,因其耗能能力较大而被广泛应用于船舶碰撞防护中。初步设计阶段,由于尚未确定钢护舷详细的参数,开发一种实用简便的方法十分必要。Fan 等^[23]提出了一种基于能量的设计方法,给出了详尽的设计步骤,用于在初步设计阶段对钢护舷进行有效的设计。分析结果表明:所提出的设计方法能够准确地预测钢挡泥板的压碎深度和峰值冲击力;利用所提出的基于能量的设计方法,可以进行有效的优化设计。此外,作者还指出所提出的简化方法应推广到偏心撞击,并继续改进,以更准确地预测船舶粉碎深度。罗强等^[24]设计了一种新型钢-复合材料组合防撞装置,通过 LS-DYNA 数值仿真分析对比了有无防撞装置的桥墩结构响应。发现带球艏船舶和驳船撞击力峰值降幅可达 30% 和 54.2%。汪银根^[25]以中开虎跳门西江特大桥为背景,对比了中、美、欧等规范主墩横桥向船舶撞击力和几种常见防撞设施的优劣,推荐采用船舶撞击力标准值的计算依据美国 AASHTO 公式、防撞设施采用橡胶护舷。

Manohar 等^[26]提出了一种由波纹钢和预置骨料纤维混凝土(Preplaced Aggregate Fibre Reinforced Concrete, 简称 PAFRC)组成的新型复合护舷结构。并采用落锤冲击试验装置对多组钢-PAFRC 护舷试件进行了测试,研究了它们的低速冲击性能和失效机理。结果表明,通过改变波纹板厚度可以有效地减轻冲击力。钢纤维的加入提高了复合护舷 PAFRC 顶板的裂纹萌生和抗冲击性能,而由长纤维组成的 PAFRC 顶板与短纤维相比有进一步的改进。同时,还指出了对高冲击速度下、不同类型的纤维和混凝土制成的复合护舷外板的冲击响应可作为进一步研究的方向。

Shan^[27]采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了一种新型钢-聚氨酯夹芯板加筋桥梁防撞装置的有限元碰撞系统模型,计算了在最不利的正面碰撞条件下箱体和墩柱的冲击

力、船的碰撞深度以及系统各部分所吸收的能量。结果表明,这种防撞箱能有效地保护桥墩。当发生正面碰撞时,能吸收 70% 以上的碰撞能量,而桥墩只承受冲击能的 10%。在防撞箱的各种部件中,夹层板的外钢板吸收能量最多,内钢板吸收的能量次之。水平加劲肋设置对系统各部分冲击力、冲击深度和吸收能的影响大于竖向加劲肋,提高防撞箱刚度的效果也较好。

陈巍等^[28]提出了一种新型独立式防船撞设施,即缓冲筒和 FRP 箱体组成的转筒式防船撞装置,对拱桥主拱进行保护,并采用了 LS-DYNA 显式动力分析后对其参数进行优化,得到较为合理的防撞结构形式。

Zhou 等^[29]以珠海市红河大跨斜拉桥桥塔为研究背景,提出了一种新型组合超高性能混凝土(UHPC)的防撞装置。该装置的主要部件是双层、双向、钢筋密集的超高性能混凝土浮箱,通过高强度螺栓连接形成整个结构,并配备钢支撑元件、橡胶滑块形成碰撞消能装置。LS-DYNA 数值计算结果表明,新的防撞措施在减小舰桥碰撞力、延长船桥碰撞时间、保护船舶等方面具有一定优势。模块化生产装配、现场安装效率高、更换损坏浮箱方便、维护费用低等优点使其具有良好的市场应用前景。

郁嘉诚等^[30]以台州椒江大桥为研究对象,通过数值分析 3 000 t 级船舶在最高通航水位下正向和侧向撞击两种工况下的撞击力后,提出了一种隔离式防撞墩与自浮式复材消能圈相组合的防撞方案,进一步分析发现安装该装置防撞墩后,船舶所受的撞击力削减了 24.30%。

潘晋等^[31]通过在具有 X 型夹层结构的浮式防撞设施上,配置保护性柔性元件来增强设施对桥墩的保护效能。基于 AIS 实际船舶信息数据进行数值分析,结果表明,该装置可减少 30% 以上的船撞力,且可减小船舶损伤。

拱形自浮式桥梁防撞装置的提出,适于对山区河流拱桥易撞部位进行防护。毛德涵等^[32]依据相似性准则推导了结构静力、动力相似比后,在材料性能试验数据和有限元分析的基础上,选取了合适厚度的 PVC 管制作满足刚度相似比的试验模型。

Wang 等^[33]研制了一种成本较低的钢框架结构新型防撞装置,并对其力学性能进行数值评价,以量化其耗能能力并为优化设计提供参考。该装置在冲击过程中对驳船保护也是非常有效的。当驳船质量为 1 724 t 时,该装置所能抵抗的最大撞击速度约为 3.5 m/s。幸运的是,这一速度超过了以前基于调查统计得出的水路驳船最高行驶速度。

对桥下有通航需求的桥梁来说,一方面,需为其安装防撞装置进行防护;另一方面,要做好桥梁防撞设计,提高自身抗撞能力,防止桥梁垮塌造成的巨大损失。Pedersen 等^[34]介绍了一套桥墩和桥塔抗撞设计方法,并使其符合一定的风险验收标准。其文中提出了一个碰撞概率模型,用于计算船舶在大桥附近遇到紧急情况的概率,以及由人为错误和技术错误引起的船舶碰撞事故的概率。在综合数值计算的基础上,

建立了一个简单的经验表达式以快速预测最大船舶冲击力随船舶撞击速度、船舶载荷和船舶尺寸的变化。指出了 AASHTO 规范公式的适用条件,并对新版欧洲规范修订提出了建议。

在船桥碰撞主动预警研究方面:Wang 等^[35]、夏烨等^[36]提出了一种基于深度学习目标检测的船舶与桥梁碰撞主动监测系统的技术框架,用于船舶与桥梁之间的防碰撞。该系统包括图像采集、检测、跟踪、预测、风险评估和决策等六个模块。为了在舰桥避碰监控系统中取得理想的检测效果,需要对 SSD 模型进行适当的数据集训练,故建立了一个船撞专用数据集。该数据集包含 3.5 万多幅船舶图像,并附有标注的船舶碰撞数据集。在上海松浦大桥进行了现场试验,与现有应用较多的基于运动的检测方法 ViBe 相比:传统的方法将阴影、反射和重叠的船只与目标船本身混淆,而忽略了停泊的一艘船,由于波和光引起的噪声产生了大量的假结果,而基于深度学习的目标检测方法 SSD 在处理复杂多变的情况下检测结果更加准确和灵活。这为进一步的分析和决策提供了信息支持。

闫兴非等^[37]分析了基于船舶交通管理系统(VTS)和被动防船撞设施的局限,提出了采用基于视频监控的通航桥梁主动预警概念及方案以满足柳港大桥防船撞预警需求。徐一超^[38]选取伸缩缝位移测值作为船撞报警信号源数据,给出了三大特征指标用于长大桥梁船撞后报警,提醒桥梁管理者启动应急事宜。

桥梁主动防船撞目前还没有统一标准,各类桥梁主动预警和干预的手段单一。何侃^[39]试图利用 AIS、VHF、VITS 等多项技术构建基于多源信息融合的碰撞风险预警模块,以实现智能感知和判断、营造数字交通环境。该方法具有一定技术前瞻性,但离实施还有相当距离。张雷等^[40]在渤海海峡跨海桥梁方案研究中认为要实现“桥梁安全、船舶安全、通航安全”的目标,应研究航道标准,加强航行管理,采取主动防撞与被动防撞综合手段。

2 崩塌落石对桥梁的撞击

崩塌落石是常见的山区三大地质灾害之一,是指陡坡上的巨大岩石或土体,在重力、地震、雨水及其他外力作用下崩塌脱落的现象,具有预测困难、突发性强、随机性大、致灾严重、影响面广等特点。目前中国加大了对西部地区交通建设投入,山区公路和铁路的建设需要更多的山区桥梁,崩塌落石对桥梁的影响不容忽视。2020 年 9 月 20 日,京昆高速西段(四川雅西高速)突发山体崩塌,落石导致姚河坝大桥两跨桥梁砸断,雅西高速双向交通中断。随着以川藏铁路为代表的艰险山区铁路建设的推进和相关学者对落石冲击问题的持续关注,2020 年崩塌落石对桥梁撞击的研究和应用也比往年有所增加,以下对其进行总结。

考虑到落石撞击防护棚洞的冲击力理论计算公式已较为成熟,但落石撞击桥墩的冲击力公式研究较少。钟汉清

等^[41]基于 Hertz 理论和 Thornton 弹塑性假设推导了落石撞击桥墩冲击力理论计算公式,并对落石冲击速度、角度和半径等进行了参数影响研究。计算结果发现弹塑性冲击力仅为弹性冲击力的 21.58%,采用该公式进行防撞设防时应引入弹塑性冲击力折减系数。

王翔等^[42]对拉林铁路某段桥梁工程典型工点的危岩崩塌体进行了现场调研,之后结合 Rocfall 仿真和模型试验加速度测试数据,采用 SPECTR 计算程序对崩塌落石加速度、速度和位移动力反应谱特性进行了分析评价。这为新建川藏铁路山区桥梁提供了直接参考。

艰险山区桥梁施工及运营多面临崩塌落石撞击风险,常规的防护棚洞为 RC 结构铺设砂土垫层,但因自重过大而难以实现与桥梁的一体化建造。孙宗磊等^[43]拟采用新型高强材料 UHPC 板铺设 EPS 垫层的方式减小棚洞与缓冲材料的重力,由此开展试验,研究该结构形式的耗能能力并拟合出峰值冲击力与冲击能量为对数关系的计算公式。该公式适用于 EPS 垫层厚度在 70~150 cm,冲击能量在 100 kJ 以下的情况。

针对落石撞桥问题,不同工程的设计标准不一,中国铁路桥涵规范中对落石防护领域尚存空白。杨少军等^[44]结合艰险山区铁路桥梁建设中面临的危岩落石风险,从落石运动规律、冲击力计算方法、棚洞防护形式和轻型缓冲层材料的耗能性能这四方面出发,开展科研试验与理论分析工作,探讨了桥梁工程危岩落石防治标准制定需考虑的一些关键技术问题,但对施工和维护方面还缺少研究。

方钱宝等^[45]对某新型防护结构的缓冲层受力变形特征、不同落石作用位置对新型防护结构动力响应的影响开展了研究。通过引入落石附加内力和变形冲击系数,分析落石冲击力对新型落石防护结构产生的最大动力响应,发现结构最不利受力位置为棚洞跨端,应作为控制截面采取加固措施。

柔性防护网是常用的落石崩塌防护技术。余志祥等^[46]提出了一种韧性钢结构挑篷防护网系统,并以 150、500 kJ 的三联足尺模型冲击试验数据为依据进行了非线性显式动力学分析,揭示其工作机制。

张佳宁等^[47]基于 ANSYS/LS-DYNA 显式动力学分析了落石撞击双柱式高墩的全过程,模拟结果发现,桥墩结构应力变化的最大值与撞击位置距桥墩底部的距离和落石撞击初始速度正向关。陆科林^[48]对双薄壁箱型截面钢桥墩的落石冲击性能进行数值模拟,分析了落石大小、冲击速度以及冲击位置对桥墩的动力响应的影响,给出了设计建议。

Zhang 等^[49]对各类混凝土结构和构件,包括桥墩、梁和板在横向冲击荷载下的响应和破坏行为进行了总结;重点回顾了以往关于钢筋混凝土桥墩在车辆和船只碰撞作用下的碰撞响应的研究;阐述了不同的结构参数和荷载相关参数对混凝土结构抗冲击性能的影响。此外,还介绍了冲击荷载作用下结构分析的理论背景、现行设计准则和现有的分析方法。综述发现,由于忽略了惯性效应和应变率效应等动力效

应的影响,现行规范所预测的冲击荷载可能是不保守的。另外,现行设计规范在预测等效冲击荷载时没有考虑到被冲击结构的损伤状态,也无法准确和合理地估计桥墩惯性、轴向荷载比、几何形状和土-结构相互作用等对冲击荷载和响应的影响。轴向荷载参数的有效性还没有得到严格的论证,然而以往的研究大多是研究结构在轴向荷载作用下的抗冲击能力。

3 车辆对桥梁的撞击

中国城市规模飞速发展、交通负担日益繁重。2020 年中国国家统计局数据显示,全国机动车保有量达 3.72 亿辆,其中汽车 2.81 亿辆。在此背景下,车桥碰撞问题较为突出。超高车辆撞击桥跨结构,是立体交通快速发展过程中逐渐凸显的一大问题,会导致桥跨结构落梁或局部损坏。2020 年车桥碰撞的案例有:2020 年 10 月 15 日上午 10 时,G50 沪渝高速公路上,一辆大型运输车辆与路面上方桥梁发生碰撞,导致桥梁垮塌;2020 年 10 月 18 日,在江苏海安境内的宁启线南莫至海安站区间,一辆混凝土泵车先撞倒限高架后撞向铁路桥,桥梁上拱变形,撞击点钢筋外露,导致宁启线 9 趟列车停运。车辆撞击桥墩、护栏的事故则更为频发。2020 年 3 月 14 日,绍兴市一私家车撞向桥墩后车身起火,驾驶员当场死亡;2020 年 8 月 10 日,海口南海大道西段一辆汽车撞到高铁桥墩后瞬间引发剧烈燃烧;2020 年 11 月 23 日,广东某地货车高速撞上路面凸起物失控,致某小汽车被撞跨越护栏、翻滚坠落桥下,后证实为伸缩缝型钢断裂意外凸起;2020 年 12 月 18 日,在山东省日照市某大桥上发生一起两辆汽车相撞的交通事故,其中一车撞断护栏、坠落桥下;2020 年 9 月 10 日,英国一辆双层校车行驶途中撞上一座高度较低的铁路桥,大巴车顶棚被掀掉,十多名学生受伤。列车脱轨事件相对较少,但后果严重。2021 年 3 月 19 日,摩洛哥一火车失控脱轨、撞上桥墩,至少 6 死 86 伤。

近年来,车辆撞桥带来了巨大的经济损失和人员伤亡,这些事故引起了人们的广泛关注。车辆撞击桥梁事件一般分为汽车撞击桥跨结构、下部结构、护栏、拉索等,此外还有列车脱轨致灾等特殊情况。

超高车辆与净空较低的铁路桥梁的撞击影响巨大。防撞梁可以减少车辆撞击事故造成的破坏,并且在那些净空较低、常遭受超高车辆冲击影响的桥梁中很容易更换。Ozdogli 等^[50]根据北美铁路业主的需求,对各种碰撞梁在减缓超高车辆碰撞铁路桥梁的影响方面进行了数值研究,评估其对保护桥梁是否有效,并从实验上量化了不同碰撞梁的效率,为过高桥桥防撞减振设计提供了参考。

车辆与桥墩的碰撞也是桥梁结构的主要威胁之一。Li 等^[51]开展了钢筋混凝土(RC)桥墩在横向冲击荷载作用下的冲击过程、损伤与破坏模式、动力特性和抗冲击性能评价方法的试验和数值研究工作。一改通常采用峰值冲击力来评价结构物/构件的抗冲击性能的方式,作者根据能量守恒定

律,采用冲击位置的塑性位移(即残余位移)作为钢筋混凝土桥墩抗冲击性能的评价标准。

考虑到试验成本高和数值模拟技术的成熟发展,Chen等^[52]采用有限元模拟方法,对典型的三柱钢筋混凝土桥墩在车辆碰撞作用下的动力响应和损伤破坏特性进行了分析,并考虑了车辆动能、箍筋直径、轴压比、基础深度和发动机质量等关键变量。在此基础上,提出了计算钢筋混凝土桥墩冲击时轴向力增量的改进公式,并结合已建立的汽车碰撞模型,建立了评价钢筋混凝土桥墩在车辆碰撞作用下抗剪性能的极限状态函数。此外,还提出了一种新的车辆碰撞下钢筋混凝土桥墩抗剪破坏的等效静力分析方法,并对 AASHTO 规范的有效性进行了评价。Wu等^[53]对钢筋混凝土双柱墩桥梁的动力响应和车辆碰撞下的可靠度进行了分析。其以精细的混凝土双柱墩桥梁和车辆有限元模型为基础,考虑车速、截面尺寸、桥墩高度、混凝土强度等参数对冲击响应的影响,基于可靠度理论,采用蒙特卡罗方法分析了桥墩在车辆碰撞下的剪切破坏概率。此外,还提出了可在未来研究中进一步考虑不同车型、冲击位置的影响。唐杨^[54]基于 ANSYS 对钢桁架桥在横桥向撞击和顺桥向撞击作用下的受力特点进行对比分析后发现,横桥向撞击下结构变形和应力更大。王向阳等^[55]以某双柱式桥墩为背景,以 LS-DYNA 的车-桥墩碰撞数值计算样本拟合出了车撞力计算公式。与中国规范计算值比较后发现,规范计算车撞力偏低。桥墩易发生剪切破坏,且混凝土强度对其抗剪承载力可靠性指标有较大影响。

在试验的基础上建立高保真的数值分析模型并作进一步的拓展分析,是一种节省研究成本的方法。Sharma等^[56]对马尼托巴混凝土桥的护栏遭受有可能的卡车连续高速撞击问题进行了数值研究,以评价护栏抵抗多次撞击的性能和驾驶员安全风险。在 LS-DYNA 中进行多次撞击数值模拟前,首先通过与已知实车足尺碰撞数据对照,验证了数值仿真中前车建模的准确性。撞击后马尼托巴桥混凝土防撞护栏的有效塑性应变分析结果表明,在卡车连续 5 次碰撞过程中,防撞护栏没有发生过大破坏。

与 Sharma 等人的研究方法类似,仿真模型的有效性通过与实际碰撞事故中桥梁损伤特征进行验证的研究方式值得借鉴。现行规范中规定的等效静力设计力并没有充分考虑车辆碰撞的多样性,如车辆类型、质量和碰撞速度等。Wang等^[57]利用有限元软件 ABAQUS 建立了某重型货车和桥墩的有限元仿真模型,分析了车辆质量和车速对立交桥墩冲击特性的影响,其有限元模型验证工作就是采用与实际车撞桥梁破坏特征保持一致实现的。结果表明,随着载重汽车质量和碰撞速度的增加,冲击力峰值增大。桥墩的高应力区集中在桥墩的根部和冲击部位,在 45°处形成斜裂缝。

为了保护桥墩不受车辆的冲击或减小撞击危害,安装防撞装置是有效手段。Pan等^[58]设计了一种能量吸收结构,该结构由薄壁 U 形钢和填充复合蜂窝管组成。首先对能量吸

收结构进行了材料性能试验、对实际车辆模型进行标定(依据已有试验数据^[59]);之后建立有限元模型进行了碰撞系数、角度和车辆类型等参数影响分析,来评价所设计的保护结构在各种车辆碰撞下的动力性能和能量吸收能力。研究表明,高速碰撞情况下更有必要安装该防撞耗能结构。

与混凝土护栏和波形护栏相比,对公路缆索护栏系统的研究相对较少。Lu等^[60]根据《公路交通安全设施设计细则》建立了车辆与缆索护栏系统的耦合有限元模型,并进行了缆索护栏与车体碰撞的全尺寸模拟。为了改善缆索护栏系统的性能,在优化过程中,选择任意两个桩之间的距离和桩的厚度作为设计变量,将车身的质心加速度和缆索的侧向位移定义为目标函数。优化后,车身质心加速度的峰值为 16.08g,车体的出口角为 7.8°,缆索的最大侧向位移为 263.04 mm。在碰撞过程中,车辆的损伤程度比原车轻得多,没有碰撞效应。该优化大大提高了最优缆索护栏系统的整体性能,满足了碰撞要求。廖福勇等^[61]对某快速路上的防撞装置进行了理论和数值分析,评估了该装置的防撞效果,指出应根据道路实际通行情况来匹配其刚度。

公路桥梁是保障社会安全和功能的重要基础设施。自然灾害对公路桥梁造成的直接破坏会破坏运输系统,阻碍救援和恢复活动,给社会造成巨大的经济损失,合理的风险评估方法至关重要。Li等^[62]为公路桥梁在多种灾害作用下的长期恢复力和长期损失评估提供了一个详细的框架,计算了四种不同危险情况下恢复模式下的时间依赖函数,并对每一种危险情况下的桥梁反应进行了评价。Kim等^[63]采用了风险分析的方法来评价桥梁墩柱的车撞易损性。其采用初步分析、简单分析和详细分析这三步风险分析方法,对韩国 8 267 个桥梁的风险水平进行了评估,最终简单分析阶段(SRA)选择了 58 个高风险(RLH)等级的桥梁墩柱,根据长细比将这些桥梁分成了 5 大类,并对这 5 类桥梁进行详细分析(DRA)。通过数值分析发现,当车辆速度和长细比都增加时,桥柱会出现较大的变形。利用在车辆撞击下的高响应和中等响应类别的桥梁墩柱,根据材料强度统计数据 and 数值分析结果,给出了桥梁墩柱的易损性曲线。

Petrini等^[64]在进行多灾害分析时,考虑 189 m 长的多跨公路高架桥在受到重型车辆(罐车)撞击,且易燃材料存在火灾蔓延的情况,采用了多级建模策略来评估公路高架桥危险链场景下的结构响应。Chen等^[65]对桥梁桥墩碰撞的研究现状进行了综述,总结了该领域的研究成果和局限性,其参照太平洋地震工程研究中心(PEER)提出的基于性能的抗震设计框架将车辆与桥墩的碰撞研究细分为四个主要问题,即危险分析、结构分析、损伤分析和损失分析。韩艳等^[66]依据车撞桥墩的研究现状,认为目前能同时减少车桥碰撞损伤、占地面积小、防撞效果好的城市桥梁桥墩防撞设计措施需要进一步加强研究,且车辆撞击桥墩事故发生后,仍缺少评估桥梁损伤程度及剩余承载力的快速合理的方法。

按给定的震害等级进行设计的桥墩除承受地震荷载外,

在其使用寿命周期内也有可能受到车辆冲击荷载的影响。Li 等^[67]从多危害的角度,利用商业有限元程序 LS-DYNA 建立了车辆-桥墩碰撞的精细有限元模型,研究钢筋混凝土墩柱的抗震能力与冲击抗力之间的相关性以及相应的损伤评估方法,提出了初步的多危害设计流程。108 个碰撞场景的数值模拟结果表明,RCBP 的抗震性能与抗冲击性能密切相关,在车辆撞击作用下,RCBP 表现出 5 种潜在的破坏模式都受到抗震能力的显著影响。

列车脱轨不仅会对列车本身造成破坏,还会对周围的结构造成二次损伤。因此,护栏通常用于防止高风险线路上脱轨列车造成的二次损坏。Lai 等^[68]采用三维车辆轨道动力学仿真模型和碰撞接触模型,研究了列车脱轨后的动力学行为以及护栏保护的有效性。吕思雨等^[69]采用 Hypermesh 软件分析了有砟、无砟轨道桥梁上动车组头车与防护墙碰撞过程,发现防护墙受损破坏程度与头车速度和冲击角度正相关,防护墙增高可有效抑制列车爬墙现象。

桥梁车撞问题以确定性指定事件分析居多,鲜有研究将重点放在桥墩车辆撞后的可靠度和工作性能上。樊伟等^[70]在钢筋混凝土柱式桥墩车撞问题研究中,建立了一套车撞桥墩响应面—蒙特卡罗抽样可靠度分析方法。作者给出了采用蒙特卡罗法抽样研究结构可靠度的详尽分析步骤。分析结果表明:采用建立的响应面作为车撞桥墩的替代模型可以提高精度和计算效率,为大样本概率性分析提供了可能;采用规范 JTG 3362—2018 中公式所得失效概率计算值偏于不安全。

人工智能算法在桥梁撞击领域也得到了应用。李梁^[71]以 ANSYS/LS-DYNA 计算的 110 组不同工况下的车辆—桥墩撞击力数据为训练样本、10 组数据作为测试样本,进行了基于人工神经网络的车辆—桥墩撞击力峰值、全局冲量、全局平均碰撞力预测,另外还对其参考文献湖南大学刘飞博士论文中的数值结果进行了预测。结果均表明,BP 神经网络的预测效果优于 RBF 神经网络。

近几十年来,陆续建成了十余座采用 CFRP 纤维增强复合材料拉索的桥梁,但目前对有预张力的 CFRP 拉索的抗冲击性能的研究鲜有文献报道。黄道斌^[72]采用 F800 型卡车作为碰撞用标准车,分析了入撞速度、吊索处主梁竖向刚度等不同参数对 CFRP 拉索车撞响应的影响。研究发现,CFRP 拉索破断时的峰值索力远低于其轴向拉伸破断力,应做专门防撞设计。程龙树^[73]研究了某大跨度连续梁拱组合桥在车辆撞击吊杆损伤后对桥梁结构造成的影响。对车辆撞击之后单组吊杆断裂、单组吊杆断裂旁边吊杆损伤、两组吊杆同时断裂等若干情况下,剩余吊杆轴力与位移以及内力的变化情况。

4 总结与展望

对桥梁撞击问题 2020 年研究文献进行总结、分类,并详细检视了其中的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) 汽车、船舶碰撞桥梁事故的统计数据库和不同类型车辆、船舶参数数据库的建立。PEER 对地震记录的统计整理极大方便了抗震科研人员对地震记录的选用。而在桥梁防撞方面尚缺少类似共享数据库,目前也缺少有影响的机构组织来承担桥梁撞击的基础统计工作。前事不忘后事之师,必须重视这方面事故统计分析和不同类型车辆、船舶相关参数的收集整理。另外,考虑到中国车型的独特性和目前较为精细的车辆模型大多为依据国外车型建立的现状,建立精细的中国典型车辆数据库显得十分必要^[7],同时对典型船舶也需做类似工作。

2) 目前桥梁抗撞击与防护的基础性试验数据尚较为缺乏,相关大型试验方法与数据稀少^[7]。例如,真实足尺的大型桥梁车撞、船撞和落石冲击试验相对匮乏,尤其是在中国几乎鲜有开展,或尚未公开。2011 年 Buth 等人进行了车辆碰撞试验,在此试验结果基础上,2012 年 AASHTO 即将等效静设计力从 1 800 kN 提高到 2 670 kN。可见,进行实验研究并得到可靠的实验数据,对于修订规范、指导设计十分必要。

3) 桥梁撞击合理数值分析模型的建立。基于材料性能试验,部分实验数据或者现场事故图片进行建模,在已验证后的数值模型上再开展参数影响数值研究的方式值得借鉴。真实的大型足尺撞击试验成本昂贵,数值分析技术仍然是现在的主要分析手段。但桥梁撞击分析需要接近真相的数值模拟,数值模型的参数选取要结合实际情况、有所依据;对于结果的分析也不能满足于试验和仿真结果一致,或附和试验数据而令数值仿真沦为“数字游戏”。对于结果不一致的情况更要分析其根本原因,才能在桥梁撞击仿真技术和试验方面均有所提高。

4) 基于性能的设计方法研究应在桥梁撞击领域继续深入、细化开展。一些研究人员试图为桥梁撞击问题建立一种基于性能的设计方法。笔者在 2019 年度研究进展中对此有所关注,而基于性能的抗撞设计思想在我国 2020 年发布的《公路桥梁抗撞设计规范》中也已经有明确体现,并给出了两个作用水准。基于性能的桥梁抗撞设计思想应进一步推广和完善。

5) 多灾害耦合作用在现行的桥梁设计规范中,通常采用单一危害来进行设计和安全评价。然而,多种灾害同时发生或链式效应,如洪水冲刷和船舶撞击、地震落石协同致灾、撞击伴随火灾发生等,会对桥梁系统造成更严重的破坏,其致灾机理和安全评估也更为复杂。在这方面的研究工作正在启动,还需深入。

6) 桥梁撞击发生后,缺少快速有效评估结构安全性和剩余承载力的方法;而对于层出不穷的各类桥梁防撞装置来说,其防护性能也缺少较一致的评价方法和标准。另外,神经网络、深度学习目标检测等人工智能技术运用于撞击力预

测和风险评估,以实现智能感知和判断,将为进一步的分析 and 决策提供技术支持,这也是营造数字交通环境的一条途径。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国公安部. 公安部部署开展打击长江流域黑恶势力非法采砂违法犯罪专项行动取得阶段性成果 [EB/OL]. (2019-10-10). <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c6830966/content.html>.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗撞设计规范 JTG/T 3360-02—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- [3] ZHOU X W, ZHANG W C, GAO Y S, et al. A study of the cumulative impact forces of stainless-steel reinforced concrete pier [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2020, 20(1): 13-22.
- [4] GHOLIPOUR G, ZHANG C W, MOUSAVI A A. Nonlinear numerical analysis and progressive damage assessment of a cable-stayed bridge pier subjected to ship collision [J]. *Marine Structures*, 2020, 69: 102662.
- [5] 邓超, 温永华, 吴琼. 船桥撞击力理论公式与数值模拟对比研究[J]. *福建交通科技*, 2020(3): 104-108.
- [6] 戴志伟, 方海, 刘伟庆, 等. 考虑墩顶约束作用的桥墩船撞力学模型及其响应[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(3): 366-372.
- [7] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2014[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(5): 1-96.
- [8] GUO J, HE J X. Dynamic response analysis of ship-bridge collisions experiment [J]. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2020, 21(7): 525-534.
- [9] GUO X, ZHANG C, CHEN Z Q. Dynamic performance and damage evaluation of a scoured double-pylon cable-stayed bridge under ship impact [J]. *Engineering Structures*, 2020, 216: 110772.
- [10] 张琛. 冲刷和船撞共同作用下桥梁结构动力响应研究[D]. 江苏 扬州: 扬州大学, 2020.
- [11] 陈伟. 桥梁在冲刷和船撞共同作用下的冲击易损性分析[D]. 江苏 扬州: 扬州大学, 2020.
- [12] OPPONG K, SAINI D, SHAFEI B. Vulnerability assessment of bridge piers damaged in barge collision to subsequent hurricane events [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(8): 04020051.
- [13] ZHANG W, LIU S Y, LUO W W, et al. A new approach for probabilistic risk assessment of ship collision with riverside bridges [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020(2): 1-12.
- [14] FAN W, SUN Y, YANG C C, et al. Assessing the response and fragility of concrete bridges under multi-hazard effect of vessel impact and corrosion [J]. *Engineering Structures*, 2020, 225: 111279.
- [15] WANG W, MORGENTHAL G, HELMRICH M. Damage identification of a single RC column subjected to barge impact based on optimization strategies [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 216: 107979.
- [16] 刘少康. 船桥碰撞动力响应评估与船撞力预测方法研究[D]. 辽宁 大连: 大连海事大学, 2020.
- [17] 宋明康. 船舶撞击作用下桥梁结构时变可靠度研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
- [18] 林志丹. 船舶撞击桥梁事故原因与教训浅析[J]. *公路交通科技(应用技术版)*, 2020, 16(6): 311-313.
- [19] 郭健, 何威超. 跨海桥梁船撞风险综合评估[J]. *海洋工程*, 2020, 38(5): 125-133.
- [20] 陈兵, 许肇峰, 魏斌, 等. 牛湾特大桥通航安全评估[J]. *广东公路交通*, 2020, 46(1): 35-42, 50.
- [21] 朱俊羽, 方海, 韩娟, 等. 非通航孔桥防船撞拦截系统的研究概述与实例分析[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2020, 42(5): 634-641.
- [22] 朱俊羽, 祝露, 韩娟, 等. 某航道桥下部结构受船舶撞击后安全性能评估及修复[J]. *世界桥梁*, 2020, 48(1): 87-92.
- [23] FAN W, ZHANG Z W, HUANG X, et al. A simplified method to efficiently design steel fenders subjected to vessel head-on collisions [J]. *Marine Structures*, 2020, 74: 102840.
- [24] 罗强, 刘榕, 樊伟, 等. 钢-复合材料组合防撞装置在不同船舶撞击下的性能分析[J]. *桥梁建设*, 2020, 50(1): 67-73.
- [25] 汪银根. 通航桥梁抗撞能力评估及防撞设施方案选择[J]. *福建建材*, 2020(11): 65-67.
- [26] MANOHAR T, SURIBABU C R, MURALI G, et al. A novel steel-PAFRC composite fender for bridge pier protection under low velocity vessel impacts [J]. *Structures*, 2020, 26: 765-777.
- [27] SHAN C L. Analysis of collision performance of anticollision box made of steel-polyurethane sandwich plates [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 175: 106357.
- [28] 陈巍, 耿波, 沈锐利, 等. 转筒式钢-复合材料套箱防船撞性能研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(6): 936-944.
- [29] ZHOU L Y, LI H Y, WEI J, et al. Design and simulation analysis of a new type of assembled UHPC collision avoidance [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10

- (13): 4555.
- [30] 郁嘉诚, 韩娟, 祝露, 等. 隔离墩与自浮结构相组合的桥梁防船撞系统方案与评估[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 626-633.
- [31] 潘晋, 黄义飞, 夏天, 等. 基于 AIS 数据的桥梁防船撞结构冲击响应分析[J]. 桥梁建设, 2020, 50(1): 32-37.
- [32] 毛德涵, 余葵, 刘洋, 等. 拱形防撞带模型设计与相似性检验[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10907-10911.
- [33] WANG W, MORGENTHAL G, KRAUS M. Numerical evaluation of a novel crashworthy device for pier protection from barge impact [J]. *Engineering Structures*, 2020, 212: 110535.
- [34] PEDERSEN P T, CHEN J, ZHU L. Design of bridges against ship collisions [J]. *Marine Structures*, 2020, 74: 102810.
- [35] WANG C M, DAO V, KITIPORNCHAI S. EASEC16; Proceedings of the 16th east asian-pacific conference on structural engineering and construction, 2019 [M]. Singapore: Springer Singapore, 2021: 101.
- [36] 夏焯, 陈李沐, 王君杰, 等. 基于 SSD 的桥梁主动防船撞目标检测方法与应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 97-105.
- [37] 闫兴非, 张涛, 侯伟, 等. G1501 跨沭港大桥主动防撞系统设计[J]. 城市道桥与防洪, 2020(10): 65-69, 13.
- [38] 徐一超, 张宇峰. 基于健康监测系统的桥梁船撞报警指标研究与应用[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(10): 104-105, 108.
- [39] 何侃. 基于多源信息融合的高等级航道桥梁主动防船撞系统[J]. 中国水运, 2020(10): 81-83.
- [40] 张雷, 马广, 王江波. 渤海海峡跨海桥梁方案研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(Sup1): 99-103.
- [41] 钟汉清, 吕梁, 辜友平, 等. 基于 Hertz 理论的落石撞击桥墩冲击力计算公式及参数研究[J]. 中外公路, 2020, 40(1): 113-119.
- [42] 王翔, 牌立芳, 吴红刚. 拉林铁路变坡面倾角崩塌落石对桥梁结构破坏作用的模拟分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(8): 1622-1633.
- [43] 孙宗磊, 杨少军, 刘琛, 等. 基于 UHPC 板和 EPS 耗能层的落石冲击力研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(7): 88-92.
- [44] 杨少军, 刘琛, 高明昌. 桥梁防治危岩落石的设计标准探讨[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(Sup1): 74-79.
- [45] 方钱宝, 张晓强. 桥隧相连落石防护新型结构动力响应分析[J]. 高速铁路技术, 2019, 10(6): 63-68.
- [46] 余志祥, 张丽君, 骆丽茹, 等. 韧性挑篷防护网系统抗冲击性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(12): 2505-2516.
- [47] 张佳宁, 解珂, 阳波, 等. 山区桥梁双柱式高墩受滚石撞击的影响分析[J]. 科学技术创新, 2020(3): 114-115.
- [48] 陆科林. 新型管翼缘组合梁桥多工况静动力性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [49] ZHANG C W, GHOLIPOUR G, MOUSAVI A A. State-of-the-art review on responses of RC structures subjected to lateral impact loads [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, 28(4): 2477-2507.
- [50] OZDAGLI A I, MOREU F, XU D, et al. Experimental analysis on effectiveness of crash beams for impact attenuation of overheight vehicle collisions on railroad bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(1): 04019133.
- [51] LI R W, ZHOU D Y, WU H. Experimental and numerical study on impact resistance of RC bridge piers under lateral impact loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 109: 104319.
- [52] CHEN L, WU H, LIU T. Shear performance evaluation of reinforced concrete piers subjected to vehicle collision [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(4): 04020026.
- [53] WU M, JIN L, DU X L. Dynamic responses and reliability analysis of bridge double-column under vehicle collision [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111035.
- [54] 唐杨. 基于 ANSYS 的钢桁架桥汽车撞击分析[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2020, 19(1): 55-59.
- [55] 王向阳, 吴琼, 张林凯. 基于 LS-DYNA 的车-桥墩碰撞及可靠度研究[J]. 公路交通科技, 2020, 37(5): 64-72.
- [56] SHARMA R, SILVESTRI DOBROVOLNY C, HURLEBAUS S, et al. Adequacy of Manitoba concrete bridge rail during truck platoon impacts and associated occupant risks [J]. *International Journal of Crashworthiness*, 2020: 1-11.
- [57] WANG S J, SUN Q S, YANG J X. Effect of vehicle quality and speed on the impact characteristics of an overpass bridge pier [J]. *Stavební Obzor-Civil Engineering Journal*, 2020, 29(2): 192-203.
- [58] PAN J, FANG H, XU M C, et al. Dynamic performance of a sandwich structure with honeycomb composite core for bridge pier protection from vehicle impact [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020,

- 157: 107010.
- [59] PAN J, FANG H, XU M C, et al. Study on the performance of energy absorption structure of bridge piers against vehicle collision [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 130: 85-100.
- [60] LU C H, ZHANG Z Y, TAN W, et al. Optimization design of highway cable barriers based on collision safety consideration [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 62 (6): 3507-3520.
- [61] 廖福勇,王永峰,贾小龙. 基于刚度匹配的桥梁防撞装置技术研究及应用[J]. *中外公路*, 2020, 40(6): 332-336.
- [62] LI Y H, DONG Y, FRANGOPOL D M, et al. Long-term resilience and loss assessment of highway bridges under multiple natural hazards [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, 16(4): 626-641.
- [63] KIM K, LEE J. Fragility of bridge columns under vehicle impact using risk analysis [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 1-14.
- [64] PETRINI F, GKOUKAS K, ROSSI C, et al. Multi-hazard assessment of bridges in case of hazard chain: State of play and application to vehicle-pier collision followed by fire [J]. *Frontiers in Built Environment*, 2020, 6: 580854.
- [65] CHEN L, WU H, LIU T. Vehicle collision with bridge piers: A state-of-the-art review [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2021, 24(2): 385-400.
- [66] 韩艳,王龙龙,刘志浩. 桥墩受车辆撞击研究综述[J]. *城市道桥与防洪*, 2020(5): 271-275, 31.
- [67] LI R W, WU H, YANG Q T, et al. Vehicular impact resistance of seismic designed RC bridge piers [J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 111015.
- [68] LAI J, XU J M, WANG P, et al. Numerical investigation on the dynamic behaviour of derailed railway vehicles protected by guard rail [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020: 1-22.
- [69] 吕思雨,钟睦,鲁寨军,等. 基于有限元仿真的列车-桥梁防护墙碰撞研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(1): 8-15.
- [70] 樊伟,毛薇,庞于涛,等. 钢筋混凝土柱式桥墩抗车撞可靠度分析研究[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(2): 162-176.
- [71] 李梁. 基于神经网络的车辆-桥墩撞击力研究[D]. 四川绵阳: 西南科技大学, 2020.
- [72] 黄道斌. 碳纤维拉索的温度效应及车撞响应研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [73] 程龙树. 大跨度连续梁拱组合桥在车辆撞击吊杆损伤后的结构性能研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2020.

(编辑 袁虹)