

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.209



桥梁抗震 2020 年度研究进展

赵灿晖, 贾宏宇, 岳伟勤, 游刚, 贾康, 郑史雄

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:地震可能对桥梁结构产生巨大的破坏力,造成桥梁损伤,甚至垮塌。桥梁抗震一直是桥梁领域内的重要研究方向。本文归纳总结了 2020 年桥梁抗震领域的研究成果和发展趋势,主要包括:探索了用新型材料代替普通混凝土后墩柱的抗震性能;通过振动台实验和数值模拟,验证了摇摆隔震桥墩具有良好的抗震性能;采用碳纤维布护套加固墩柱可以显著提高墩柱的位移延性,减少残余位移;传统单肢转双肢薄壁高墩的抗震性能更好,主筋率较高的双肢薄壁墩滞回曲线较为饱满,耗能性能良好,提高轴压比显著提高桥墩的延性性能;带消能连梁的矩形空心双柱式高墩具有更好的耗能能力、承载能力和位移延性能力;采用摩擦摆支座加限位耗能杆的减隔震体系,具有良好的减隔震效果,内力减震率可达 20% 以上;研究了用新型无粘结钢网橡胶支座(USRB)代替桥梁中无粘结叠层橡胶支座(ULNR)的可靠性;通过数值模拟,探究了近场地震动和土-结构相互作用对桥梁动力响应的影响。

关键词:桥梁抗震;减隔震装置;新型构造;局部损伤;桩土效应

中图分类号: U441.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0091-09

State-of-the-art review of seismic design of bridge in 2020

ZHAO Canhui, JIA Hongyu, YUE Weiqin, YOU Gang, JIA Kang, ZHENG Shixiong

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

Abstract: Earthquake may cause great damage to bridge structure, damage and even collapse of bridge. The seismic resistance of bridges has always been an important research direction in the field of bridges. This paper summarizes the research results and development trend of the seismic field of bridges in 2020, and the main conclusions are as follows: the seismic performance of the pier column after replacing ordinary concrete with new materials is explored; The shaking isolation pier has good seismic performance through shaking table experiment and numerical simulation; The displacement ductility and residual displacement of the pier can be improved by using the carbon fiber cloth sheath to strengthen the pier column; The traditional single leg to double limb thin-walled high pier has better seismic performance, the hysteretic curve of the double limb thin-walled pier with high main reinforcement ratio is full, and the energy consumption performance is good, and the axial pressure ratio is improved significantly; The rectangular hollow double column high pier with energy dissipation beam has better energy consumption capacity, bearing capacity and displacement ductility; The system of vibration reduction with friction pendulum support and limit energy dissipation rod has good effect of reducing isolation, and the internal force damping rate can reach more than 20%; The reliability of using new type of unbonded steel mesh rubber support (USRB) instead of unbonded laminated rubber support (ULNR) in bridge is studied; The influence of near field vibration and soil structure interaction on the dynamic response of the bridge is investigated.

Keywords: seismic design of bridges; energy dissipation device; novel connection; local damage; pile soil effect

桥梁常地处交通运输的咽喉要道,是生命线系统中的关键节点。地震可能对桥梁结构产生巨大的破坏力,造成桥梁损伤,甚至垮塌。桥梁垮塌会严重阻碍抗震救灾的顺利进

行。因此,如何减轻桥梁损伤和防止桥梁垮塌是桥梁工程中的重点和热点问题。继西南交通大学桥梁系《桥梁抗震 2019 年度研究进展》发布,《2020 年桥梁抗震进展》以 2019 年为基

收稿日期:2021-06-18

基金项目:川藏铁路系统性重大科研项目(P2018G007-K04-004);国家自然科学基金(51708466)

作者简介:赵灿晖(1970-),男,教授,博士生导师,主要从事桥梁抗震研究,E-mail:zch2887@163.com。

础导向,综述各国学者在桥梁抗震领域的研究成果。通过查阅部分文献,综述 2020 年关于桥梁抗震领域的研究进展,以掌握该领域内的研究热点以及发展趋势。检索文献的主要来源有:通过 CNKI 检索桥梁、抗震性能、地震反应等中文关键词,主要筛选《土木工程学报》《工程力学》《振动与冲击》《地震工程与工程振动》《建筑结构学报》《中国公路学报》《西南交通大学学报》和《铁道建筑》等中文核心期刊;通过 Web of Science 检索 bridge、seismic performance、seismic response 等英文关键词,主要筛选 *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *Journal of Structural Engineering*, *Computers and Structures*, *Engineering Structures*, *Journal of Bridge Engineering*, *Journal of Earthquake Engineering* 等领域内知名英文期刊。

1 桥墩的抗震性能

桥墩是支撑桥梁上部结构的建筑物,为地震作用时的主要抗侧力构件。研究表明,桥梁在地震下的破坏主要为下部结构的破坏,因此,桥墩抗震性能的研究一直是相关领域内的热点。2020 年度对桥墩抗震性能的研究大体上可以分为以下几个方向:传统钢筋混凝土桥墩的抗震性能、预制节段拼装桥墩的抗震性能、新型结构桥墩的抗震性能、加固后桥墩的抗震性能以及桥塔的抗震性能研究等。此外,随着新材料的不断发展,一些学者致力于将新型材料应用于桥墩,提高其抗震能力。采用的研究方法多为数值模拟结合拟静力试验,部分学者进行了振动台试验。研究的重点主要聚焦于墩柱的滞回能力、承载能力、耗能、残余位移和延性等方面。

1.1 传统钢筋混凝土桥墩的抗震性能

钢筋混凝土桥墩是目前桥梁建设中沿用最广泛的桥墩结构,研究钢筋混凝土桥墩在地震作用下的破坏模式及其抗震能力意义重大。张龙文等^[1]提出了基于结构响应极值前四阶矩的桥墩抗震可靠度分析方法,该方法为桥墩抗震可靠度评估提供有效途径。夏玉超等^[2]考虑动水压力和钢筋锈蚀共同作用,提出了优化后的考虑钢筋锈蚀的桥墩计算公式。Dong 等^[3]将自复位消能支撑(SCEB)模型应用于一座钢筋混凝土双柱排架桥,计算桥梁的地震反应,系统地研究了 SCEB 关键参数对该桥地震反应的影响。李艳凤等^[4]在有限元模拟的基础上对典型的钢筋混凝土 Y 型桥墩(图 1)在强震下的抗震性能进行了评估。部分学者研究了用新型混凝土材料代替普通混凝土以提高墩柱的抗震性能。如台玉吉等^[5]研究了采用轻骨料混凝土替代普通混凝土以降低结构自重、提高墩柱变形能力,从而减小桥梁在强震下的地震反应。Eftekhari 等^[6]采用一系列多尺度模拟方法探讨了循环荷载作用下碳纳米管钢筋混凝土柱的承载能力及能量吸收(图 2)。

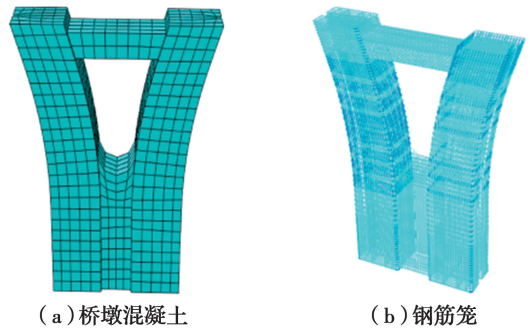


图 1 Y 型桥墩的有限元模拟模型^[4]

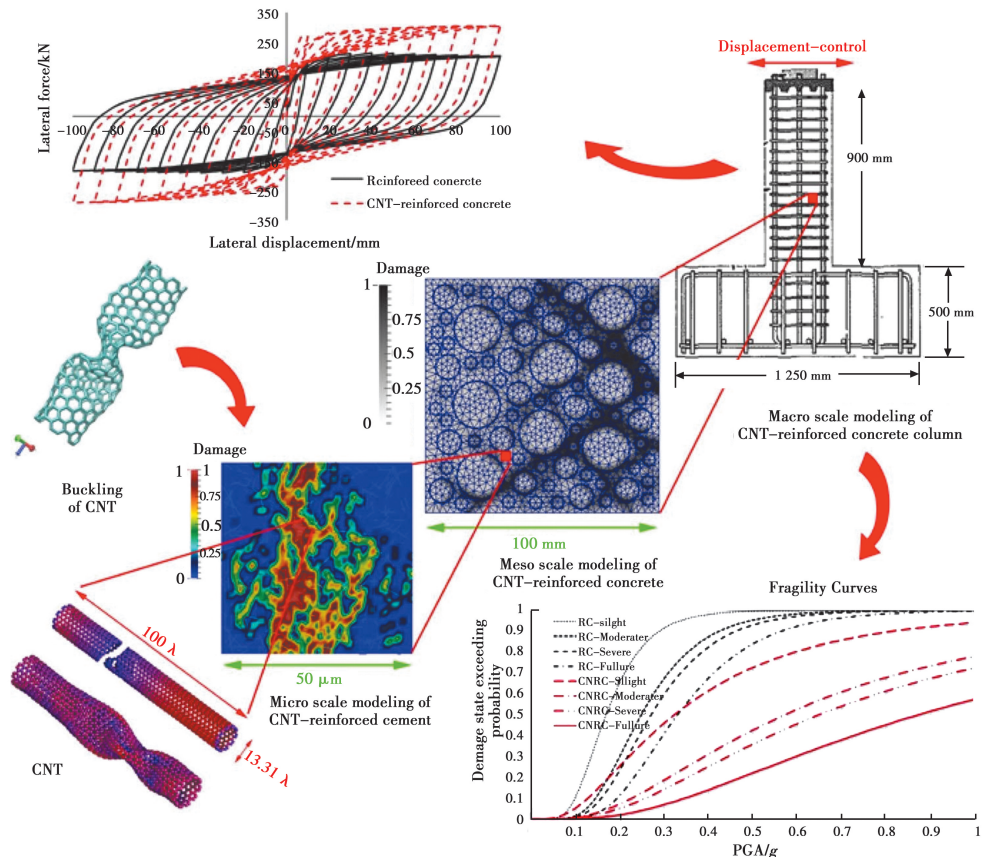


图 2 循环荷载作用下碳纳米管钢筋混凝土柱的多尺度模拟^[6]

1.2 预制节段拼装桥墩的抗震性能

随着装配式桥梁的进一步发展,预制节段拼装桥墩因其施工速度快、干扰小、震后残余位移小等优点,一直是地震工程领域的研究热点。对于预制拼装桥墩而言,节段与节段及节段与基础间的有效连接严重影响结构的抗震能力。许多学者致力于发展更可靠、更简单的预制连接技术,以提高桥墩的抗震性能。Liu 等^[7]针对某一实际预制桥梁工程,建立了 3 个 1/4 缩尺柱模型,进行循环荷载作用下的试验研究,研究灌浆套筒连接预制桥墩的抗震性能。Wang 等^[8]针对预制墩柱,提出了大直径钢筋搭接超高性能混凝土灌浆的新型连接方式,研究了滑移效应对墩柱抗震性能影响(图 3)。Xia 等^[9]通过振动台试验,评估了预制节段混凝土双柱(PSCDC)钢套筒(SS)连接和灌浆波纹金属导管(GCMD)连接桥墩的抗震能力,并说明了 PSCDC 桥墩的破坏主要是由连接节点的循环开闭引起的。韩艳等^[10]较系统地研究了墩柱嵌入深度、灌浆料强度等因素对承插式装配桥墩抗震性能的影响。徐文靖等^[11]比较了采用灌浆套筒连接的预制拼装桥墩与整体现浇桥墩的性能差异,以及不同直径的灌浆套筒对此类预制拼装桥墩抗震性能的影响。

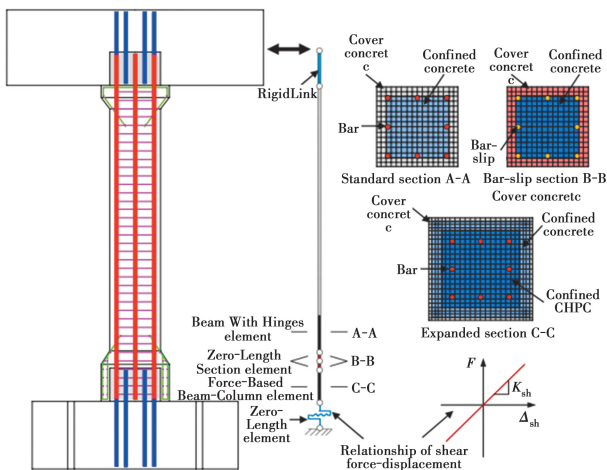


图 3 有限元模型^[8]

部分学者围绕预制节段拼装桥墩的地震响应及耗能能力进行了探讨。Li 等^[12]采用基于性能的地震工程(PBEE)框架比较评估了预制节段超高性能混凝土桥墩与传统整体混凝土桥墩的结构响应及易损性。蔡忠奎等^[13]提出以高强钢筋替代传统预制节段拼装桥墩中普通贯通钢筋的新方案,借此综合提高预制节段拼装桥墩的抗震性能和自复位能力。赵建锋等^[14]提出了一种由刚性单元、非线性梁柱单元、零长度单元配合 ENT 单压材料组成的干接缝单元(图 4)。在此基础上研究了不同耗能装置对预制拼装桥墩的滞回能力等性能参数的影响。王文炜等^[15]比较研究了外置耗能钢板预制拼装桥墩与整体现浇桥墩、内置耗能钢筋的预制拼装桥墩的抗震性能。

1.3 新型结构桥墩的抗震性能

桥梁抗震设计逐渐向震后可恢复性设计发展,摇摆隔震桥墩、自复位桥墩及设置可更换构件桥墩等诸多具有震后可

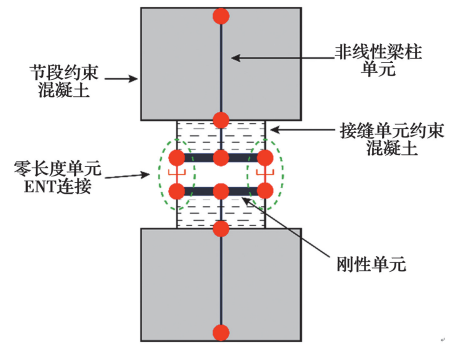


图 4 干接缝单元模型^[14]

恢复功能的新型结构桥墩形式应运而生。郭展等^[16]提出了设置高阻尼橡胶垫块和线性弹簧的两种基底摇摆隔震桥墩模型(图 5),并通过振动台试验和数值模拟,验证了两种摇摆隔震桥墩均具有良好的抗震性能。卓卫东等^[17]基于可恢复功能抗震设计原理,创新性地提出了钢管混凝土柱-软钢消能元件组合箱形截面高墩桥梁的设计概念。Thomaidis 等^[18]探讨了考虑桥台回填系统影响的桥梁摇摆隔震概念,推导了桥梁摇摆运动预测的新关系式。Salehi 等^[19]探讨了包括滑动节点的数量及其在柱高上的分布、初始滑动基底剪力、初始承载滑动幅度和峰值可达到滑动承载力内的主要设计变量对混合滑移-摇摆(HSR)桥柱抗震性能的影响。Giouvanidis 等^[20]研究了单柱摇摆桥梁的抗震性能和震后恢复力。王源等^[21]对带消能连梁的矩形空心双柱式高墩抗震性能进行试验研究。结果表明,与普通的矩形空心双柱式高墩相比,带消能连梁的矩形空心双柱式高墩具有更优良的抗震性能。

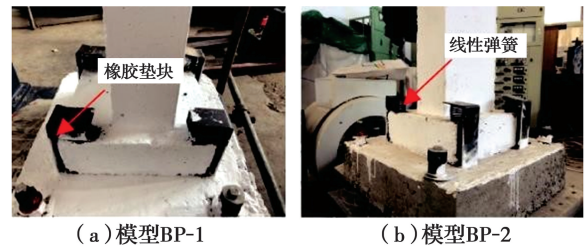


图 5 提离约束部件构造^[16]

1.4 加固后桥墩的抗震性能

大多数现有钢筋混凝土桥墩建于 20 世纪 80 年代以前,在现代抗震设计理念下,其墩柱抗震性能普遍较弱,如何进行抗震加固是近年来许多学者关注的问题。Jia 等^[22]研究了碳纤维加固低水平锈蚀柱(图 6)的抗震性能和加固效果,结果表明,采用碳纤维布护套加固墩柱可以显著提高墩柱的位移延性,并在一定程度上减小残余位移。黄海新等^[23]利用 OpenSees 有限元软件建立了普通钢筋混凝土桥墩以及分别采用钢套管、碳纤维增强聚合物(CFRP)、体外预应力筋进行加固的桥墩数值分析模型,对比分析了不同加固方式对钢筋混凝土圆截面桥墩抗震性能的影响。Wakjira 等^[24]采用参数研究方法,研究了在不同损伤极限状态下,包括混凝土核心破碎、纵向钢筋屈服和延性性能等因素对钢纤维复合材料加

固桥墩抗震性能的主要影响及其相互作用。马煜等^[25]采用箍筋加密和外包碳纤维增强复合材料(CFRP)布对预制节段拼装桥墩底部节段进行加固,对比两种加固方式对预制节段拼装桥墩抗震性能的影响。潘盛山等^[26]研究国产镍钛铌形状记忆合金(NiTiNb-SMA)丝主动约束加固钢筋混凝土墩柱的抗震性能。谷音等^[27]对采用聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料(PVA-ECC)加固的桥墩进行了拟静力试验,研究工程水泥基复合材料(ECC)加固桥墩的抗震性能。黄海新等^[28]深入研究了圆钢管全长加固、套筒加固和墩底局部加固对RC圆截面桥墩的抗震性能影响。



图 6 氯离子侵蚀钢筋混凝土桥柱试件^[22]

1.5 桥塔抗震性能

随着桥梁跨度的不断增加,悬索桥、斜拉桥等大跨桥梁的抗震性能研究成为国内外学者最关心的课题之一。朱家豪等^[29]针对实际钢塔斜拉桥工程,采用有限元软件SAP2000对斜拉桥的动力特性、主塔地震反应和抗震性能等进行了分析。段佳宏等^[30]以大渡河大桥为研究对象,探究了采用波形钢腹板横梁悬索桥桥塔的优势和近场效应对结构响应的影响规律。郑锋利等^[31]研究了塔梁连接方式对多塔悬索桥地震反应的影响。张超等^[32]基于某斜拉桥实际方案,探讨了不同类型地震动对于各种塔型斜拉桥地震响应的影响。

2 桥梁抗震措施

在桥梁抗震领域内,有关桥梁抗震措施的研究一直以来也是重点关注对象。为了提高结构抵抗地震的能力,防止和减轻地震给桥梁结构带来的损害,通常对桥梁结构构造做改造和加固处理,提高结构抗震能力。本年度对桥梁抗震措施的研究主要有 3 个方面:桥墩的种类、支座结构和新型阻尼器。大多数学者通过建立相关桥梁模型,对比不同的抗震性能指标,评价不同抗震措施的优劣性。

2.1 桥墩的形式

地震作用下桥墩会发生不同程度的倾斜、移动、沉降、开裂,严重时钢筋会裸露扭曲,这些现象严重影响桥梁的抗震性能。大量桥梁震害研究表明,桥梁破坏和倒塌主要是由桥墩的破坏和柱破坏引起的。在桥梁抵抗地震作用时,桥墩起重要作用,因此,研究桥墩的抗震性能对桥梁整体抗震性能起直接作用。本年度学者对桥墩抗震性的研究主要是不同形式桥墩的抗震性能,主要为单肢转双肢薄壁高墩,双肢薄

壁墩,带消能连梁的矩形空心双柱式高墩。

卢尧等^[33]对比了单肢转双肢薄壁高墩及双肢薄壁墩两种模型在三向地震作用下的动力响应,发现在顺桥向墩顶位移上,二者墩顶顺桥向位移时程变化趋势虽然基本上一致,但单肢转双肢薄壁高墩的极限位移值明显小于双肢高墩墩顶顺桥向位移,二者的位移值相差 55.2%,传统单肢转双肢薄壁高墩的抗震性能更好(图 7)。

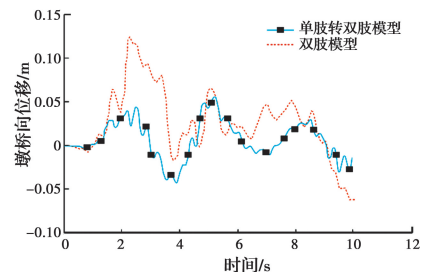


图 7 两模型右墩墩顶顺桥向位移动态时程^[33]

陈爱军等^[34]采用低周反复荷载试验探讨了不同轴压比、主筋率及体积配箍率对大跨连续刚构桥双肢薄壁桥墩抗震性能的影响,得到了各试验墩的破坏特性、滞回曲线、位移延性与耗能性能。发现,主筋率较高的双肢薄壁墩滞回曲线较为饱满,耗能性能良好,适当提高轴压比可显著提高该桥墩的延性性能。王源等^[21]按一定几何缩尺比制作了矩形空心双柱式高墩和带消能连梁的矩形空心双柱式高墩模型,进行了低周往复荷载作用下的拟静力试验研究,通过实验发现,带消能连梁的矩形空心双柱式高墩具有更好的耗能能力、承载能力和位移延性能力,消能连梁可有效减小墩柱曲率,从而有效降低墩柱的地震损伤。Chen 等^[35]提出了基于拟静力试验结果的隔震桥墩抗震性能评价的数值模型,并通过振动台试验进行了验证。

2.2 支座结构

支座是连接桥梁上、下部结构的关键枢纽,其发挥的关键作用表现为将桥梁上部结构的变形和荷载传递给下部结构。在地震引起桥梁损害的过程中,支座是较薄弱的环节,而且支座的 Form 和支座材料性能优劣对桥梁抗震有较大的影响。支座的破坏形式一般有:支座脱落、支座移位和支座销栓剪断。通过改善支座的 Form 和研究新型支座材料是桥梁的抗震措施之一。2020 年学者的研究主要关注摩擦摆式支座、减隔震支座、形状记忆合金铅芯橡胶支座、E 型钢阻尼支座和新型无粘结钢网橡胶支座。

高军等^[36]对大跨度斜拉桥摩擦摆式支座减震性能进行分析,最终采用边墩及辅助墩均设置摩擦摆支座方案。曾永平等^[37]采用摩擦摆支座加限位耗能杆的减隔震体系,其具有良好减隔震效果,内力减震率可达 20% 以上。黄朝光^[38]按照一定的比例建立了双曲面球型减隔震支座的变高度钢桁梁节段的缩尺模型,对其进行拟静力试验研究。Chen 等^[39]以高墩桥梁为研究对象,研究了铅芯橡胶支座和摇摆基础等不同抗震加固措施对桥梁地震反应的缓解效果(图 8)。Li^[40]研究了用新型无粘结钢网橡胶支座(USRB)代替这些桥

梁中无粘结叠层橡胶支座(ULNR)的可靠性。

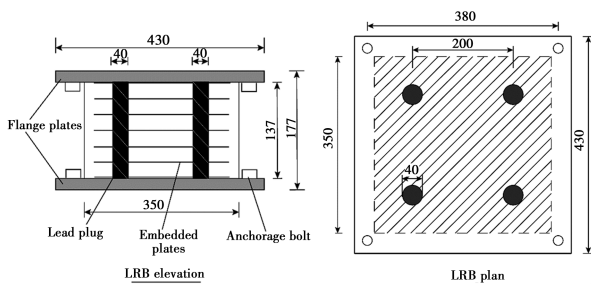


图 8 LRB 尺寸图^[39]

2.3 新型阻尼器

阻尼器是桥梁抗震设计中耗能装置的一种,阻尼器在桥梁抗震中的作用主要是消耗能量、减弱震害。近些年来,阻尼器在大跨度桥梁中的应用越来越广泛。新型材料的出现以及抗震理念不断更新和完善,阻尼器的种类也逐渐增多,研发新型阻尼器也是提高桥梁抗震措施的一个有效方面。大量学者对新型阻尼器开展了研究,主要有新型油阻尼器,粘滞阻尼器,软钢阻尼器和调谐质量阻尼器等。

牛建涛等^[41]研制了刚度可变的新型油阻尼器,建立其恢复力模型并通过单轴动力试验验证新型油阻尼器的工作原理,对比了新型油阻尼器与已有两种金属阻尼器的减震性能,新型油阻尼器有更低的等效刚度和更高的耗能能力(图 9)。贺坤龙等^[42]研究软钢阻尼器对一座高速铁路大跨度上承式钢管混凝土劲性骨架拱桥的减震效果,发现软钢阻尼器对拱桥减震效果明显,在拱上立柱安装软钢阻尼器,其位移减震率达到 43.5%,弯矩减震率达到 60.5%。Huang 等^[43]研制一种具有形状记忆合金(SMA)的调谐质量阻尼器(TMD),将基于 SMA 的 TMD 安装在钢框架上(图 10),在地震荷载下进行试验。研究结果表明,当主结构的频率变化顺序相同时,基于形状记忆合金的 TMD 性能良好。但当温度升高到 19℃ 以上时,SMA 的阻尼比减小,减振效果较差。肖开乾等^[44]通过 ANSYS 建立斜拉桥的有限元模型,进行地震作用下的动力非线性时程分析,研究了粘滞阻尼器参数对桥梁抗震性能的影响规律,并确定了合理的阻尼器参数取值。

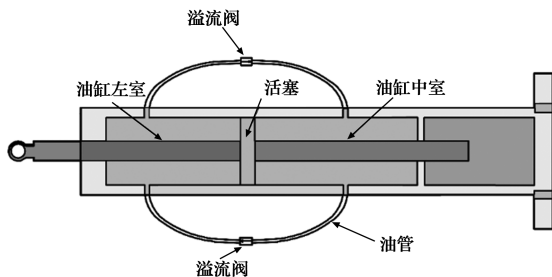


图 9 新型油阻尼器构造图^[41]

3 接触问题

接触研究涉及多个物理场相互叠加的问题,主要指在地震作用下,土-结构耦合、车-桥耦合、墩-水耦合等方面问题。这也是当前研究分析尚未解决的难题。近年来,数值模拟已成为推动桥梁抗震技术发展的重要工具,对充分认识桥梁接

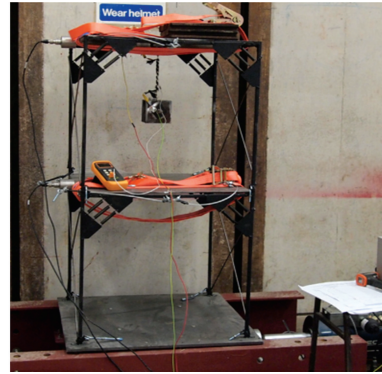


图 10 TMD 在钢架上的安装及振动台试验装置^[43]

触,解决多物理场耦合分析难题提供巨大帮助。

本年内学者的研究主要集中于土-结相互作用下桥梁的抗震性能。Mahjoubi 等^[45]提出了引入一个考虑土-结相互作用的独立边界非线性有限元模型,对整体式桥台桥梁的抗震性能进行参数分析,包括不同的土体类型、桥梁长度和桥台类型等。He 等^[46]采用基于性能的综合抗震评估方法,对多跨桩基桥梁进行抗震评估,说明了冲刷深度和土壤特性对桥梁抗震性能的影响。Homaei 等^[47]采用数值模拟,在概率框架下通过增量动力分析了土-结相互作用对旧混凝土拱桥地震响应的影响。卢尧等^[33]通过数值模拟分析了考虑不同桩土效应作用时,高墩桥梁在地震作用下桥墩内力与墩顶位移等方面的差异。Zhang 等^[48]基于分离式基础-曲线梁桥模型,提出了一种可行有效的地震反应分析方法,系统分析了考虑土-结相互作用的曲线梁桥在空间变化地震作用下的地震响应(图 11)。

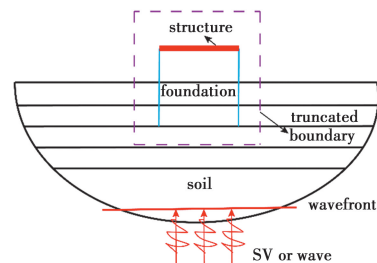


图 11 土-结构动力相互作用系统示意图^[48]

Fiorentino 等^[49]通过在整体式桥台桥梁物理模型上进行的一系列振动台试验,研究了桥梁模型、桥台、基桩和回填土之间的相互作用效应,以及探索在不同组合中使用抗弯和非抗弯桩-承台连接的潜在益处等。Tochaei 等^[50]通过实验和数值分析,对斜拉桥的地震响应进行了评估,说明了在近场地震动和土-结构相互作用下对桥梁动力响应的影响。González 等^[51]研究了土-结构相互作用对软土中桥梁抗震设计和响应的影响,说明了在地震荷载作用下,斜桩基础的使用对桥梁地震响应的影响。Mitoulis^[52]基于以往文献研究和数值模拟,对整体式桥台桥梁的地震响应进行阐述,说明了桥台-回填土相互作用对桥梁抗震性能的影响。Naji 等^[53]对整体式桥台桥梁进行探讨,识别分析在土-结构相互作用下影响整体式桥台桥梁抗震性能的最有效参数。Liang 等^[54]通过对桩群基础桥梁进行了离心振动台实验(图 12),研究地

震强度、土体非线性、土-结相互作用和冲刷深度对桥梁动力响应的影响,说明了不同冲刷深度条件下桥梁的抗震性能。



(a) 群桩桥 (b) 带有全桥应变仪的仪表桩

图 12 简化桥梁模型配置^[54]

此外,一些学者对车-桥耦合、墩-水耦合等方面进行了研究。Qiu 等^[55]通过数值模拟一个理想化的三维有限元模型,研究了液化引起的地面变形对桥梁结构响应显著特征的影响。雷虎军等^[56]采用数值模拟,分析了考虑车-桥耦合作用与不同地震动分量作用对车-轨-桥系统动力响应影响。Erdogan^[57]对真实公路桥梁在考虑车-桥相互作用和强震作用下的动力响应进行了数值研究,分析了近远场地震运动以及车速、路面不平度和土-结相互作用对桥梁地震响应的影响。Shamsi 等^[58]采用三维数值方法研究了同时存在列车荷载和地震荷载时,土-桩-桥-列车相互作用系统的单轨桥梁的动力响应。Ancai 等^[59]以一座连续跨海梁桥为研究对象,在优化的非线性粘滞阻尼器基础上,研究了动水压力对降低桥梁地震响应和减震性能的影响。

4 地震反应

桥梁的安全性是桥梁在设计过程中需要重点考虑的问题,而抗震性是桥梁设计中如何抵御地震危害的重要参数,保证桥梁在地震中的安全和正常使用,对城市和地区的抗震防灾减灾工作和灾区的震后恢复重建工作都具有重要意义。

4.1 桥梁地震响应

桥梁地震响应研究可综合考虑桥梁各关键构件对桥梁抗震性能的影响,主要分为构件材料、组合型态等影响。常用的研究方法为振动台试验和数值模拟。

学者对桥梁的地震反应进行了振动台试验研究,研究对象有简支梁桥、刚构桥、悬索桥和斜拉桥等。Lin 等^[60]对混凝土复合材料刚构桥梁进行了振动台试验,系统地研究了其断层穿越角和下陷步骤。段佳宏等^[30]利用杠杆原理加载进行了悬索桥振动台试验(图 13),研究了波形钢板横梁对其抗震性能的影响。Lin 等^[61]进行了对斜拉桥振动台试验(图 14),研究这些桥梁在强地震下的破坏进程和潜在的倒塌机制。

此外,诸多学者对桥梁的抗震性能和易损性进行了数值模拟研究。An 等^[62]定义了影响结构地震响应的地震动和结构系统的两个主要因素,评估了在近断层和远断层地面运动条件下各种纵横比的桥梁地震响应。国巍等^[63]研究了近断

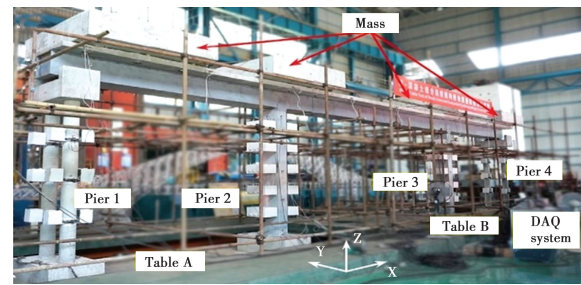


图 13 悬索桥的振动台测试^[30]

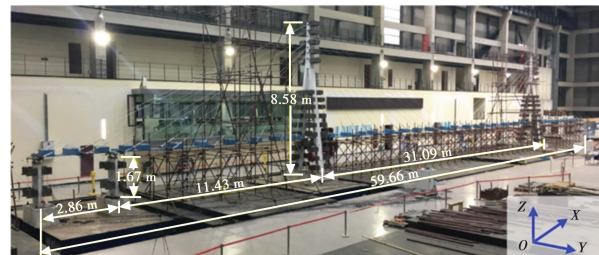


图 14 斜拉桥的振动台测试^[61]

层地震下多跨简支梁桥地震响应,指出高铁简支梁桥在近断层地震动下的破坏部位集中于梁缝处和滑动层。Liang 等^[64]评估了不同地面运动和地震需求估算的准确性和可靠性,以用于桥梁设计。Zheng 等^[65]研究了近断层地震作用下大跨度非对称悬索桥的易损性,研究表明近断层效应对大跨度悬索桥抗震性能影响显著。Li 等^[66]提出了新型的大跨度跨海斜拉桥抗震性能评估方法。Liu 等^[67]基于实测地震波进行了一系列参数分析,以评估倾角 θ 和界面摩擦系数 μ 对动力响应的影响;Talyan 等^[68]提出了被动隔振阻尼器对基础隔震桥梁进行地震响应控制的方法。徐略勤等^[69]揭示了服役性能劣化对装配式空心板桥抗震性能的影响,提出了空心板桥铰缝劣化和材料性能退化的动力分析方法。李鹏等^[70]对西南地区常见公路高墩、大跨连续刚构桥进行了近远场地震易损性分析研究。

4.2 桥梁抗震体系

学者对现有的桥梁抗震体系提出了优化,为今后桥梁抗震的创新表达了自己的观点。黄永福等^[71]提出在横桥向设置弹塑性约束装置可大幅降低结构地震响应,对弹塑性约束装置的工程应用提出了三道抗震设防防线的设计思路,为中等跨度斜拉桥抗震体系的选择提供参考。陈敬一等^[72]提出下层摇摆的双层桥梁结构,以弥补采用传统延性抗震设计的双层桥梁在地震损伤控制方面不足。

5 研究热点与展望

随着国家路网系统的不断发展,大量的桥梁已经处于高烈度、近断层和跨断层区域,对桥梁抗震提出新的要求。研究近断层、跨断层桥梁的动力响应是近些年的热点问题,近断层、跨断层桥梁如何降低桥墩地震损伤、有效实现震后桥墩自复位,以及如何发展新型地震保护装置、有效保证桥梁结构安全、降低桥梁结构地震损伤是桥梁抗震领域内的研究热点,也是未来的研究热点。随着人工智能技术的发展,如

何实质性地将人工智能技术引入到地震工程非常必要,基于人工智能的地震响应预测、地震波处理、抗震性能设计优化、桥梁结构韧性提高等方面也是未来的发展方向。

参考文献:

- [1] 张龙文, 卢朝辉. 基于结构响应极值前四阶矩的桥墩抗震可靠度[J]. 振动与冲击, 2020, 39(7): 36-42, 50.
- [2] 夏玉超, 李振. 考虑动水压力的桥墩钢筋锈蚀抗震性能改进模型研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(5): 1310-1316.
- [3] DONG H H, DU X L, HAN Q, et al. Numerical studies on the seismic performances of RC two-column bent bridges with self-centering energy dissipation braces [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(4): 04020038.
- [4] 李艳凤, 罗威力, 梁力. 强震下钢筋混凝土 Y 型桥墩的抗震性能评估[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(1): 109-114.
- [5] 台玉吉, 惠迎新, 师新虎, 等. 轻骨料混凝土桥梁地震易损性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(1): 129-138.
- [6] EFTEKHARI M, KARRECH A, ELCHALAKANI M. Investigation into the nonlinear time-history analysis of CNT-reinforced concrete column by a multiscale approach [J]. International Journal of Civil Engineering, 2020, 18(1): 49-64.
- [7] LIU Y, LI X P, ZHENG X H, et al. Experimental study on seismic response of precast bridge piers with double-grouted sleeve connections [J]. Engineering Structures, 2020, 221: 111023.
- [8] WANG Z, WANG J Q, ZHAO G T, et al. Numerical study on seismic behavior of precast bridge columns with large-diameter bars and UHPC grout considering the bar-slip effect [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18(10): 4963-4984.
- [9] XIA Z H, GE J P, LIN Y Q, et al. Shake table study on precast segmental concrete double-column piers [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020, 19(3): 705-723.
- [10] 韩艳, 董嘉雯, 王龙龙, 等. 承插式装配桥墩抗震性能拟静力试验与数值模拟[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(5): 63-70.
- [11] 徐文靖, 马磊, 黄虹, 等. 套筒连接的预制拼装桥墩抗震性能研究[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 93-104.
- [12] LI S, ZHAO T Y, ALAM M S, et al. Probabilistic seismic vulnerability and loss assessment of a seismic resistance bridge system with post-tensioning precast segmental ultra-high performance concrete bridge columns [J]. Engineering Structures, 2020, 225: 111321.
- [13] 蔡忠奎, 王震宇, 苑激. 高强钢筋增强节段拼装桥墩抗震性能分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 312-318.
- [14] 赵建锋, 孟庆一. 基于干接缝单元的预制拼装桥墩抗震性能数值模拟[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(2): 111-122.
- [15] 王文炜, 周畅, 薛彦杰, 等. 外置耗能钢板预制拼装桥墩抗震性能研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(9): 57-68.
- [16] 郭展, 陈誉, 何康. 基底摇摆隔震桥墩振动台试验与数值模拟研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(6): 38-48.
- [17] 卓卫东, 王志坚, 廖丽云, 等. 钢管混凝土柱-软钢消能元件组合高墩桥梁试设计[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(4): 483-489.
- [18] THOMAIDIS I M, KAPPOS A J, CAMARA A. Dynamics and seismic performance of rocking bridges accounting for the abutment-backfill contribution [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2020, 49(12): 1161-1179.
- [19] SALEHI M, SIDERIS P, LIEL A B. Effect of major design parameters on the seismic performance of bridges with hybrid sliding-rocking columns [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(10): 04020072.
- [20] GIOUVANIDIS A I, DONG Y. Seismic loss and resilience assessment of single-column rocking bridges [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18(9): 4481-4513.
- [21] 王源, 王天琦, 孙利民, 等. 带消能连梁的矩形空心双柱式高墩抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 159-167.
- [22] JIA J F, ZHAO L Y, WU S W, et al. Experimental investigation on the seismic performance of low-level corroded and retrofitted reinforced concrete bridge columns with CFRP fabric [J]. Engineering Structures, 2020, 209: 110225.
- [23] 黄海新, 张望欣, 程寿山, 等. 钢筋混凝土圆截面桥墩抗震加固方式对比分析[J]. 世界地震工程, 2020, 36(2): 163-171.
- [24] WAKJIRA T G, NEHDI M L, EBEAD U. Fractional factorial design model for seismic performance of RC bridge piers retrofitted with steel-reinforced polymer composites [J]. Engineering Structures, 2020, 221: 111100.
- [25] 马煜, 张于晔. CFRP 加固对预制节段拼装桥墩抗震性能的影响[J]. 地震工程学报, 2020, 42(4): 847-855.
- [26] 潘盛山, 乐锐, 惠华星, 等. NiTiNb-SMA 丝主动加固

- RC圆柱抗震性能试验[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(7): 93-101.
- [27] 谷音, 彭晨星. PVA-ECC加固桥墩抗震性能试验与数值研究[J]. 世界地震工程, 2020, 36(4): 147-154.
- [28] 黄海新, 张望欣, 程寿山. 基于OpenSees的圆钢管加固RC圆截面桥墩抗震性能数值分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(2): 113-120.
- [29] 朱家豪, 叶爱君, 韩大章, 等. 钢塔斜拉桥地震反应特性分析[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(2): 36-40, 100.
- [30] 段佳宏, 曹发辉, 林帆, 等. 近场地震作用下组合横梁桥塔的悬索桥地震响应研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(9): 221-228, 253.
- [31] 郑锋利, 陈逸民, 李建中, 等. 塔梁连接方式对多塔悬索桥地震反应的影响[J]. 公路交通科技, 2020, 37(8): 58-65.
- [32] 张超, 傅光辉, 林志滔, 等. 主塔类型对斜拉桥横向地震响应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(3): 97-107.
- [33] 卢尧, 鞠秀颖, 杨明, 等. 单肢转双肢薄壁高墩桥梁的抗震性能[J]. 深圳大学学报(理工版), 2020, 37(2): 151-157.
- [34] 陈爱军, 彭容新, 王解军, 等. 大跨连续刚构桥双肢薄壁墩抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(1): 1-7.
- [35] CHEN X, XIA X, ZHANG X, et al. Seismic performance and design of bridge piers with rocking isolation[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2020(4): 447-454.
- [36] 高军, 林晓. 大跨度斜拉桥摩擦摆式支座减震性能分析[J]. 桥梁建设, 2020, 50(2): 55-60.
- [37] 曾永平, 陈克坚, 庞林, 等. 近断层高速铁路典型桥梁抗震优化设计研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(8): 51-58.
- [38] 黄朝光. 带有双曲面球型减隔震支座的钢桁梁节段模型拟静力试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(4): 227-235.
- [39] CHEN X, LI C X. Seismic performance of tall pier bridges retrofitted with lead rubber bearings and rocking foundation [J]. Engineering Structures, 2020, 212: 110529.
- [40] LI H, XIE Y Z, GU Y T, et al. Shake table tests of highway bridges installed with unbonded steel mesh reinforced rubber bearings [J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110124.
- [41] 牛建涛, 丁阳, 石运东. 用于斜拉桥横向的新型油阻尼器减震性能研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(16): 55-61, 111.
- [42] 贺坤龙, 许伟, 户东阳, 等. 基于行波效应的大跨度上承式劲性骨架拱桥抗震性能分析[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 21-24.
- [43] HUANG H Y, MOSALAM K M, CHANG W S. Adaptive tuned mass damper with shape memory alloy for seismic application [J]. Engineering Structures, 2020, 223: 111171.
- [44] 肖开乾, 徐怀兵, 刘敏, 等. 大跨度斜拉桥抗震性能分析与减震控制研究[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(1): 57-63.
- [45] MAHJOUBI S, MALEKI S. Finite element modelling and seismic behaviour of integral abutment bridges considering soil-structure interaction [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020, 24(6): 767-786.
- [46] HE L G, HUNG H H, CHUANG C Y, et al. Seismic assessments for scoured bridges with pile foundations [J]. Engineering Structures, 2020, 211: 110454.
- [47] HOMAEI F, YAZDANI M. The probabilistic seismic assessment of aged concrete arch bridges: The role of soil-structure interaction [J]. Structures, 2020, 28: 894-904.
- [48] ZHANG L X, GU Y. Seismic analysis of a curved bridge considering soil-structure interactions based on a separated foundation model [J]. Applied Sciences, 2020, 10(12): 4260.
- [49] FIORENTINO G, CENGİZ C, DE LUCA F, et al. Integral abutment bridges: Investigation of seismic soil-structure interaction effects by shaking table testing [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, 50(6): 1517-1538.
- [50] TOCHAEI E N, TAYLOR T, ANSARI F. Effects of near-field ground motions and soil-structure interaction on dynamic response of a cable-stayed bridge [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 133: 106115.
- [51] GONZÁLEZ F, CARBONARI S, PADRÓN L A, et al. Benefits of inclined pile foundations in earthquake resistant design of bridges [J]. Engineering Structures, 2020, 203: 109873.
- [52] MITOULIS S A. Challenges and opportunities for the application of integral abutment bridges in earthquake-prone areas: A review [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 135: 106183.
- [53] NAJI M, FIROOZI A A, FIROOZI A A. A review: Study of integral abutment bridge with consideration of soil-structure interaction [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2020, 17(2): 1-27.

- [54] LIANG F Y, LIANG X, ZHANG H, et al. Seismic response from centrifuge model tests of a scoured bridge with a pile-group foundation [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(8): 04020054.
- [55] QIU Z J, EBEIDO A, ALMUTAIRI A, et al. Aspects of bridge-ground seismic response and liquefaction-induced deformations [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2020, 49(4): 375-393.
- [56] 雷虎军, 孙昱坤. 地震动分量对车-轨-桥系统动力响应影响研究[J]. *桥梁建设*, 2020, 50(5): 73-77.
- [57] ERDOGAN Y S A N. Seismic response of a highway bridge in case of vehicle-bridge dynamic interaction[J]. *Earthquakes and Structures*, 2020, 18(1): 1-14.
- [58] SHAMSI M, GHANBARI A. Seismic retrofit of monorail bridges considering soil-pile-bridge-train interaction [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(10): 04020075.
- [59] MA A C, TAN P, WANG S L, et al. Stochastic optimization of continuous beam bridge viscous damper considering the fluid-solid coupling effect and its damping performance [J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2020, 38(1): 37-44.
- [60] LIN Y Z, ZONG Z H, BI K M, et al. Experimental and numerical studies of the seismic behavior of a steel-concrete composite rigid-frame bridge subjected to the surface rupture at a thrust fault [J]. *Engineering Structures*, 2020, 205: 110105.
- [61] LIN K Q, XU Y L, LU X Z, et al. Collapse prognosis of a long-span cable-stayed bridge based on shake table test and nonlinear model updating [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2021, 50(2): 455-474.
- [62] AN H, LEE J H, SHIN S. Dynamic response evaluation of bridges considering aspect ratio of pier in near-fault and far-fault ground motions [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(17): 6098.
- [63] 国巍, 王阳, 葛苍瑜, 等. 近断层地震动下高速铁路多跨简支梁桥震致破坏特征[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(17): 210-218.
- [64] LIANG X, MOSALAM K M. Ground motion selection and modification evaluation for highway bridges subjected to Bi-directional horizontal excitation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 130: 105994.
- [65] ZHENG S X, SHI X H, JIA H Y, et al. Seismic response analysis of long-span and asymmetrical suspension bridges subjected to near-fault ground motion [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 115: 104615.
- [66] LI C, LI H N, ZHANG H, et al. Seismic performance evaluation of large-span offshore cable-stayed bridges under non-uniform earthquake excitations including strain rate effect [J]. *Science China Technological Sciences*, 2020, 63(7): 1177-1187.
- [67] LIU Y Q, YUAN Y, LIANG F, et al. Resetting response of precast segments with gently keyed interface under seismic action [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2021, 50(2): 601-618.
- [68] TALYAN N, ELIAS S, MATSAGAR V. Earthquake response control of isolated bridges using supplementary passive dampers [J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2021, 26(2): 04021002.
- [69] 徐略勤, 鲁小罗, 周建庭. 空心板桥考虑服役劣化的地震损伤破坏模式研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(16): 222-230.
- [70] 李鹏, 曾娟, 高榕, 等. 近远场地震下大跨度连续刚构桥地震易损性分析[J]. *铁道建筑*, 2020, 60(12): 5-9, 14.
- [71] 黄永福, 马健, 夏支贤. 强震区中等跨度斜拉桥抗震体系研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(15): 237-242.
- [72] 陈敬一, 杜修力, 韩强, 等. 摇摆双层桥梁地震反应及抗倒塌能力分析[J]. *工程力学*, 2020, 37(10): 56-69.

(编辑 邓云)