

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.123

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



桥梁抗震 2019 年度研究进展

赵灿晖, 曾显志, 邓开来

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:桥梁抗震一直是桥梁工程领域内的重要研究方向。归纳总结了2019年桥梁抗震领域的研究成果和发展趋势,主要结论如下:传统钢筋混凝土桥墩地震响应机理研究日益精细化,局部损伤的演化和控制得到更多重视;预制拼装墩在“等同现浇”连接方式之外,探索了兼顾“传力”与“耗能”的多种新型构造;自复位桥墩在强震下可能产生界面消压,导致结构刚度快速下降,是制约其推广的关键问题;大吨位、大变形、高耐候是高性能减隔震装置的发展趋势,引入半主动控制技术具有良好的发展潜力;桥梁抗震研究中更多地考虑了土-结-墩-水相互作用,模型的计算精度和效率都有所提高,多物理场耦合的桥梁抗震研究将成为一个极具潜力的研究方向。

关键词:桥梁抗震;局部损伤;新型构造;减隔震装置;多物理场耦合

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2020)05-0139-08

State-of-the-art review of seismic design of bridges in 2019

Zhao Canhui, Zeng Xianzhi, Deng Kailai

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

Abstract: Seismic design of bridges is an important branch in bridge engineering. This paper summarized the achievements and development trends of seismic design of bridges in 2019. The main conclusions are as follows: researches on the seismic response mechanism of traditional reinforced concrete bridge piers are becoming more and more refined, and the evolution and control of local damages have received more attention; For prefabricated pier, in addition to the "equivalent cast-in-place" connection, a variety of new configurations that take into account "load transmission" and "energy dissipation" simultaneously have been explored; Self-centering piers may subject to interface decompression under strong earthquakes, resulting in a rapid decrease in the structural stiffness, which is the key problem limiting its promotion; Isolation and energy dissipation devices are developed to having large capacity, deformability, and good weather resistance. Wherein, the semi-active control reveals satisfactory potential; The soil-structure interaction and pier-water interaction are involved more in seismic research, and the calculation accuracy and efficiency of the novel models have been improved. The seismic research of bridges with multi-physics coupling is of great potential.

Keywords: seismic design of bridges; local damage; novel connection; energy dissipation device; multi-physics coupling

收稿日期:2020-04-26

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.

Received:2020-04-26

Foundation items: Major Systematic Research Project of Sichuan-Tibet Railway (No. P2018G007-K04-004); National Natural Science Foundation of China (No. 51708466).

Author brief: Zhao Canhui (1970-), professor, doctoral supervisor, main research interest: seismic design of bridges, E-mail: zch2887@163.com.

桥梁作为交通基础设施的控制性工程,在地震时遭遇损坏,将会给地区通行和抢险救灾带来巨大障碍。近 100 年来,桥梁抗震研究一直是桥梁工程领域内的重要方向,目前,各个国家、地区均有成熟的桥梁抗震设计规范,可保障桥梁结构在地震作用下的基本安全,但桥梁结构在强震下的损伤仍然不可避免。为进一步提升桥梁抗震性能与设计水平,2019 年桥梁抗震领域内取得了诸多新成果和新突破,可归纳为 3 个方面:1)桥墩地震损伤机理研究;2)高性能减隔震装置的研发和应用;3)地震作用下的多物理场耦合分析技术。

1 桥墩抗震性能

桥墩是桥梁中的主要抗侧力构件,其抗震性能是桥梁抗震研究领域内的关键基础问题。依据研究对象的不同,相关研究成果主要包含了梁式桥中传统钢筋混凝土(RC)桥墩、新材料桥墩、新型装配式桥墩抗震机理研究,以及自复位桥墩抗震机理及耐震构造研究。

1.1 传统整体浇筑桥墩抗震性能

传统 RC 桥墩是桥梁建设中使用最为广泛的桥墩结构,2019 年对 RC 桥墩在地震作用下的抗震行为进行了诸多试验研究。Shao 等^[1]对圆端型变截面空心铁路桥 RC 墩进行了模型试验,结果表明,变截面空心墩塑性铰区域更长,截面配箍率的影响较实心墩小。Sun 等^[2]研究了薄壁矩形空心墩在水平往复荷载下的地震响应。Huang 等^[3]对在循环弯-剪-扭耦合荷载作用下的方形 RC 墩柱的抗震性能进行了试验研究。Su 等^[4]通过模型试验研究了纵向钢筋屈服强度和混凝土抗压强度对 RC 桥墩抗震性能的影响。上述研究较好地重现了 RC 桥墩在地震作用下的破坏机制,阐明了配筋率、箍筋约束效应等 RC 桥墩局部损伤的影响。

此外,也有学者对桥墩抗震性能进行了数值模拟分析。郝晓光等^[5]通过有限元模拟研究了不同墩高差双柱式 RC 桥墩的抗震性能。Liang 等^[6]建立了方形空心 RC 墩柱的数值模型,以箍筋约束形式、壁厚、配筋率为主要研究参数,计算研究了方形空心 RC 墩柱的约束效应。陈嵘^[7]通过模型试验研究了混凝土矩形桥墩在变轴力及往复荷载作用下的抗震性能。李义柱^[8]对 600 MPa 级钢筋混凝土柱的受力性能进行了试验与理论研究,提出了高强箍筋约

束混凝土轴心受压应力-应变曲线模型,确定了混凝土柱轴压承载力、偏心受压承载力计算方法。

钢管混凝土桥墩合理利用了钢管对核芯混凝土的环向约束作用,具有承载能力大、韧性好等特点。田甜^[9]通过试验和数值分析研究了圆形截面墩柱内置圆钢管组合桥墩的抗震性能。Chou 等^[10]对钢管内填高强混凝土墩柱的抗震性能进行了试验研究。试件采用了高强度 SM 570M 钢(屈服强度在 520~580 MPa 之间)和高强度混凝土(抗压强度 $F_c > 80$ MPa),研究了不同钢墩柱宽厚比、轴向荷载大小和混凝土填充量对墩柱抗震性能的影响。

随着新型材料的不断创新和发展,许多学者研究了基于新型高性能材料的桥墩抗震性能。新型高性能材料大多都具有高抗裂、应变硬化等特点,可有效降低桥墩地震作用下的损伤。Al-Kaseasbeh 等^[11]通过数值模拟和循环荷载试验研究了加劲薄壁方箱钢墩柱的受力性能,并提出相应的强度和延性计算公式。Chen 等^[12]基于能量的退化规律描述了结构承载力和刚度的退化规律,并提出了一种考虑局部屈曲的钢桥墩水平变形滞回模型。Hosseini 等^[13]利用工程水泥基复合材料(ECC)的良好延性和耐久性以及在循环拉伸荷载作用下的多重细裂纹的特点,将该材料用于桥墩,以提高桥墩的地震损伤限值。此外,Liu 等^[14]对不同再生骨料混凝土(RAC)桥墩柱在冻融循环作用下的地震脆性进行了数值模拟研究。

由上文可知,2019 年整体浇筑桥墩抗震性能研究主要集中在 RC 桥墩和新材料桥墩两个方面。对于 RC 桥墩主要针对桥墩塑性铰区的力学行为开展研究,有由实心墩向空心墩、由定轴压比向变轴压比、由压弯向更加复杂的受力条件的发展趋势,研究更加接近结构截面和地震作用的实际情况,影响因素分析更加细致深入。2019 年,基于新材料的桥墩及其附属构造的研究十分活跃,学者们先后提出多种高性能混凝土、钢-混组合的桥墩结构形式,通过试验阐释了其在地震作用下的承载和损伤机理。以新材料为牵引的高性能桥墩在未来是一个值得投入的发展方向,目前,该方向的研究大多局限在科学研究阶段,对新材料与混凝土界面的力学行为、新材料对桥墩破坏模式的影响及其设计方法的研究还不够深入,还需要做大量工作以推进其在工程中的应用。

1.2 预制拼装墩和自复位桥墩抗震性能

预制拼装 RC 桥墩近年来得到了快速发展,采

用灌浆套筒和预应力绞线的桥墩应用较广。Tong 等^[15]提出了一种新型预制拼装桥墩(图 1),在其墩顶和墩底连接位置设置了不同屈服强度的无粘结耗能钢筋,并对该新型桥墩进行了循环荷载试验和数值模型分析,研究该预制拼装桥墩的抗震能力。Mehraein 等^[16]提出了一种预制拼装桥墩新型构造,其墩底与桩基之间采用套管+杆铰接的形式进行连接,在允许桥墩绕套管产生旋转的同时,又可以传递剪切力和拉力,并通过模型试验验证预制拼装墩的抗震性能和新型构造的有效性。Li 等^[17]对预制拼装 RC 桥墩和整体现浇 RC 桥墩进行了振动台试验,对比研究其抗震性能。彭程纬^[18]对部分预制圆钢管再生块体混凝土柱的力学性能进行了试验研究,分析了后浇混凝土强度、轴压比、预制节段横截面尺寸、后浇混凝土隔离带位置等对该类柱抗震性能的影响。

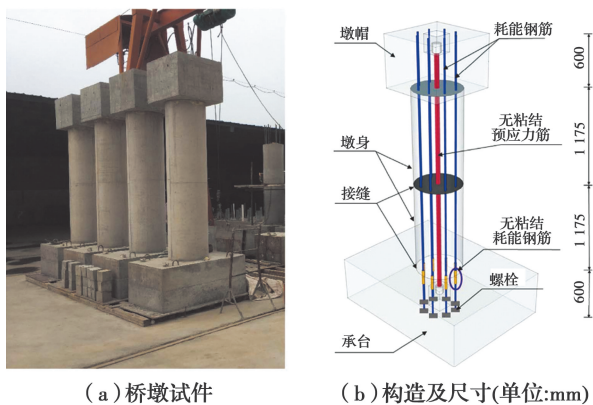


图 1 预制拼装桥墩^[15]

Fig. 1 Prefabricated bridge pier^[15]

自复位摇摆桥墩是指允许结构在地震作用下发生可恢复的水平摇摆。自复位桥墩一般具有低损伤和易恢复的特点,长期以来都是地震工程界的研究热点。自 1963 年 Housner^[19]首次提出摇摆墩及其计算方法以来,不断有学者进行该方向的研究。2019 年度,摇摆桥墩抗震性能方面的代表研究工作包括:周雨龙等^[20]研究了双柱式摇摆桥墩结构的地震响应(图 2),给出该桥墩结构的分析模型。孙治国等^[21]通过不同建模方法与现有试验的对比,探讨摇摆桥墩地震反应数值建模方法的合理性和有效性。邵舒^[22]利用形状记忆合金(SMA)的优秀复位性能,提出了利用 SMA 的自复位桥墩,并研究了其在往复荷载下的力学行为。Liu 等^[23]提出一种新型弹性摇摆墩柱,并通过循环荷载试验研究该新型墩柱的抗震性能。Han 等^[24]提出了一种采用无粘结

后张拉形式且在桥墩底部设置可替代耗能装置的新型摇摆桥墩,并对设置不同类型耗能装置的桥墩进行了试验研究。马华军^[25]提出了新型墩底摇摆隔震方法,并通拟静力试验、振动台试验、有限元数值模拟和理论分析等手段研究了不同墩底摇摆隔震方法的机理和抗震性能。Zhang 等^[26]提出了一种无量纲回归分析法来估计摇摆墩柱-基础系统在近断层地震动下的地震响应。Xie 等^[27]开发了一个多步学习框架系统来估计在地震激励下摇摆桥墩的损伤概率。

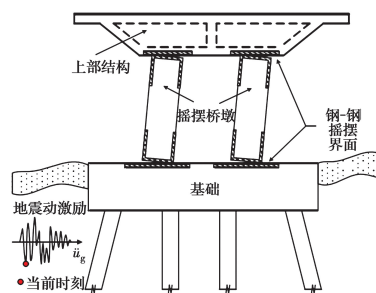


图 2 双柱式摇摆桥墩结构体系^[20]

Fig. 2 Rocking double-column bridge system^[20]

2019 年,RC 预制拼装墩抗震研究已不局限于灌浆套筒和灌浆波纹管连接桥墩,连接构造和形式日趋多样化。这也表明,预制拼装墩的抗震研究仍不成熟,呈现出“百花齐放、多种连接形式并存”的特点,但总体体现了连接构造与耗能构造日益结合的趋势,这可能是预制拼装墩未来的一个发展方向。自复位桥墩低损伤、快恢复的特点与抗震韧性的理念十分契合,目前关于自复位桥墩结构的研究颇为丰富,多数研究采用了基本相同的思路,即在墩底和基础之间设置不同的摇摆界面,并通过张拉预应力筋实现在地震作用下桥墩自复位的目的。与以往的研究相比,2019 年自复位桥墩在结构体系方面进展不大,在自复位材料、结构和计算方法方面取得了若干进展,但自复位桥墩的界面分离后,刚度快速下降的问题仍未得到解决,无论是对于科研还是工程应用,都是亟待解决的问题。

2 桥梁抗震装置

2.1 减隔震装置

隔震装置处于上部结构连接下部结构的关键位置,发挥着不可替代的作用,不仅对上部结构起到支撑作用,还需要将地震作用下上部结构产生的水平惯性力传递给下部结构。研究隔震装置的抗震性能

对桥梁抗震有积极意义,对此,学者们进行了大量的研究。对于隔震装置的研究主要是针对隔震支座、普通板式橡胶支座以及新型支座,如形状记忆合金(SMA)支座等。

曹飒飒等^[28]提出了一种多级设防 SMA 减震装置的设想。该装置由 3 级 SMA 索与铅芯橡胶支座并联组成。利用 SMA 材料的特性(图 3),随地震强度增大,各级 SMA 索依次张紧,以满足不同强度地震作用下的性能需求。白全安^[29]提出了一种适用于高速铁路简支箱梁桥的新型软钢阻尼器-弹塑性限位减隔震装置。崔瑶等^[30]对不同混凝土边距以及采用不同减隔震措施的 4 个平板支座进行拟静力加载试验,研究了平板支座破坏模式、滞回曲线、箍筋应变等。周友权等^[31]研发了两种适用于铁路桥梁的新型减隔震装置——减震榫与榫形防落梁,并提出了一种装置应用于铁路简支梁桥相应的抗震设计简化计算方法。刘聪^[32]提出一种限位钢榫结构用于铁路桥梁的限位设计,并对限位钢榫的构件设计、力学性能、减震性能等进行了深入的研究。Fang 等^[33]提出了一种悬臂墩安全装置,使悬臂墩与固定墩共同分担上部结构产生的地震荷载,以降低固定墩的地震反应。Rahnavard 等^[34]对钢-橡胶基础隔震支座在轴向拉伸、压缩和基底剪切耦合作用下的性能进行了数值模拟,研究了支座中橡胶芯的数量和尺寸对隔震性能的影响。

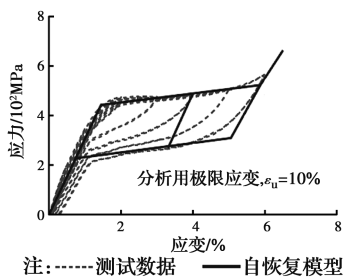


图 3 SMA 材料线性化本构图^[28]

Fig. 3 Linearized constitutive model of SMA materials^[28]

减震装置在地震动作用下主要起到耗散能量的作用,可有效降低桥梁结构的整体地震响应,保护重要结构构件免受地震损伤。减震装置主要包括黏滞阻尼器、橡胶缓冲器、屈曲约束支撑等。学者们在这方面也进行了相应的研究。

范定强等^[35]研究了非线性黏滞阻尼器对桥梁抗震性能的影响。Zhou 等^[36]通过斜拉桥振动台试验,研究了两种不同屈服强度的横向阻尼器对斜拉桥抗震性能的影响(图 4)。在此基础上,对横向阻

尼器的震后剩余承载力进行了进一步的试验研究,并对其疲劳性能进行评估。赵玉亮^[37]通过振动台试验对磁流变阻尼器的力学性能、力学模型、磁场分布及磁流变阻尼器减震系统控制策略等方面进行了系统研究。朱立华^[38]研发了一种带有屈后刚度硬化的摩擦型阻尼器,并通过理论分析和模型试验,推导了相应阻尼器的理论计算公式,提出了基于位移的阻尼器设计方法。Yang 等^[39]通过对桥梁模型进行的一系列振动台试验,研究了冲击对桥梁横向地震反应的影响以及橡胶缓冲器的减震耗能效果。Upadhyay 等^[40]建立了具有自复位耗能装置和屈曲约束支撑的桥梁有限元模型,并对极限破坏状态下桥梁的抗震性能进行了评价。

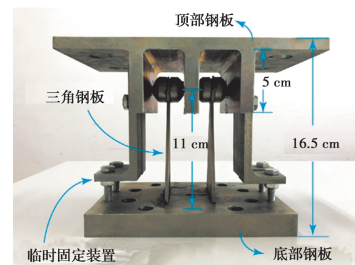


图 4 横向阻尼器^[36]

Fig. 4 Transverse damper^[36]

2.2 减隔震设计方法

对于减隔震体系的研究主要集中于桥梁地震响应简化计算方法和基于位移的隔震设计方法研究两个方面,主要采用理论分析方法。Gkatzogias 等^[41]提出了一种可用于直接估算减少自由度的隔震和耗能体系的峰值非弹性响应计算方法。Ye 等^[42]提出了一种基于直接位移的基础隔震结构设计方法,使含铅芯橡胶支座的基础隔震结构满足位移临界值规定的性能指标。Nassar 等^[43]提出了一种考虑隔震性能在不同条件下变化的概率可靠性评估方法,并以温度、地震危险性、关键结构单元的尺寸和材料力学性能为随机变量。李健等^[44]根据摩擦摆系统的简化力学模型,给出了考虑桩土效应、桥墩刚度以及支座非线性的摩擦摆支座减隔震桥梁抗震简化计算方法。

2019 年,桥梁减隔震装置的研发和设计方法都有了显著提升,总体呈现出传统装置研究不断深入,新型装置层出不穷的特点。在传统减隔震装置方面,主要在理论计算方法上有所进步,计算方法更加简便、评价指标更加客观,但总体来看,这属于较为成熟的领域,其研究不如新型装置的研发活跃。在

新型装置方面,总体来看仍未脱离橡胶支座、摩擦摆支座隔震,粘滞阻尼、金属阻尼、摩擦阻尼耗能的框架主要是在阻尼的实用化方面有所进展。中国的大规模桥梁建设逐渐向西部高烈度地区转移,对传统隔震、耗能机理的装置提出了大吨位、大变形、高耐候的要求。传统减隔震装置的研究仍有较大提升空间,在未来的一段时间内仍是本领域的研究热点。值得注意的是,文献[28]、文献[37]开始将半主动控制的理念引入减隔震中,为减隔震的发展开辟了新的研究方向。

3 多物理场耦合分析

目前,学者们已经能较好地处理材料非线性与几何非线性问题,但多物理场耦合分析难题尚未得到良好的解决。多物理场耦合分析指地震作用下墩-水、土-结、车-桥等耦合分析难题。大量研究主要集中于考虑土-结相互作用的桥梁抗震性能研究。González 等^[45]采用数值模拟方法,研究了土-结相互作用分析方法中的多个参数对于计算结果的影响。Dehghanpoor 等^[46]开发了一种新的数值方法来评估强震的竖向分量和水平分量对干砂土-桩-上部结构体系的耦合作用。Xie 等^[47]探讨了地震需求与易损性评估对其土-结相互作用模型参数变化的敏感性,提出了一种严格的基于 p - y 弹簧的建模方法。Wang 等^[48]对 14 个结构参数和土参数的敏感性进行排序,评价群桩支撑桥梁在液化地基冲刷力下的抗震性能,提出了一种基于脆弱度的龙卷风图法进行敏感性分析。Wang 等^[49]进行了在饱和砂土和非饱和砂土中冲刷桩群支撑桥梁模型的振动台试验,以揭示砂土液化冲刷对桥梁抗震性能和破坏机理的影响。Wei 等^[50]通过水下振动台试验和数值模拟(图 5),对深水刚构桥的动力响应进行了评估。计算了桥梁的频域动力响应,说明在横向地震荷载作用下水深和上部结构对桥梁的影响。

土-结相互作用是一个多年来未得到很好解决的问题,其研究已持续近 60 年。近年来,随着岩土力学的进步,对土-结相互作用的研究又成为热点之一。2019 年的研究也非常活跃,提出多种数值模拟方法,总体来看仍是对传统方法的改进,主要特点是简化模型和参数、提高计算精度。随着大量跨海桥梁和大型水库库区桥梁的修建,墩-水耦合振动是近 10 年来的研究热点,在内、外域水的作用、复杂截



图 5 刚构桥水下振动台试验^[50]

Fig. 5 Underwater shaking table test for a rigid-frame bridge^[50]

面、多实体流场干扰方面取得了重要进展。2019 年文献[50]振动研究和频域分析的引入,为此类研究提供了新的方法。近年来,随着多灾害耦合作用研究的兴起,地震-墩-水耦合作用的研究是一个极具潜力的研究方向,以流固耦合分析、多物理场分析为代表的先进分析技术具有广阔的发展空间。

4 热点与展望

综述了 2019 年关于桥梁抗震领域的研究进展,依据文献资料涉及的主要研究对象,按照桥墩抗震性能、桥梁抗震装置、多物理场耦合分析 3 个方面进行了详细的分类汇总和介绍,并归纳总结了关于桥梁抗震领域的研究热点和发展趋势。主要结论如下:

1)传统桥墩量大面广,结构形式、截面形式、地震作用复杂,在一段时间内,传统桥墩抗震仍是重要的研究方向。在计算理论方面呈现出影响因素研究精细化、计算方法简明化的趋势;在结构形式方面,传统 RC 桥墩与新一代水泥基材料、钢结构的结合日益紧密,新材料-RC 组合桥墩是重要的发展方向。

2)预制拼装墩的研究已逐渐脱离了传统连接形式,呈现出“百花齐放、形式多样”的特点,并体现出连接构造与耗能构造日益结合紧密的趋势,成为预制拼装墩抗震研究的重要发展方向。

3)自复位桥墩仍未脱离预应力自复位的总体框架,尽管在自复位材料、结构和计算方法方面取得了若干进展,但界面分离后,桥墩刚度快速下降的弊病仍然未消除,是自复位桥墩在结构体系上亟需解决的问题。

4)新型减隔震装置研究仍未脱离橡胶支座、摩擦摆支座隔震,粘滞阻尼、金属阻尼、摩擦阻尼耗能的框架,大吨位、大变形、高耐候是此类减隔震装置

研究中需解决的重要问题;在减隔震中引入半主动控制的方法,是新的研究方向。

5)土-结相互作用的主要发展趋势是计算模型和参数的简化以及计算精度的提高,这仍是今后一段时间的研究热点;地震-墩-水耦合作用的研究是一个极具潜力的研究方向,以流固耦合分析、多物理场分析为代表的先进分析技术具有广阔的发展空间。

参考文献:

- [1] SHAO C J, QI Q M, WANG M, et al. Experimental study on the seismic performance of round-ended hollow piers [J]. *Engineering Structures*, 2019, 195: 309-323.
- [2] SUN Z G, WANG D S, WANG T, et al. Investigation on seismic behavior of bridge piers with thin-walled rectangular hollow section using quasi-static cyclic tests [J]. *Engineering Structures*, 2019, 200: 109708.
- [3] HUANG H, HAO R Q, ZHANG W, et al. Experimental study on seismic performance of square RC columns subjected to combined loadings [J]. *Engineering Structures*, 2019, 184: 194-204.
- [4] SU J S, WANG J J, LI Z X, et al. Effect of reinforcement grade and concrete strength on seismic performance of reinforced concrete bridge piers [J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109512.
- [5] 郝晓光, 唐辉, 邵帅, 等. 横向非等高双柱式桥墩抗震性能研究[J]. *世界桥梁*, 2019, 47(3): 54-59.
HAO X G, TANG H, SHAO S, et al. Study of seismic performance of transversely unequal-height double-columned piers [J]. *World Bridges*, 2019, 47(3): 54-59. (in Chinese)
- [6] LIANG X, SRITHARAN S. Effects of confinement in square hollow concrete column sections [J]. *Engineering Structures*, 2019, 191: 526-535.
- [7] 陈嵘. 水平和竖向地震耦合作用下混凝土梁桥桥墩抗震性能试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
CHEN R. Experimental investigations of the seismic behavior of RC bridge piers under vertical and horizontal seismic coupling [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [8] 李义柱. 600MPa 级钢筋混凝土柱受力性能试验与理论研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
LI Y Z. Experimental and theoretical research on mechanical behavior of RC columns with 600 MPa reinforcing bars [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [9] 田甜. 钢管混凝土核心柱组合桥墩抗震性能研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2019.
TIAN T. Research on seismic behavior of steel tube reinforced concrete bridge columns [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [10] CHOU C C, WU S C. Cyclic lateral load test and finite element analysis of high-strength concrete-filled steel box columns under high axial compression [J]. *Engineering Structures*, 2019, 189: 89-99.
- [11] AL-KASEASBEH Q, MAMAGHANI I H P. Buckling strength and ductility evaluation of thin-walled steel stiffened square box columns with uniform and graded thickness under cyclic loading [J]. *Engineering Structures*, 2019, 186: 498-507.
- [12] CHEN S X, XIE X, ZHUGE H Q. Hysteretic model for steel piers considering the local buckling of steel plates [J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 303-318.
- [13] HOSSEINI F, GENCTURK B, JAIN A, et al. Optimal design of bridge columns constructed with engineered cementitious composites and Cu-Al-Mn superelastic alloys [J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109531.
- [14] LIU K H, YAN J C, ALAM M S, et al. Seismic fragility analysis of deteriorating recycled aggregate concrete bridge columns subjected to freeze-thaw cycles [J]. *Engineering Structures*, 2019, 187: 1-15.
- [15] TONG T, ZHUO W D, JIANG X F, et al. Research on seismic resilience of prestressed precast segmental bridge piers reinforced with high-strength bars through experimental testing and numerical modelling [J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109335.
- [16] MEHRAEIN M, SAIIDI S. Seismic performance and design of bridge column-to-pile shaft pipe-pin connections in precast and cast-in-place bridges [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2019, 48(13): 1471-1490
- [17] LI C, BI K M, HAO H. Seismic performances of precast segmental column under bidirectional earthquake motions: Shake table test and numerical evaluation [J]. *Engineering Structures*, 2019, 187: 314-328.
- [18] 彭程纬. 部分预制圆钢管再生块体混凝土柱的力学性

- 能研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
- PENG C W. Mechanical properties of circular steel tubes infilled with post-pouring concrete and precast segments containing DCLs [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] HOUSNER G W. The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53 (2): 403-417.
- [20] 周雨龙,杜修力,韩强. 双柱式摇摆桥墩结构体系地震反应和倒塌分析[J]. 工程力学, 2019, 36(7): 136-145.
- ZHOU Y L, DU X L, HAN Q. Seismic response and overturning of double-column rocking column bridge system [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(7): 136-145. (in Chinese)
- [21] 孙治国,赵泰儀,石岩,等. 摇摆-自复位桥墩抗震性能数值建模方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(6): 1357-1369.
- SUN Z G, ZHAO T Y, SHI Y, et al. Research on numerical modeling method for rocking self-centering bridge piers [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(6): 1357-1369. (in Chinese)
- [22] 邵舒. 带 SMA 杆自复位桥墩抗震性能分析[J]. 公路, 2019, 64(10): 82-88.
- SHAO S. Seismic behavior analysis of self-centering pier with SMA bars [J]. Highway, 2019, 64(10): 82-88.
- [23] LIU Y, GUO Z X, LIU X J, et al. An innovative resilient rocking column with replaceable steel slit dampers: Experimental program on seismic performance [J]. Engineering Structures, 2019, 183: 830-840.
- [24] HAN Q, JIA Z L, XU K, et al. Hysteretic behavior investigation of self-centering double-column rocking piers for seismic resilience [J]. Engineering Structures, 2019, 188: 218-232.
- [25] 马华军. 铁路桩基础桥墩墩底摇摆隔震机理及抗震设计方法研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2019.
- MA H J. Research on rocking isolated mechanism of the railway bridge pier with pile foundation and its seismic design method [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2019. (in Chinese)
- [26] ZHANG J, XIE Y Z, WU G. Seismic responses of bridges with rocking column-foundation: A dimensionless regression analysis [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2019, 48(1): 152-170.
- [27] XIE Y Z, ZHANG J, DESROCHES R, et al. Seismic fragilities of single-column highway bridges with rocking column-footing [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2019, 48(7): 843-864.
- [28] 曹飒飒,伍隋文,孙卓,等. 梁桥多级设防 SMA 减震装置[J]. 振动与冲击, 2019, 38(24): 209-217.
- CAO S S, WU S W, SUN Z, et al. A multi-level performance SMA-based isolation system in girder bridges [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(24): 209-217. (in Chinese)
- [29] 白全安. 新型减隔震装置在高速铁路桥梁中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(10): 66-71.
- BAI Q A. Application research on the new elastic-plastic limit seismic isolation device in high-speed railway simple supported girder bridges [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(10): 66-71. (in Chinese)
- [30] 崔瑶,刘洪滔,高晓玉. 不同减隔震措施下平板支座抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(1): 180-188.
- CUI Y, LIU H T, GAO X Y. Experimental study on seismic behavior of roof joint with different seismic isolation measure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(1): 180-188. (in Chinese)
- [31] 周友权,李承根. 减震榫与榫形防落梁装置应用于高速铁路简支梁桥的简化计算方法[J]. 铁道标准设计, 2019, 62(5): 65-70.
- ZHOU Y Q, LI C G. Simplified calculation method for steel bar damper and steel bar restrainer applied to high-speed railway simply supported beam bridge [J]. Railway Standard Design, 2019, 62(5): 65-70. (in Chinese)
- [32] 刘聪. 铁路桥梁弹塑性钢榫限位及减隔震设计研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.
- LIU C. The design analyses of the displacement constraint and the seismic mitigation for elastic-plastic seismic isolator on railway bridges [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [33] FANG R, ZHANG W X, CHEN Y, et al. Aseismic effect and parametric analysis of the safe-belt device for a continuous bridge with equal height piers [J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109553.
- [34] RAHNAVARD R, THOMAS R J. Numerical

- evaluation of steel-rubber isolator with single and multiple rubber cores [J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109532.
- [35] 范定强, 柳佳暉, 阮汉林, 等. 定海大桥非线性黏滞阻尼器参数研究[J]. *中外公路*, 2019, 39(4): 60-63.
FAN D Q, LIU J H, RUAN H L. Research on nonlinear viscous damper parameters of Dinghai bridge [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2019, 39(4): 60-63. (in Chinese)
- [36] ZHOU L X, WANG X W, YE A J. Low cycle fatigue performance investigation on transverse steel dampers for bridges under ground motion sequences using shake-table tests [J]. *Engineering Structures*, 2019, 196: 109328.
- [37] 赵玉亮. 磁流变阻尼器减震结构振动台试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
ZHAO Y L. Shaking table test on the earthquake mitigated structure with magnetorheological dampers [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [38] 朱立华. 新型格栅式摩擦阻尼器减震结构的试验与理论研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2019.
ZHU L H. Theoretical and experimental research on the structures with new lattice-shaped friction devices [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [39] YANG M G, MENG D L, GAO Q, et al. Experimental study on transverse pounding reduction of a high-speed railway simply-supported girder bridge using rubber bumpers subjected to earthquake excitations [J]. *Engineering Structures*, 2019, 196: 109290.
- [40] UPADHYAY A, PANTELIDES C P, IBARRA L. Residual drift mitigation for bridges retrofitted with buckling restrained braces or self centering energy dissipation devices [J]. *Engineering Structures*, 2019, 199: 109663.
- [41] GKATZOGIAS K I, KAPPOS A J. Direct estimation of seismic response in reduced-degree-of-freedom isolation and energy dissipation systems [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2019, 48(10): 1112-1133
- [42] YE K, XIAO Y, HU L. A direct displacement-based design procedure for base-isolated building structures with lead rubber bearings (LRBs) [J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109402.
- [43] NASSAR M, GUIZANI L, NOLLET M J, et al. A probability-based reliability assessment approach of seismic base-isolated bridges in cold regions [J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109353.
- [44] 李健, 邵长江. 摩擦摆支座隔震连续梁桥抗震分析的简化计算方法[J]. *铁道建筑*, 2019, 49(6): 10-13.
LI J, SHAO C J. A simplified calculation method for seismic analysis of friction pendulum bearing isolated continuous girder bridge [J]. *Railway Engineering*, 2019, 49(6): 10-13. (in Chinese)
- [45] GONZÁLEZ F, PADRÓN L A, CARBONARI S, et al. Seismic response of bridge piers on pile groups for different soil damping models and lumped parameter representations of the foundation [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2019, 48(3): 306-327
- [46] DEHGHANPOOR A, THAMBIRATNAM D, CHAN T, et al. Coupled horizontal and vertical component analysis of strong ground motions for soil-pile-superstructure systems: application to a bridge pier with soil-structure interaction [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2019: 1-29.
- [47] XIE Y Z, DESROCHES R. Sensitivity of seismic demands and fragility estimates of a typical California highway bridge to uncertainties in its soil-structure interaction modeling [J]. *Engineering Structures*, 2019, 189: 605-617.
- [48] WANG X W, YE A J, JI B H. Fragility-based sensitivity analysis on the seismic performance of pile-group-supported bridges in liquefiable ground undergoing scour potentials [J]. *Engineering Structures*, 2019, 198: 109427.
- [49] WANG X W, YE A J, SHANG Y, et al. Shake-table investigation of scoured RC pile-group-supported bridges in liquefiable and nonliquefiable soils [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2019, 48(11): 1217-1237
- [50] WEI K, ZHANG J R, QIN S Q. Experimental and numerical assessment into frequency domain dynamic response of deep water rigid-frame bridge [J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2019: 1-24.

(编辑 王秀玲)