

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2025.01.015

桥梁防落梁体系分析及抗震应用研究

刘延芳^{*1,2}, 鲍卫刚¹

(1. 中国交通建设股份有限公司, 北京 100088; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘要:【目标】针对桥梁结构的落梁震害问题,系统总结国内外防落梁措施研究现状与存在的不足,以期提升桥梁结构震害控制水平。【方法】通过文献调研的方式,基于落梁震害机理,从搭接长度(相对位移)、限位措施、连梁措施3方面总结国内外各类防落梁措施的研究进展,深入探讨当前各类防落梁措施研究和设计中存在问题,并提出改进建议。【结果】搭接长度、限位措施与连梁措施应作为一个统一的防落梁体系进行整体设计,而非依赖某项单一措施。各类防落梁措施不应仅作为构造措施予以考虑,应结合作用效果,采用与设防水准和设防目标相对应的“多水准、多阶段”的抗震设计原则予以量化设计。搭接长度是防落梁措施中最为安全且必要的措施,应该考虑大震作用下,结构墩梁之间最大相对位移。限位措施设计需要综合考虑上部结构位移控制与下部结构受力之间的相互协调,避免由于设置限位措施而导致结构震害由落梁破坏转移为桥梁墩柱的破坏。连梁措施作为防落梁体系的最后一道防线,为确保桥梁结构在超预期地震作用下梁体不发生落梁,应保证其始终处于弹性状态。【应用】研究结果可对中国桥梁抗震规范的修编提供一定的借鉴。

关键词: 桥梁工程; 防落梁系统; 文献调研; 落梁; 抗震规范

中图分类号: U445.7+1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2025)01-0140-07

Bridge falling-off prevention system analysis and anti-seismic application

LIU Yanfang^{*1,2}, BAO Weigang¹

(1. China Communications Construction Co., Ltd., Beijing 100088, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: [Objective] Due to the seismic falling-off damage to bridge structures, the study status and existing problems of domestic and foreign falling-off prevention measures were systematically summarized to improve the bridge structure seismic damage control level. [Method] Through the literature study and based on the mechanism of seismic falling-off damage, the existing domestic and foreign study progress on various falling-off prevention measures were summarized from the aspects of lap length (relative displacement), displacement restraint measures, and beam-connecting measures. The current study and design on various falling-off prevention measures were deeply explored. The improvement and suggestion were put forward. [Result] It is suggested that the lap length, displacement restraint measure and beam-connecting measure should be designed as a whole falling-off prevention system, rather than relying solely on a single measure. The various falling-off prevention measures should not only be considered as structural

收稿日期: 2022-06-10 修改日期: 2024-11-11

基金项目: 交通运输部2022年度公路工程行业标准制修订项目

作者简介(*通讯作者): 刘延芳(1982-),男,内蒙古呼伦贝尔人,博士,教授,正高级工程师,研究方向为桥梁设计。(sky722@163.com)

引用格式: 刘延芳,鲍卫刚. 桥梁防落梁体系分析及抗震应用研究[J]. 公路交通科技, 2025, 42(1): 140-146. LIU Yanfang, BAO Weigang. Bridge falling-off prevention system analysis and anti-seismic application[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42(1): 140-146.

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

measures, but also be quantitatively designed by adopting the seismic design principle of multi-level and multi-stage corresponding to the design level and target. Lap length is the safest and most essential measure in falling-off prevention systems. It should account for the maximum relative displacement between piers and girders under severe earthquakes. When adopting the displacement restraint measures, it needs to comprehensively consider the balance between upper structure displacement control and lower structure stress. This prevents the seismic damage transfer from falling-off failures to pier column failures due to the inappropriate restraining measures. The beam-connecting measures, as the ultimate defense line in falling-off prevention system, should be remained elastic to ensure girders not fall off even under unexpected seismic actions. [Application] The study result can provide some references for the bridge seismic specification revision in China.

Key words: bridge engineering; falling-off prevention system; literature study; falling-off; seismic specification

0 引言

桥梁震害在很大程度上是由于对震害机理认识不足及采用不当的抗震设计方法所造成的^[1]。人们从历次破坏性地震中发现,上部结构自身因直接地震动力效应而毁坏的现象极为少见,但因伸缩缝处支承连接件失效、支承长度不足等引起的落梁破坏现象却常有发生^[2]。1978年,中国唐山地震中,天津地区的宁河大桥 50 m 系杆拱发生横向落梁破坏,其他未落梁桥跨的横向位移达 40~90 cm;滦县滦河大桥发生严重的落梁破坏^[3]。1999年,中国台湾集集地震中,一江桥桥台侧第 1~9 孔发生落梁破坏,未落梁桥跨也发生严重位移^[4]。2008年,中国汶川地震中的庙子坪大桥、高原大桥、高树大桥等均发生落梁破坏^[5-8]。2021年,中国青海玛多地震中,野马滩大桥、野马滩 2 号桥均发生严重多跨连续纵向落梁破坏^[9]。在国际上,也有不少落梁破坏案例:1948年,日本福井地震中的中角桥、板恒桥受损;1971年,美国圣费尔南多地震中的金州 5 号高速干道分别与州际 210 干道和 14 号高速公路的两处立交枢纽发生落梁破坏;1989年,美国洛马·普里埃塔地震中的旧金山奥克兰海湾大桥的引桥受损;1994年,北岭地震中州际 5 号公路和 14 号国道之间的互通立交发生落梁破坏^[10];1995年,日本阪神地震中多座桥梁发生落梁破坏^[11]。

1971年美国圣费尔南多地震后,加利福尼亚州交通部对当时存在落梁隐患的桥梁均进行了防落梁加固。随后的 1976 年危地马拉地震中,防落梁措施充分显示了其保持桥梁整体性的效果^[12]。1989年美国洛马·普里埃塔地震和 1994 年北岭地震中,防落梁措施的效果得到了进一步检验^[10],但也有少量设

置了防落梁措施的桥梁在地震中遭到破坏的事例。破坏事例表明防落梁措施在设计上存在一定缺陷^[13]。

国内外学者对不同桥梁防落梁措施(见图 1)进行了大量的试验及相关参数的研究,但由于国外桥梁通常采用的结构形式、支座类型等与中国有所不同,国外的相关研究成果仅具有一定的参考意义。与美、日等国家的规范相比,中国相关规范对于防落梁的规定,无论在理论上还是在工程实际应用上都存在一定的差距,在地震作用下很难起到真正的防落梁效果。因此,通过对国内外防落梁措施研究成果的分析,系统总结防落梁措施研究现状及存在的问题,总结提炼相关成熟研究成果,形成适用于中国桥梁特点的防落梁设计及构造建议,对于提升国内桥梁结构震害控制水平尤为重要。

1 搭接长度

Priestley 等^[2]推荐采用伸缩缝处相邻桥跨纵向峰值位移之差的绝对值,作为相邻桥跨伸缩缝处的最小支撑宽度的计算值。Hao^[14]对地震作用下纵桥向相邻桥跨间搭接长度的需求进行了参数研究。结果表明,当桥梁的基频与地震波的卓越频率一致时,所需的搭接长度最大。同时,阻尼比、场地条件及地震动强度等因素也均对搭接长度有影响。DesRoches 等^[15]推荐了一种基于反应谱 CQC 组合规则的最小支撑宽度的计算方法。该方法通过一个相关系数考虑相邻桥跨之间的不同向振动的影响。孔艺达^[16]运用最小二乘法拟合出了简支梁桥的搭接长度计算公式,并在此基础上提出了连续梁桥的最小搭接长度的计算方法。周光伟等^[17]应用非线性时程方法对行波输

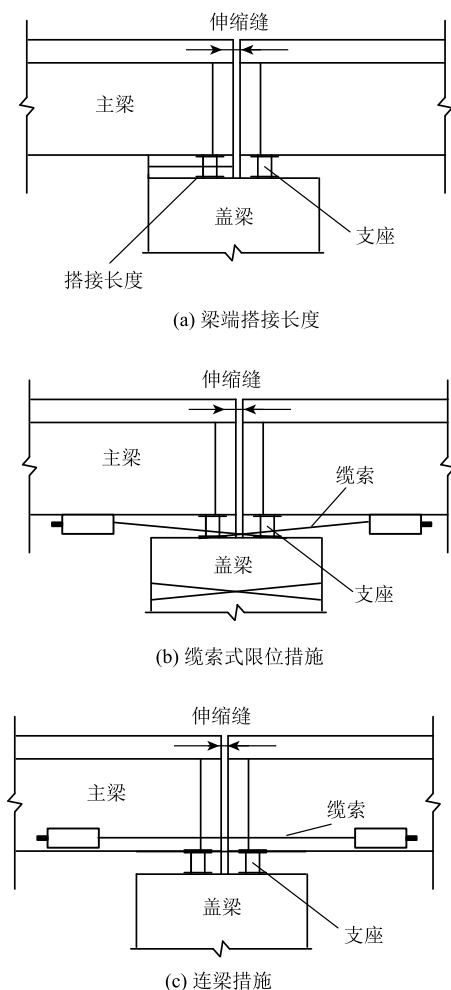


图1 防落梁措施

Fig. 1 Falling-off prevention measures

入下地震反应的搭接长度进行了参数分析。结果表明,结构基本周期、滑动支座摩阻系数、过渡墩的基本周期及行波输入延时等均对搭接长度有重要影响,行波效应会使搭接长度的需求增大。刘延芳等^[18]基于桥墩结构在静力荷载作用下的延性能力和DesRoches等^[15]提出的最小搭接长度的计算方法,提出了基于跨径和墩高的连续梁桥搭接长度计算公式。

从既有研究成果可以看出,伸缩缝处梁端搭接长度与支座类型、结构振动特性等因素有关,同时受限于地震作用的随机特性及场地条件等外部宏观因素,以及不同支座的滑移效应和联跨伸缩缝之间的碰撞效应等结构自身微观因素,想通过墩梁之间相对位移的峰值包络确定与设防目标相对应的桥梁伸缩缝处合理搭接长度将是一项十分困难的工作,今后仍将是桥梁抗震研究的一个难点。

2 限位措施

2.1 缆索类

Selna等^[19]对美国加利福尼亚州C-1型跨间伸缩缝处缆索限位措施进行了足尺试验,评估了缆索限位措施的强度、刚度、力-变形特性对结构的受力影响。Abdel-Ghaffar等^[20]对采用缆索限位器的美国加利福尼亚州阿普托斯溪桥进行整体地震响应分析。Vlassis等^[21]通过小比例箱梁桥的振动台试验得出,缆索限位措施可以有效降低碰撞次数和碰撞加速度,增加缆索限位措施的松弛量可以降低缆索的屈服程度。Saïdi等^[22]通过振动台模型试验研究了纤维增强聚合物限位器的性能,提出了纤维增强聚合物限位器的设计方法。Shrestha等^[23]得出桩土相互作用对限位器的变形和结构的碰撞力有着密切联系。谢旭等^[24]研究了考虑支座破坏影响的限位措施的地震响应。王军文等^[25]提出了一种既可考虑桥跨不同向振动的动力特性,又可考虑相邻梁体碰撞对相对位移影响的限位措施设计方法。袁万城等^[26-27]基于力与位移相平衡的原理,在普通盆式支座的基础上,结合柔性钢丝绳,研发了新型拉索减震支座,并通过系列振动台试验、理论分析及实桥应用,验证了该支座的减震效果及限位效果。

相对于美国较为常用的跨间伸缩缝处的缆索限位措施而言,中国连续梁桥较少采用跨间带伸缩缝的结构形式。一方面,结构形式不同会引起结构动力特性的不同,另一方面,上部结构控制位移也将不同。因而国外学者所提出的针对跨间伸缩缝处的缆索限位措施的相关设计方法的适用性仍需进一步予以验证。中国学者也做了大量的相关研究工作,但所提出的相关设计方法也是在国外成果的基础上进一步考虑耗能和碰撞等因素加以修正的,因此同样存在适用性的问题。

2.2 阻挡类

Megally等^[28]基于拉压杆模型,给出了挡块斜截面剪切破坏和平截面剪切破坏2种破坏模式的承载力计算公式。Bozorgzadeh等^[29-30]对美国加利福尼亚州桥梁工程中使用的挡块进行理论与试验研究,建议在抗震设计中采用滑移型挡块作为保险丝单元,以减小下部结构在地震作用下的破坏。王克海等^[31]通过分析实际桥梁的破坏形式,提出挡块多道设防、分级耗能的设计理念。郑万山等^[32]研究了不同箍筋形式、不同厚度和不同撞击高度的桥梁横向挡块的

抗震性能。Han 等^[33-34]对中国常用的钢筋混凝土挡块进行了拟静力试验研究,分析了竖向和水平钢筋对挡块抗震性能的影响,基于试验结果对2种退化挡块模型进行了修正。徐略勤等^[35]基于“限位”和“传力”性能指标提出了一种新型滑移抗震挡块(见图2),通过拟静力试验验证了新型滑移挡块的性能。郑万山等^[36]提出了一种基于弹性多线性的预压限位措施,通过拟静力试验得到了该措施的力与位移的本构关系模型,采用有限元法研究了该模型的抗震效果。

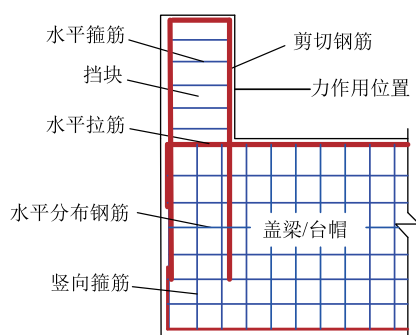


图2 新型滑移抗震挡块

Fig.2 Novel seismic resistance slip blocks

国内外对于阻挡类限位措施的研究大都是基于波动理论的直杆共轴碰撞模型和基于接触单元法的等效刚体碰撞模型进行的,而合理等效碰撞刚度的取值对于碰撞结果有着十分明显的影响。首先,碰撞问题是一个十分复杂的力学问题,加之桥梁梁体与挡块之间的刚度、质量等存在较大的差异性,导致常规的碰撞模型的计算合理性及精确性难以符合实际需求,因此,仍需对阻挡类限位措施的合理碰撞刚度及模型进行深入研究。其次,需要综合考虑上部结构位移限位与下部结构受力增加之间的关系。应对混凝土挡块配筋的优化设计开展进一步的试验研究,避免由于不当的阻挡类限位措施的设计,导致结构震害由上部落梁转移至下部桥墩损坏。

2.3 耗能类

DesRoches 等^[37]研究表明,形状记忆合金限位措施比缆索限位措施更有效,可有效限制跨间伸缩缝处相邻梁体的相对位移。Chaudhary 等^[38]采用数值模拟的方法验证了形状记忆合金的耗能效果。Feng 等^[39]研究了由黏性阻尼器和弹簧组合而成的耗能限位器对防落梁的有效性,结果表明这种耗能型限位器对于减小伸缩处墩梁相对位移和碰撞产生的冲击力比较有效。Deng 等^[40]利用钢板的剪切变形研

发了新型金属阻尼器,可有效防止地震作用引起的落梁震害。闫维明等^[41]提出一种新型复合式金属阻尼器,通过对一座高架桥的数值模拟,验证了减震控制及限位功能。沈星等^[42]提出了一种新型桥梁横向金属阻尼器(见图3),通过拟静力试验验证了其耗能性能。杜修力等^[43]提出了一种新型可复位型挡块,结合挡块的4/5缩尺模型进行水平向单向荷载试验研究,给出了挡块最大承载能力的计算公式。王占飞等^[44]提出了一种由限位钢圈和导向轮等构成的缓冲型钢圈限位措施,并对该措施的相关设计参数的力学影响性能进行了分析。

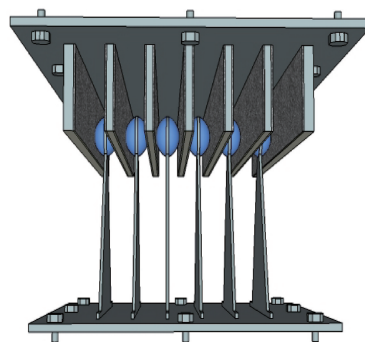


图3 金属阻尼器

Fig.3 Metallic damper

各类耗能类型的限位措施可以较好地消耗地震能量,并协调桥梁结构墩梁相对位移和受力之间的关系,但对于场地条件较差情况下,考虑结构桩土之间相互作用的影响,耗能类限位措施的限位效果需要得到关注。此外,需在应用中进一步研究各类金属阻尼器的实际应用性能和检测标准。

3 连梁措施

王军文等^[45]在考虑支座非线性和墩柱弹塑性及相邻梁体间碰撞计算模型的基础上,应用非线性时程方法,对伸缩缝处相邻梁体之间安装受拉连梁和受拉限位措施的效果进行分析探讨。黄小国等^[46]通过非线性时程方法对连续梁桥常用的连梁措施和限位措施进行对比研究。结果表明,连续梁桥应采用墩梁连接的限位措施模式来设计防落梁措施,连梁措施不能防止落梁的发生。朱文正等^[47]考虑桥梁重要性分类、地震动参数和桥梁地震作用重要性系数,提出了连梁措施的设计方法。张煜敏等^[48]对采用连梁措施的桥梁结构,对考虑主震、余震地震序列下的防落梁效果进行了分析。结果显示连梁措施可有效抑制桥梁上、下部结构相对位移,提高结构抗推能力与整体性,使地震作用在各墩间平均分配,保

证结构在整个地震序列中不发生落梁震害。汪芳芳等^[49]运用动力突加荷载的原理,考虑动力特性的影响,提出了连梁措施设计承载力的修正方法。江辉等^[50]基于假定连梁拉杆在满足强震作用下强度需求的情况下,通过数值模拟探讨了不同场地和设防烈度下梁式桥连梁措施合理刚度的取值。

当前,国内外对于连梁措施的研究相对较少,对于连梁措施的作用效应及应用范围还存在一定的误区。美国规范主要倾向于限位措施的设计思想,没有涉及到超出预期强震发生时的连梁措施的设计方法。日本规范基于突加荷载的静力设计原理,忽略了地震作用时的初始速度的影响,给出了连梁装置的简化计算方法。有相关学者或将连梁措施与预期地震作用下的限位措施进行比较研究,或将地震作用简化为冲击荷载按照静力的思维进行连梁措施的动力设计,其结果的合理性需进一步探讨。

4 结论及建议

当前中国桥梁抗震设计规范中对于防落梁的设计仅从构造措施的角度予以考虑,缺少系统性、整体性以及可供量化的设计指导意见。鉴于国内外历次地震震害经验,在桥梁结构各构件中防落梁措施是最易于震后快速修复而不影响保通的桥梁附属构件,可以通过合理有效的抗震设计保证桥梁结构在地震作用下获得较高安全度。因此防落梁措施不应仅作为构造措施予以考虑,而是应根据与设防水准和设防目标,采用“多水准、多阶段”的抗震设计原则进行量化设计。基于国内外防落梁措施方面的研究成果,得出如下结论。

(1) 各类防落梁措施应明确其发挥作用的阶段,并作为一个整体的系统予以考虑。在此基础上,结合桥梁结构的设防水准与设防目标,进行“多水准、多阶段”的量化设计。其中,在正常工作状态与小震时各类防落梁措施不应限制支座的合理位移;中震时限位措施需保持弹性状态,发挥其对桥梁结构的有效限位作用;大震时可将支座与限位措施作为可牺牲构件进行设计,发挥限位措施控制结构上部位移与下部受力之间的协调作用,避免由于过强的限位措施使下部结构承受较大的地震惯性力,通过合理的搭接长度予以确保上部梁体不落梁;超预期地震作用下,充分发挥连梁措施的作用,确保梁体不发生落梁破坏。

(2) 搭接长度是防落梁措施中最为安全且必要

的措施,应该考虑大震作用下,结构墩梁之间最大相对位移。但由于地震作用的不确定性,单纯依靠增加搭接长度会造成盖梁尺寸过大,从而影响结构的受力与美观,进而造成设计上的过度与浪费。因此,需要综合考虑桥梁结构的性能目标、结构体系、支座类型等因素进行伸缩缝处墩梁之间的最大相对位移的计算,并考虑支座与限位措施损坏时的能量损耗所带来的相应影响。

(3) 无论是缆索类还是阻挡类的限位措施,都会导致下部结构承受较大的地震作用,从而可能会引发下部结构的损伤。因此,对于限位措施的设计时,需要综合考虑上部结构位移控制与下部结构受力之间的相互协调,避免由于设置限位措施而导致结构震害由落梁破坏转移为桥梁墩柱的破坏。

(4) 连梁措施作为防落梁体系的最终环节,可以有效防止落梁震害的发生。它是作为防落梁体系中的最后一道防线,为确保桥梁结构在超预期地震作用下梁体不发生落梁,应保证连梁始终处于弹性状态。

参考文献:

References:

- [1] 范立础. 桥梁抗震 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
FAN Lichu. Seismic resistance of bridges [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.
- [2] PRIESTLEY M J N, SEIBLE F, GALVI G M. Seismic design and retrofit of bridge [M]. London: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- [3] 中国科学院工程力学研究所. 唐山地震震害调查初步总结 [M]. 北京: 地震出版社, 1978.
Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Preliminary summary of earthquake damage investigation in Tangshan earthquake [M]. Beijing: Seismological Press, 1978.
- [4] YE W H. Lessons learned about bridges from earthquake in Taiwan, China [J]. Public Roads, 2002, 65 (4): 20-23.
- [5] 范立础, 李建中. 汶川桥梁震害分析与抗震设计对策 [J]. 公路, 2009 (5): 122-128.
FAN Lichu, LI Jianzhong. Bridge damage analysis and anti-seismic design countermeasures in Wenchuan [J]. Highway, 2009 (5): 122-128.
- [6] 杜修力, 韩强, 李忠献, 等. 5·12 汶川地震中山区公路桥梁震害及启示 [J]. 北京工业大学学报, 2008, 34 (12): 1270-1279.
DU Xiuli, HAN Qiang, LI Zhongxian, et al. The seismic

- damage of bridges in the 2008 Wenchuan earthquake and lessons from its damage [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2008, 34 (12): 1270-1279.
- [7] 王东升, 王吉英, 孙治国, 等. 汶川大地震简支梁桥落梁震害与设计对策 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2011, 31 (5): 595-602.
- WANG Dongsheng, WANG Jiying, SUN Zhiguo, et al. Unseating damage to simply supported bridge during Wenchuan earthquake and design countermeasures [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2011, 31 (5): 595-602.
- [8] 李鸿晶, 陆鸣, 温增平, 等. 汶川地震桥梁震害的特征 [J]. *南京工业大学学报 (自然科学版)*, 2009, 31 (1): 24-29.
- LI Hongjing, LU Ming, WEN Zengping, et al. Characteristics of bridge damage in Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 31 (1): 24-29.
- [9] 管仲国, 黄勇, 张昊宇, 等. 青海玛多 7.4 级地震桥梁工程震害特性分析 [J]. *世界地震工程*, 2021, 37 (3): 38-45.
- GUAN Zhongguo, HUANG Yong, ZHANG Haoyu, et al. Damage characteristics and analysis of bridge engineering in M7.4 Qinghai Maduo earthquake [J]. *World Earthquake Engineering*, 2021, 37 (3): 38-45.
- [10] 范立础, 卓卫东. 桥梁延性抗震设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- FAN Lichu, ZHUO Weidong. *Seismic design for bridges* [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [11] BRUNEAU M. Performance of steel bridges during the 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe, Japan) Earthquake: A North American perspective [J]. *Engineering Structures*, 1998, 20 (12): 1063-1078.
- [12] SAIIDI M, MARAGAKIS E, ABDEL GHAFER S, et al. Response of bridge hinge restrainers during earthquakes-field performance, analysis, and design [R]. Reno: The Center for Civil Engineering Earthquake Research (CCEER), Civil Engineering Department University of Nevada, Reno, 1993.
- [13] SAIIDI M, RANDALL M, MARAGAKIS E, et al. Seismic restrainer design methods for simply supported bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2001, 6 (5): 307-315.
- [14] HAO H. A parametric study of the required seating length for bridge decks during earthquake [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1998, 27: 91-103.
- [15] DESROCHES R, FENVES G L. Design of seismic cable hinge restrainers for bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2000, 126 (4): 505-509.
- [16] 孔艺达. 梁式桥防落梁最小搭接长度初步研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- KONG Yida. *Preliminary study on the unseating prevention minimum seat length of girder bridge* [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [17] 周光伟, 李建中, 陈昌萍. 连续梁桥地震行波输入下支撑长度的设计方法 [J]. *华侨大学学报 (自然科学版)*, 2013, 34 (1): 82-86.
- ZHOU Guangwei, LI Jianzhong, CHEN Changping. Research on the required seating length for continuous bridges under longitudinal excitation of traveling waves [J]. *Journal of Huqiao University (Natural Science)*, 2013, 34 (1): 82-86.
- [18] 刘延芳, 鲍卫刚. 基于静力延性能力的连续梁桥搭接长度计算方法初探 [J]. *桥梁建设*, 2015, 45 (4): 64-68.
- LIU Yanfang, BAO Weigang. Preliminary study on the minimum seat length of the continuous girder bridge based on static ductility capacity [J]. *Bridge Construction*, 2015, 45 (4): 64-68.
- [19] SELNA L G, MALVAR L J, ZELINSKI R J. Bridge retrofit testing: Hinge cable restrainers [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1989, 115 (4): 920-934.
- [20] ABDEL-GHAFFAR S M, MARAGAKIS E M, SAIIDI M S. Effects of the hinge restrainers on the response of the aptos creek bridge during the 1989 Loma Prieta earthquake [J]. *Earthquake Spectra*, 1997, 13 (2): 167-189.
- [21] VLASSIS A G, MARAGAKIS E M, SAIIDI M S. Experimental evaluation of seismic performance of bridge restrainers, MCEER-00-0012 [R]. Buffalo: University of Buffalo, 2000.
- [22] SAIIDI M S, JOHOSON R, MARAGAKIS E M. Development, shake table testing, and design of FRP seismic restrainers [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2006, 11 (4): 499-506.
- [23] SHRESTHA B, HAO H, BI K. Seismic response analysis of multiple-frame bridges with unseating restrainers considering ground motion spatial variation and SSI [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2015, 18 (6): 873-891.
- [24] 谢旭, 吴善幸. 考虑支座破坏影响的防止落梁措施的地震响应 [J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2006, 40 (12): 2180-2185.
- XIE Xu, WU Shanxing. Earthquake response of bridge restrainers considering failure of bearings [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2006, 40 (12): 2180-2185.
- [25] 王军文, 李建中, 范立础. 桥梁中抗震限位措施设计方

- 法的研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39 (11): 91-95.
- WANG Junwen, LI Jianzhong, FAN Lichu. A Study on the design method of seismic restrainers for bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (11): 91-95.
- [26] 袁万城, 曹新建, 荣肇骏. 拉索减震支座的开发与试验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31 (12): 1593-1600.
- YUAN Wancheng, CAO Xinjian, RONG Zhaojun. Development and experimental study on cable-sliding friction aseismic bearing [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31 (12): 1593-1600.
- [27] 袁万城, 韦正华, 曹新建, 等. 拉索减震支座及桥梁抗震设计应用研究 [J]. 工程力学, 2011 (增2): 204-209.
- YUAN Wancheng, WEI Zhenghua, CAO Xinjian, et al. Cable-sliding friction aseismic bearing and its application in bridge seismic design [J]. Engineering Mechanics, 2011 (S2): 204-209.
- [28] MEGALLY S H, SILVA P F, SEIBLE F. Seismic response of sacrificial shear keys in bridge abutment, structural systems research, SSRP-2001/23 [R]. La Jolla: Department of Structural Engineering, University of California, 2001.
- [29] BOZORGZADEH A, MEGALLY S, RESTREPO J I, et al. Capacity evaluation of exterior sacrificial shear keys of bridge abutment [J]. Journal of Bridge Engineering, 2006, 11 (5): 555-565.
- [30] BOZORGZADEH A, MEGALLY S, RESTREPO J I, et al. Seismic response of sacrificial exterior shear keys in bridge abutment, 90903-0085 [R]. La Jolla: Department of Structural Engineering, University of California, 2007.
- [31] 王克海, 韦韩, 李茜, 等. 中小跨径公路桥梁抗震设计理念 [J]. 土木工程学报, 2012, 45 (9): 115-121.
- WANG Kehai, WEI Han, LI Qian, et al. Philosophies on seismic design of highway bridges of small and medium spans [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (9): 115-121.
- [32] 郑万山, 唐光武. 桥梁抗震挡块拟静力试验研究 [J]. 公路交通技术, 2013, 4: 54-58.
- ZHENG Wanshan, TANG Guangwu. Quasi-static test research on seismic blocks of bridges [J]. Technology of Highway and Transport, 2013, 4: 54-58.
- [33] HAN Q, ZHOU Y L, ZHONG Z L, et al. Seismic capacity evaluation of exterior shear keys of highway bridges [J/OL]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 22 (2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000978](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000978).
- [34] HAN Q, ZHOU Y L, OU Y C, et al. Seismic behavior of reinforced concrete sacrificial exterior shear keys of highway bridges [J]. Engineering Structures, 2017, 139: 59-70.
- [35] 徐略勤, 李建中. 新型滑移挡块的设计、试验及防震效果研究 [J]. 工程力学, 2016, 33 (2): 111-118.
- XU Lueqin, LI Jianzhong. Design and experimental investigation of a new type sliding retainer and its efficacy in seismic fortification [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33 (2): 111-118.
- [36] 郑万山, 谢皓宇, 高文军, 等. 基于预压限位措施的新型桥梁减隔震体系的研究 [J]. 自然灾害学报, 2021, 30 (2): 191-198.
- ZHENG Wanshan, XIE Haoyu, GAO Wenjun, et al. Research on an innovative seismic reduction and isolation system based on preload retrainner for bridges [J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30 (2): 191-198.
- [37] DESROCHES R, DELEMONT M. Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys [J]. Engineering Structures, 2002, 24 (5): 325-332.
- [38] CHAUDHARY M T A, ABE M, FUJINO Y. Investigation of atypical seismic response of a base-isolation bridge [J]. Engineering Structures, 2002, 24 (7): 945-953.
- [39] FENG M Q, KIM J M, SHINOZUKA M. Energy dissipating restrainers for highway bridges [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19 (1): 65-69.
- [40] DENG K, PAN P, SU Y, et al. Development of an energy dissipation restrainer for bridges using a steel shear panel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101: 83-95.
- [41] 闫维明, 李勇, 陈彦江, 等. 新型复合式金属阻尼器在桥梁减震控制中的应用 [J]. 北京工业大学学报, 2012, 38 (8): 1167-1173.
- YAN Weiming, LI Yong, CHEN Yanjiang, et al. The implication of a new type of metal alloy brace on seismic control of viaducts [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38 (8): 1167-1173.
- [42] 沈星, 倪晓博, 叶爱君. 桥梁新型横向金属阻尼器研究 [J]. 振动与冲击, 2014, 33 (21): 96-101.
- SHEN Xing, NI Xiaobo, YE Aijun. A new type of metallic damper for bridges aseismic performance in transverse direction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33 (21): 96-101.
- [43] 杜修力, 周雨龙, 韩强, 等. 公路桥梁外剪力键研究进展 [J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35 (5): 1-7.
- DU Xiuli, ZHOU Yulong, HAN Qiang, et al. Research progress on exterior shear key of highway bridges [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35 (5): 1-7.

(下转第 173 页)

- 193, 218.
- [13] 谢宝超, 楚坤坤, 赵家明, 等. 盾构隧道内大客车人员下车试验及数值模拟研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17 (6): 123-129.
- XIE Baochao, CHU Kunkun, ZHAO Jiaming, et al. Experimental and numerical simulation study on getting off of passengers from bus in shield tunnel [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17 (6): 123-129.
- [14] 安文娟, 方磊, 谢耀华, 等. 足尺隧道 5 MW 火灾下大巴车疏散时间试验研究 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2021, 40 (11): 67-73.
- AN Wenjuan, FANG Lei, XIE Yaohua, et al. Experimental study on bus evacuation time under 5 MW fire in full-scale tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40 (11): 67-73.
- [15] CHUNG H C, SEIKE M, KAWABATA N, et al. Time gap distribution of bus alighting in tunnel fires [J]. Fire Safety Journal, 2021, 120: 103152. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103152.
- [16] CHUNG H C, SEIKE M, KAWABATA N, et al. Investigation of bus evacuation flow rates for tunnel fire quantitative risk assessment [J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2021, 21 (3): 806-824.
- [17] 胡隆华, 彭伟, 杨瑞新. 隧道火灾动力学与防治技术基础 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- HU Longhua, PENG Wei, YANG Ruixin. Fundamentals of tunnel fire dynamics and prevention technology [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [18] 屈建荣. 单洞双向交通公路隧道火灾人员疏散救援研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
- QU Jianrong. Study on the human evacuation and rescue in single highway tunnel for subtended traffic with fire [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [19] 栾荣旋. 特长公路隧道平导式通风技术应用及研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- LUAN Rongxuan. Application and research of flat-guiding ventilation technology in extra-long highway tunnel [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [20] 许林海, 陈海丽, 张芳, 等. 68 例成年人肩宽测量及适宜枕头相应数据研究 [J]. 中国康复, 2009, 24 (5): 310-311.
- XU Linhai, CHEN Haili, ZHANG Fang, et al. Measurement of 68 adults' shoulder width and proper pillow-related parameters [J]. Chinese Journal of Rehabilitation, 2009, 24 (5): 310-311.
-
- (上接第 146 页)
- [44] 王占飞, 孙巨博, 程浩波, 等. 缓冲型防落梁钢圈限位措施力学性能研究 [J]. 桥梁建设, 2018, 48 (6): 18-23.
- WANG Zhanfei, SUN Jubo, CHENG Haobo, et al. Study on mechanical properties of a steel ring restrainers with buffer capacity [J]. Bridge Construction, 2018, 48 (6): 18-23.
- [45] 王军文, 李建中, 范立础. 限位措施对连续梁桥地震反应的影响 [J]. 铁道学报, 2008, 30 (3): 71-77.
- WANG Junwen, LI Jianzhong, FAN Lichu. Effect of restrainers on seismic response of continuous beam bridges [J]. Journal of the China Railway Society, 2008, 30 (3): 71-77.
- [46] 黄小国, 李建中, 张哲. 连续梁桥纵桥向防落梁措施结构模式对比研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2009, 37 (9): 1146-1152.
- HUANG Xiaoguo, LI Jianzhong, ZHANG Zhe. Comparative research on modes of longitudinal unseating prevention system for continuous bridge [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37 (9): 1146-1152.
- [47] 朱文正, 刘健新. 公路桥梁连梁措施研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (4): 68-72.
- ZHU Wenzheng, LIU Jianxin. Research on unseating prevention device for highway bridges [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (4): 68-72.
- [48] 张煜敏, 赵国辉, 刘健新. 地震序列下桥梁连梁措施的防落梁效果分析 [J]. 灾害学, 2010, 25 (3): 53-55.
- ZHANG Yumin, ZHAO Guohui, LIU Jianxin. Analysis on collapse-proof effectiveness of unseating-prevention device under earthquake sequences [J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25 (3): 53-55.
- [49] 汪芳芳, 徐祖恩. 一种公路桥梁防落梁限位措施设计的研究 [J]. 公路, 2011 (8): 97-99.
- WANG Fangfang, XU Zuen. Study on the design of restrainers for preventing falling beam of highway bridges [J]. Highway, 2011 (8): 97-99.
- [50] 江辉, 李宇, 熊智阳, 等. 基于非线性静、动力方法的 RC 简支梁桥连梁措施参数优化研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31 (1): 86-91.
- JIANG Hui, LI Yu, XIONG Zhiyang, et al. Parametric optimization for unseating prevention device of a RC simply supported girder bridge based on nonlinear static and dynamic method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31 (1): 86-91.