

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.021

公路桥面伸缩装置及其对桥梁静动力性能影响综述*

肖波¹, 许维炳², 闫晓宇³, 闫维明², 陈彦江², 王瑾², 侯剑岭²

(1. 长春市市政工程设计研究院, 吉林 长春 130033; 2. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124; 3. 国家开放大学理工教学部, 北京 730030)

摘要: 桥梁伸缩装置(以下简称伸缩缝)使用环境恶劣、受荷形式复杂,易出现多种病害。伸缩缝病害会造成桥梁耐久性降低,车致桥梁动力响应加重等不利现象。因此,伸缩缝病害机理及其处置方法和考虑伸缩缝参数影响的车-桥耦合动力响应规律研究受到了广泛关注。本文综述了桥梁伸缩缝力学性能,常见病害及其影响,病害机理及其处置方法等的发展现状;重点讨论了考虑伸缩缝参数及其变化影响的桥梁动力响应的研究进展及存在的问题;展望了未来桥梁伸缩缝研究中有待解决的关键问题。

关键词: 伸缩缝; 车-桥耦合振动; 病害; 动力响应; 结构韧性

中图分类号: TU997 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0167-14

Research Overview of Bridge Expansion Joint' Disease and Its Influence

XIAO Bo¹, XU Weibing², YAN Xiaoyu³, YAN Weiming², CHEN Yanjiang², WANG Jin²,
HOU Jianling²

(1. Changchun Municipal Engineering Design & Research Institute, Changchun 130033, China;
2. Faculty of Architecture, Civil And Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124,
China; 3. School of Engineering, Open University of China, Beijing 730030, China)

Abstract: The bridge expansion joint will suffer from many kinds of diseases due to its bad service environment and complex loading forms. The disease of expansion joints may reduce the durability of bridges and aggravate the dynamic response of vehicle-bridge coupling vibration. Therefore, the failure mechanism and treatment methods of expansion joints, and the influence of their time-varying parameters on vehicle-bridge coupling vibration have been widely concerned. In this paper, the mechanical properties of bridge expansion joints is briefly described; the common diseases of expansion joints and their influences on the performance of bridges are introduced and analyzed, as well as the disease mechanism and the disease treatment methods of bridge expansion joints; then the study progress and existing problems of vehicle-bridge coupling vibration considering the influence of time-varying parameters of expansion joints are mainly described and discussed; on this basis, an outlook for the further study on bridge expansion joints is provided.

Keywords: expansion joints; vehicle-bridge coupled vibration; disease; dynamic response; structural toughness

* 收稿日期:2020-03-01;修回日期:2020-04-05

基金项目:国家自然科学基金(51908015,51978021)、国家重点研发计划子课题(2017YFC1500604)资助

作者简介:肖波(1980—),男,高级工程师。主要从事桥梁设计与灾害评估研究。E-mail:472993707@qq.com

引言

桥梁伸缩装置(以下简称伸缩缝)是满足车辆安全、舒适行驶、调节日常和季节性温度变化引起的桥梁伸缩,并参与车辆、地震等作用诱发桥梁动力响应的关键构件^[1-7]。伸缩缝的使用环境恶劣、受荷形式复杂,其在使用过程中易出现多种病害,如伸缩缝两侧错台、锚固区破损、密封措施失效等^[8-14]。近年来,伸缩缝病害机理及其处置方法和考虑伸缩缝参数影响的车-桥耦合动力响应规律研究受到了广泛关注^[15-18]。

现阶段研究成果表明:(1)伸缩缝病害不仅直接影响车辆行驶安全,导致车致桥梁动力响应规律变化,还可能诱发伸缩缝附近桥梁(特别是大跨径桥梁)的桥面铺装、吊杆、桥面板等桥梁组件的伴随性病害,考虑伸缩缝病害影响的车致桥梁冲击响应应作为国内外桥梁设计规范中车致冲击效应的补充;(2)伸缩缝病害及其诱发的桥梁其他组件病害的维修养护费用已成为桥梁运营周期内维修养护费用的重要组成部分;(3)当前,伸缩缝病害机理及其影响尚不明晰,针对伸缩缝病害诱发、发展、影响及控制方法等研究亟待开展。

鉴于此,本文简述了桥梁伸缩缝的基本分类及工作原理;综述了桥梁伸缩缝力学性能、常见病害、病害机理及病害处理方法的发展现状;讨论了考虑伸缩缝参数及其变化影响的桥梁动力响应研究进展及未来发展方向;并对伸缩缝诱发噪声及桥梁振动控制方法的研究进展及存在的问题进行分析;在此基础上,给出桥梁伸缩缝未来的研究方向及建议。

1 伸缩缝基本分类及工作原理

1.1 伸缩缝基本分类

美国、日本、欧盟、新西兰和中国等均制定了专门的桥梁伸缩缝设计或选取规范^[5, 6, 13, 19-23]。考虑到伸缩缝的适用性、经济性和施工便易性,现阶段国内外既有和新建桥梁中广泛使用的伸缩缝类型主要有四种:(1)橡胶式伸缩缝(elastomeric flexible strips);(2)梳齿板式伸缩缝(cantilever-finger joints);(3)模数式伸缩缝(modular expansion joints);(4)无缝式伸缩缝(seamless expansion joint)。其中模数式伸缩缝构造复杂,造价较高,是中大跨径桥梁中常用的伸缩缝形式;而橡胶式、梳齿型伸缩缝在力学模型上均可视为模数式伸缩缝特例。

1.2 伸缩缝工作原理

为了说明伸缩缝构造与工作原理,本文以构造最为复杂的模数式伸缩缝为例进行介绍^[6, 7, 10]。图1为模数式伸缩缝的基本构造和受力路径。

由图1可知,模数式伸缩缝主要由锚固箱、滑动箱、中横梁、支撑梁、密封条、连接锚栓、滑动支座等组件构成。其中锚固箱和滑动箱通过预埋件与桥梁上部主梁连接;中横梁通过连接锚栓和滑动支座与支撑梁连接;支撑梁通过滑动支座或卡槽与滑动箱连接,并通过连接锚栓与锚固箱连接;中横梁间通过密封条连接。通过上述连接构造,中横梁直接承受车辆的冲击作用,并通过滑动支座和连接锚栓传递给支撑梁,支撑梁再通过连接锚栓和滑动支座传递给滑动箱和锚固箱,进而将车辆荷载传递给桥

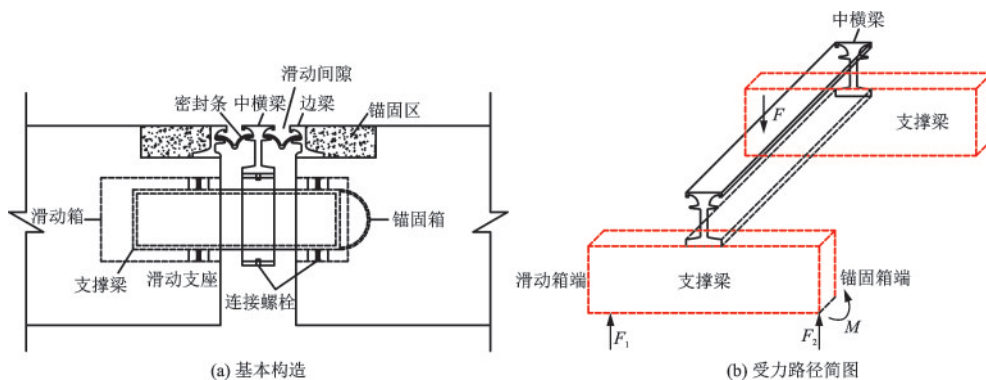


图1 模数式伸缩缝基本构造及受力路径

Fig.1 Basic structure and load-transferring path of the modular expansion joint

梁上部结构,以实现伸缩缝的连接功能;与此同时,支撑梁可伴随桥梁上部结构在滑动箱中伸缩,并带动中横梁在密封条间伸缩,以实现伸缩缝的伸缩功能。

当前,模数式伸缩缝已具有良好的力学性能和耐久性构造。其中密封条主要用于避免雨雪进入伸缩缝内部造成伸缩缝的电化学腐蚀;滑动支座(一般为橡胶材质)可以起到减振效果,增加了中横梁与支撑梁在荷载传递过程中的能量消耗,降低车辆对伸缩缝的冲击作用;高强连接锚栓具有良好的抗疲劳性能和抗冲击性能;锚固箱与主梁预埋件连接,可以尽可能降低因施工导致的主梁受损或安装误差导致的内不平衡内力。

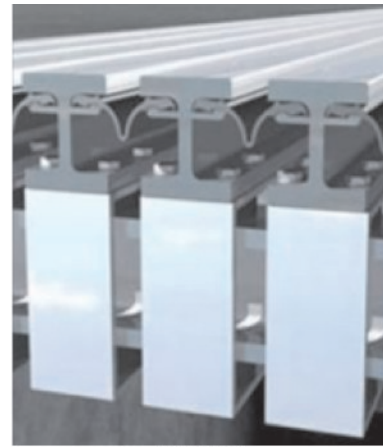
2 伸缩缝力学性能研究现状

2.1 理论与数值分析

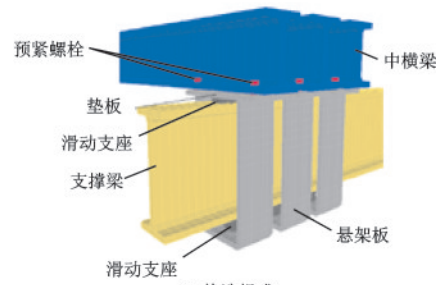
伸缩缝在使用过程中主要承受日常、季节性温度变化引起的伴随桥梁伸缩的拉压作用,车辆荷载的反复冲击作用,以及车-桥耦合动力响应引起的剪切-弯曲-扭转-拉压耦合作用。

橡胶式伸缩缝构造简单,力学模型明确,梳齿型伸缩缝及模数式伸缩缝的构造形式复杂(图2),力学模型仍不清晰,二者力学性能研究是现阶段桥梁伸缩缝的研究重点。G.A.K.K.Quan^[24]建立了一种能够考虑梳齿型伸缩缝滑出,碰撞,钢梳齿失效等纵、横向力学行为的非线性滞回模型(图3),并基于该模型对该型伸缩缝的纵、横向力学行为进行分析,验证了模型的有效性。G.N.Stamatopoulos^[25]建立了单支撑模数式伸缩缝的三维数值分析模型,通过阶跃荷载来模拟车辆对伸缩缝的冲击作用,对该型伸缩缝锚固螺栓的疲劳性能进行了研究,指出连接螺栓在模拟车辆荷载作用下的抗疲劳性能是影响模数式伸缩缝力学性能的关键。与文献[25]的研究过程类似,C.W.Roeder^[26],R.Crocetti等^[27],L.Guizani等^[28],A.Busel等^[29]等均通过数值方法对模数式伸缩缝关键受荷构件的疲劳性能进行了研究。以上研究者均从伸缩缝的单个或部分组件出发,对伸缩缝部分构件的力学性能进行了研究,多采用简单的阶跃荷载模拟车辆荷载冲击作用,均未有效地模拟车-缝耦合动力作用。

为了更真实地模拟车辆对伸缩缝的冲击作用,将伸缩缝纳入车-桥耦合动力分析模型中是必然趋



(a) 构造实物



(b) 构造组成

图2 模数式伸缩缝细部构造

Fig.2 Detail structure of modular expansion joints

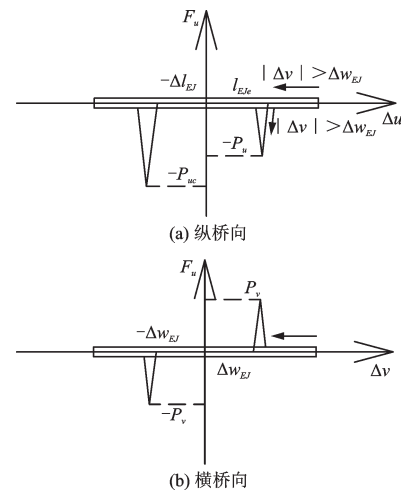


图3 梳齿型伸缩缝非线性滞回模型^[24]

Fig.3 Nonlinear hysteretic model of finger expansion joint
注: Δl_{Ek} 、 Δw_{El} 分别表示伸缩缝纵、横向伸长量; Δv 、 Δu 表示伸缩缝纵、横向位移响应

势。Y.Ding等^[30]建立了某型模数式伸缩缝的质量-弹簧-阻尼非耦合模型,并利用多弹簧支承建立了弹性车轮模型(图4),基于车-桥耦合动力响应分析方法,分析了车辆在伸缩缝位置处颠簸行驶时伸缩缝和桥梁动力响应,指出伸缩缝间隙数量增加会降低车辆的冲击作用,间隙宽度增加会增加车辆的

冲击作用,伸缩缝参数变化可能会导致车辆冲击效应大于规范的限值,并影响桥梁局部位置的耐久性。将伸缩缝简化为质量-弹簧-阻尼非耦合模型能够模拟车-缝之间的耦合作用,但是将伸缩缝各组件进行简单的分离,很难有效地模拟伸缩缝各组件之间的受力、变形关系。为此,E.McCarthy等^[2]开展了不同荷载作用下模数式伸缩缝的力学行为研究,提出了一种模数式伸缩缝的质量-弹簧-阻尼耦合模型,如图5所示。并基于伸缩缝组件的力学性能试验,确定了力学模型的力学参数,通过伸缩缝整体静动力特性试验对该力学模型的有效性进行了验证。

质量-弹簧-阻尼耦合模型能够有效地模拟伸缩缝关键组件中横梁与支撑梁之间的竖向耦合作用,并能够较好地描述模数式伸缩缝竖向受力、变形和耗能特点。但现阶段的研究成果仅从竖向受力角

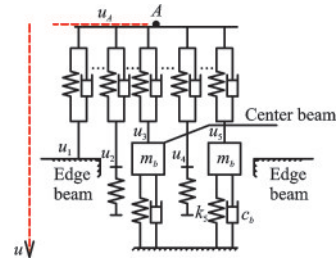


图4 伸缩缝质量-弹簧-阻尼非耦合模型^[30]

Fig.4 Mass-Spring-Damper un-coupling model of expansion joint

度对该力学模型参数进行选取,并未给出该模型在剪切、扭转、拉压条件下的有效性和参数选取原则。为此,孙正峰^[31],吴昊等^[32]利用数值方法对模数式伸缩缝的静动力特性及参数影响进行了分析,为伸缩缝力学模型的进一步优化提供了一定的理论分析基础。

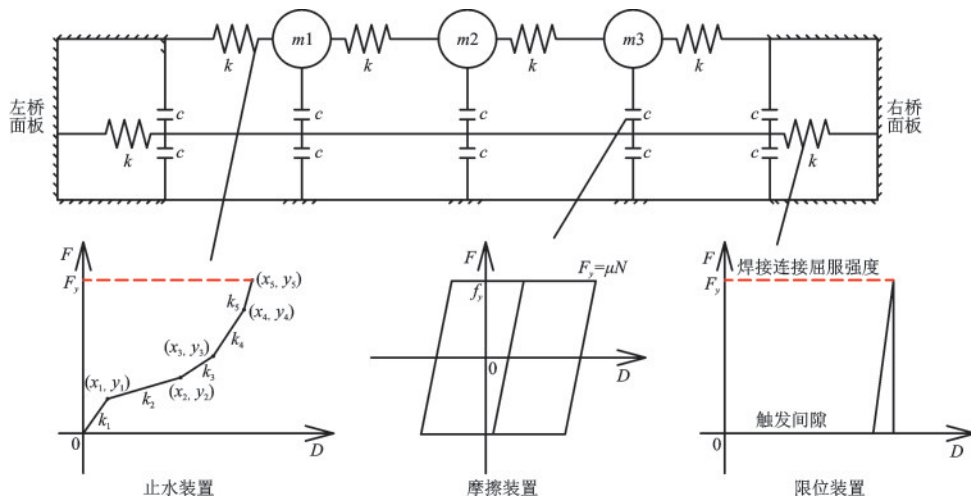


图5 伸缩缝质量-弹簧-阻尼耦合模型^[2]

Fig.5 Mass-Spring-Damper coupling model of expansion joint

2.2 现场测试与试验研究

现场测试方面,Z.Sun等^[33]对江阴大桥的模数式伸缩缝在静载、移动荷载作用下的力学性能进行了现场测试,通过在中横梁、支撑梁等关键位置设置应变传感器来监测伸缩缝的受力。与前述的研究过程类似,C.C.Fu等^[34]结合现场测试、伸缩缝组件材料性能测试和理论分析对Millard E. Tydings桥模数式伸缩缝早期失效的原因进行了分析。现场测试结果指出伸缩缝的应变响应与主梁的竖向和纵向变形相关,伸缩缝在整体受力上受桥梁主梁的竖向挠度和纵向变形影响显著;重载货车的冲击

作用会直接导致伸缩缝组件的高应力,伸缩缝的局部受力受车辆轴重冲击荷载影响显著;而局部的高应力状态和拙劣的施工工艺是造成伸缩缝局部早期裂缝的主要原因,后续使用过程中的累积损伤最终导致了伸缩缝的过早失效。

现场测试的结果更为真实,且能够更好地模拟伸缩缝的实际受力状态。但现场测试的测点布置工作较为耗时耗力,现阶段伸缩缝的现场测试主要用于重点桥梁工程早期伸缩缝病害的原因分析。与现场测试相比,试验研究也能较好地得到伸缩缝自身的力学性能。为此,王立成等^[35]对某型模数式伸缩缝进行了疲劳性能试验,并重点测试了伸缩缝

中横梁、支撑梁的受力与变形特点。K.Gao等^[36]介绍了一种新型的拉索滑套型模数式伸缩缝的工作原理和力学模型;通过拟静力试验对该型伸缩缝的力学模型进行了验证;并通过三维有限元仿真分析验证了该型伸缩缝在控制主梁与支座的相对位移上的有效性。

2.3 未来发展方向

现阶段针对伸缩缝力学性能的理论数值分析研究主要集中在伸缩缝关键组件的疲劳性能上,伸缩缝的力学性能理论研究工作尚处于探索阶段,目前建立的伸缩缝力学模型参数不全,与伸缩缝实际工作状态差别显著,仍不能有效地模拟伸缩缝的拉-压-弯-扭耦合静动力特性。车-缝-桥耦合动力响应模拟是限制伸缩缝力学性能理论研究的难点,构建伸缩缝的精细化力学模型,并以此构建车-缝-桥耦合动力响应模型是未来伸缩缝力学性能理论研究的重点。

而现场测试重点在于分析伸缩缝在使用过程中的病害原因,其缺点是测试费用高,难以获得具有普遍意义的研究成果。而试验研究可用于明晰伸缩缝的整体受力、变形特点,但由于车辆荷载及边界条件模拟是试验研究的难点,国内外也鲜有学者开展伸缩缝相关的试验研究,现阶段针对伸缩缝关键组件性能参数和整体静动力特性的研究成果仍较少,伸缩缝力学性能试验研究成果仍不足以支撑伸缩缝理论力学模型的建立。

3 伸缩缝病害及处置方法研究现状

3.1 伸缩缝常见病害分析

桥梁伸缩缝不仅需要调节日常和季节性温度变化引起的桥梁结构伸缩,同时需要满足车辆荷载

上千万次的冲击作用^[9]。伸缩缝的损伤或破坏是桥梁结构的最常见病害形式之一。国内外既有和新建桥梁中主要使用四种桥梁伸缩缝^[10-13],目前国内外学者对常用伸缩缝的病害已经有了较为全面的掌握,总结如下。

① 橡胶式伸缩缝

橡胶式伸缩缝的主要病害有以下两种^[9, 12, 14, 17]: (1)锚固区破损失效;(2)密封条损坏、渗水或阻塞。橡胶式伸缩缝的典型病害形式如图6所示。

橡胶式伸缩缝是中小跨径桥梁中最常用的伸缩缝形式,也是病害最为严重的伸缩缝形式。橡胶式伸缩缝病害会引起桥梁局部冲击作用的加剧,诱发伸缩缝位置处局部冻融循环引起混凝土结构开裂或表面脱落,引起主梁铺装层伴随性破坏等不利情况。现阶段尚无有效的方式来抑制其破坏,并实现快速修复。

② 梳齿型伸缩缝

梳齿型伸缩缝的主要病害有以下四种^[12, 15, 17, 37-38]: (1)锚固区与主梁结合处破损;(2)梳齿板显著变形或局部疲劳损坏;(3)锚固区破损失效;(4)密封条损坏、渗水或阻塞。梳齿型伸缩缝的典型病害形式如图7所示。

梳齿型伸缩缝主要应用于主跨在40~100 m的中大桥中。梳齿型伸缩缝的构造决定了其行车舒适性较优。其病害主要会造成桥梁结构的温度内力增高,诱发伸缩缝位置处局部冻融循环引起桥梁混凝土构件开裂或表面脱落,及加剧车桥耦合动力响应。

③ 模数式伸缩缝

模数式伸缩缝构造复杂,其的病害类型较多,包括^[39-43]: (1)锚固区与主梁结合区破损;(2)锚固区破损失效;(3)滑动支座剪切破坏;(4)横梁及支撑梁显著变形或疲劳破坏;(5)滑动箱锚固区破损;

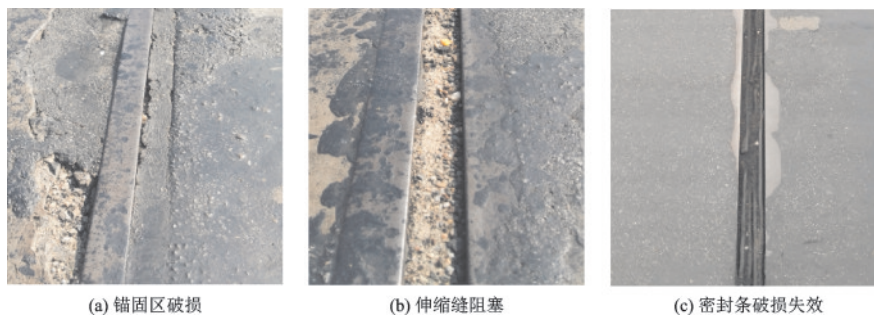


图6 橡胶板式伸缩缝典型病害

Fig.6 Typical diseases of elastomeric flexible strips



图7 梳齿型伸缩缝典型病害
Fig.7 Typical disease of cantilever-finger joints

(6)密封条破损、渗水或阻塞;(7)减振降噪装置失效。由于构造复杂,病害类型多,模数式伸缩缝是目前桥梁伸缩缝研究的重点和热点^[44]。模数式伸缩缝的典型病害形式如图8所示。

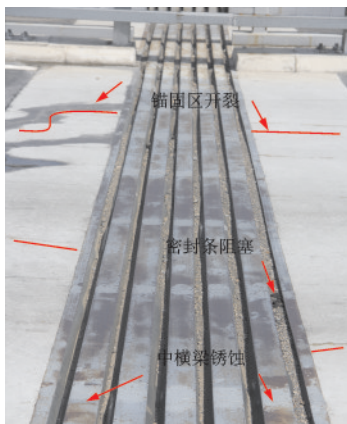


图8 模数式伸缩缝典型病害
Fig.8 Typical disease of modular expansion joints

需要特别指出的是近年来随着人们对行车舒适性,过缝噪声等的重视,模数式伸缩缝的减振降噪装置逐渐成为研究的热点^[45-51]。模数式伸缩缝中横梁与支撑梁之间,以及支撑梁与上部主梁预留钢板之间的硬接触会导致车辆过缝时出现明显的噪声。现阶段研究成果表明在中横梁与支撑梁之间、支撑梁与预留钢板之间设置橡胶支座能够明显降低车辆的过缝噪声^[46-48]。而橡胶支座等减振降噪装置因反复冲击等作用下的失效也逐渐成为模数式伸缩缝的新型病害,如图9所示。

模数式伸缩缝主要用于跨径超过300 m的大桥和特大桥。其病害形式最多,病害影响最大。由于在无病害状态下,车辆对大跨径桥梁的冲击作用并不显著,而伸缩缝病害会显著增加大跨径桥梁的车辆局部冲击作用,进而诱发多种伴随性病害,如铺

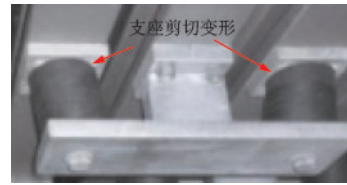


图9 模数式伸缩缝减振装置典型病害
Fig.9 Typical disease of the damping support of modular expansion joints

装层破坏、吊杆应力幅增大、钢箱梁局部屈曲等。

④无缝式伸缩缝是现阶段国内外学者研究的热点,但由于无缝材料性能、无缝构造的研究尚不成熟,现阶段无缝式伸缩缝主要应用于小跨径桥梁中。但无缝式伸缩缝在使用过程中亦出现了多种病害。包括:无缝式伸缩缝位置开裂、渗水;无缝式伸缩缝应力传递构造措施的失效等。

3.2 伸缩缝病害机理研究

伸缩缝病害种类繁多,其诱因也较为复杂。伸缩缝病害机理及影响研究仍处于探索阶段。结合1.2节对伸缩缝结构构造和工作原理的介绍和3.1节伸缩缝病害的介绍,模数式伸缩缝的易损构件主要包括锚固区(锚固箱及滑动箱与桥梁构件连接区)、密封条、中横梁和支撑梁以及滑动支座等^[40-42, 52]。

总结上述易损构件的病害原因主要有车辆的冲击作用、车-缝-桥等多条件耦合作用、施工工艺、环境因素、养护维修等^[11]。一方面伸缩缝锚固区多为后施工(主梁施工完成后才进行伸缩缝施工),易造成伸缩缝锚固区与主梁间的高差。《公路工程质量检验评定标准》^[53]对伸缩缝与桥面之间的差异沉降有相关限制,但是由于施工控制难度高,伸缩缝锚固区普遍与桥面存在一定程度的高差,进而易造成车辆对锚固区、中横梁、支撑梁、连接螺栓等的显著冲击作用。而长期高应力幅的冲击作用会引起伸缩缝关键受力构件的疲劳损伤或破坏;另一方面由于伸缩缝并非独立的受荷构件,在不同的环境条件下,受车-缝-桥耦合动力响应影响,伸缩缝的各组件常常处于拉-弯-剪-扭、压-弯-剪-扭耦合受力状态,局部的高应力、大变形会导致伸缩缝锚固区、连接螺栓、密封条、滑动支座等组件的累积损伤或破坏;此外,当伸缩缝出现局部损伤或破坏后,车辆过缝的稳定性变差,受伸缩缝参数影响的车-桥耦合动力(以下简称为车-缝-桥耦合动力)响应加剧,车辆

对伸缩缝、桥梁的冲击作用增大,进而造成伸缩缝病害加剧车-缝-桥耦合动力响应,车-缝-桥耦合动力响应又反过来加速伸缩缝、桥面铺装等病害恶化;而维修养护的不合理和不足也是伸缩缝病害恶化的重要原因。

3.3 伸缩缝病害处置研究

针对桥梁伸缩缝在使用过程中易损,而伸缩缝损伤对其自身、车辆、桥梁等的静动力响应均有显著影响。国内外学者对伸缩缝病害的处置方法也开展了系列研究。

新材料、新构造的应用是目前伸缩缝病害处置研究的热点。R.L.Purvis^[16]提出了一种防水型伸缩缝装置,验证了利用新材料提高伸缩缝防水性能的可行性。李婷^[37]从设计、施工及养护管理三个方面总结了伸缩缝早期破坏、缝体变形和混凝土表面局部剥落等病害的成因,验证了利用热塑性弹性体增韧环氧树脂提高普通环氧树脂材料韧性和抗冲击性的有效性,并将其应用于伸缩缝快速更换中。R.B.Malla等^[54]研制了一种适用于小变形伸缩缝的硅酮泡沫密封胶,将其应用于多种连接基底材料中(包括钢、沥青、以及聚合物混凝土),进行其性能试验,指出该型材料具有与各种基材粘结的能力,适用于小变形伸缩缝的变形需求。

此外,结合部分新材料弹性变形能力强等优点,为解决有缝伸缩缝构造上的天然缺陷(存在间隙,易造成车辆局部冲击作用加剧,诱发伸缩缝病害),近年来无缝伸缩缝技术成为国内外学者研究的热点之一^[55-58]。其中比较典型的示例有S.S.G. Balakumaran等^[59]提出了一种新型无缝伸缩缝装置的设计方法-弹性混凝土塞伸缩缝,并将其应用于某二级公路上,指出无缝伸缩缝技术能够适用于中小跨径桥梁的小变形需求。庄一舟等^[60]、陈宝春等^[61]对无缝技术在中小跨径桥梁中的应用前景,应用方法等进行了较为系统的研究。现阶段研究成果表明,无缝桥梁在跨度、斜交角和曲率等受到了显著的限制,无缝伸缩缝局部位置的开裂和漏水仍普遍存在,目前的研究成果仅针对小跨径桥梁较为适用,无缝伸缩缝新型构造措施以及超弹性材料的研发与应用仍有待进一步研究。

3.4 病害处置未来发展方向

伸缩缝病害种类繁多,其受环境、车辆、伸缩缝、桥梁等多参数影响显著,现阶段伸缩缝各组件病害机理(参数影响规律)尚不清晰,应在构建伸缩

缝精细化力学模型和车-缝-桥耦合动力分析模型的基础上,开展伸缩缝病害参数影响分析,以明晰伸缩缝病害机理及其影响。现阶段新型防水材料、粘结材料、修复材料的研发与应用(无缝技术)为传统伸缩缝(有缝伸缩缝)病害的防治、修复或更换带来新的契机。然而需要强调的是目前新型材料的耐久性不足、力学性能稳定性不足仍是限制其广泛应用的关键因素。伸缩缝使用环境恶劣,试验室中具有良好力学性能的新材料在实际应用过程中仍困难重重,新材料和新构造的应用效果仍有待工程实践证明,而具有更优力学性能、和更优环境适用性的伸缩缝用材料和新型技术构造仍是伸缩缝病害处置研究的发展方向。

4 伸缩缝对桥梁动力响应影响研究现状

伸缩缝的性能参数改变会直接影响车辆行驶的舒适性和安全性,影响桥梁的静、动力响应,并造成车辆-桥梁耦合作用性质和特点的变化。因此,考虑伸缩缝影响的桥梁静、动力响应研究是伸缩缝研究的另一重点。

考虑伸缩缝病害影响的桥梁静力响应变化主要包括日常和季节性温度作用下桥梁内力的改变,例如伸缩缝阻塞引起的升温条件下桥梁温度内力的增加。伸缩缝伴随桥梁结构伸缩,与桥梁上部结构相比,伸缩缝的刚度、质量等均很小,伸缩缝组件更易因伸缩缝病害引起显著的静力响应变化。

鉴于伸缩缝为可更换构件,国内外学者更为关注的是伸缩缝病害对车、桥、车-桥耦合的动力响应的影响研究,包括:考虑伸缩缝损伤影响的车、桥、车-桥耦合振动变化;以及考虑伸缩缝影响的桥梁动力响应控制等方面的研究。

4.1 考虑伸缩缝影响的车-桥动力响应研究

伸缩缝性能参数改变会显著影响车辆、桥梁以及车-桥耦合动力响应的大小和特征。因此,国内外学者对考虑伸缩缝设计参数影响及其变化导致的车辆、桥梁以及车-桥耦合动力响应规律的变化进行了广泛的研究。

车辆-伸缩缝相互作用方面,F.A.Arntmont等^[62]对车辆-伸缩缝的冲击作用模拟方法进行了改进,提出了一种能够考虑车轮轨迹、中横梁间隙宽度和车辆速度影响的梯形脉冲荷载,利用有限元软件建立了伸缩缝的三维分析模型,进而对脉冲荷载作用下

的伸缩缝受力、变形特点进行了分析。P.Di.Mascio等^[63]通过建立伸缩缝位置处的车辆-伸缩缝三维有限元分析模型,分析了重载交通作用下伸缩缝的动力响应,并以此开展了伸缩缝的损伤评估研究,指出伸缩缝、桥头搭板和桥梁的竖向不平整是造成车辆冲击作用增大、伸缩缝开裂和局部构件应力过大的主要原因。L.Deng等^[64]通过建立的三维车辆模型,研究了伸缩缝损伤条件下车辆荷载对预应力混凝土箱梁桥桥面板受力的影响,指出伸缩缝的损伤会增加车辆对桥面板和伸缩缝的冲击作用,但对大跨径桥梁结构的整体冲击作用影响不显著。

车辆-伸缩缝相互作用离不开对车辆冲击作用的模拟,但仅考虑车辆参数和伸缩缝参数的影响并不能充分反映伸缩缝与车-桥的耦合动力作用。为此,国内外学者也广泛开展了考虑伸缩缝影响的车-桥耦合动力分析。A.Cantero等^[65]提出了一种能够考虑伸缩缝间隙宽度而忽略伸缩缝刚度、阻尼等参数影响的简化力学模型,如图10(a)所示,重点探讨了伸缩缝的缝宽变化对车-桥耦合振动的影响,并对车辆制动引起的伸缩缝剪切应力冲击效应进行了分析。此外,由1.2节可知,为了更加真实地模拟车-缝-桥耦合动力响应,Y.Ding等^[30]将模数式伸缩缝简化为仅考虑伸缩缝竖向支撑刚度和阻尼效应的质量-弹簧-阻尼非耦合模型,如图10(b)所示,分析了伸缩缝间隙数量,间隙宽度等参数的变化对车-桥耦合振动的影响;E.McCarthy等^[2]通过模数式伸缩缝的静动力参数试验,建立了一种能够考虑伸缩缝摩擦组件、间隙装置、中横梁、支撑梁等关键组件的多质量-弹簧-阻尼耦合模型,如图10(c)所示。

目前伸缩缝力学模型从简单发展到了复杂,从单一参数发展到了多参数,从非耦合模型发展到了耦合模型,相关研究已取得了长足的进步。但现阶段建立的伸缩缝力学模型仍不能有效地模拟伸缩缝的整体静动力特性,从整体上分析车-缝-桥耦合

动力响应难度大。为此,国内外学者针对伸缩缝单一参数变化影响的车-桥耦合动力响应分析,及车-桥耦合动力响应对伸缩缝本身或桥梁其他附属构件影响方面仍做了大量的研究,包括伸缩缝间隙,路面-桥头搭接构造及其参数对车桥耦合动力响应的影响,以及考虑伸缩缝个别参数影响的车桥耦合动力响应对桥梁吊杆、铰接缝、桥面铺装等组件受力变形的影响^[30, 66-79]。

4.2 考虑伸缩缝影响的桥梁地震响应研究

伸缩缝作为桥梁主梁节段间、桥梁与道路间、桥梁与隧道间、桥梁与桥梁间的重要连接构件,直接参与地震作用下桥梁结构的地震响应,其相关参数的变化会影响桥梁结构的地震响应规律。因此,国内外学者对考虑伸缩缝影响的桥梁地震响应开展了研究。

K.Ramanathan^[80]首先将伸缩缝纳入地震作用下桥梁可靠度分析模型中,进行了伸缩缝-桥梁地震响应数值仿真分析,指出在考虑结构整体的功能性和可修复功能时应着重考虑伸缩缝的影响。J.Chen等^[81]分析了曲线桥考虑上部结构梁-台处碰撞时桥梁伸缩缝的作用,提出了伸缩缝刚度和阻尼在计算模型中的实现方法,并对考虑伸缩缝处碰撞效应的曲线桥地震响应规律进行了数值研究。R.C.Battista等^[82],N.H.H.Chouw^[83],张文学等^[84],王天利等^[85]也针对不同的桥梁结构型式,从不同的角度对考虑伸缩缝影响的桥梁地震响应进行了研究,其中伸缩缝模型多采用简单的赫兹接触模型、间隙模型和滞回耗能模型。

4.3 未来发展方向

目前考虑伸缩缝参数影响的车-缝-桥耦合动力响应分析仍处于探索阶段。现有的伸缩缝力学模型参数不全,不能有效地描述伸缩缝的实际工作状态;车-缝-桥耦合动力响应参数影响规律分析仍停留在个别参数影响分析阶段。精细化伸缩缝力学模型构建,车-缝-桥耦合动力分析模型建立,伸缩缝参数及其参数变化对车-缝-桥耦合动力响应的影响规律分析仍是未来研究的重点。

现阶段国内外学者主要通过构建不同的伸缩缝力学模型(例如,将伸缩缝等效为间隙单元、碰撞单元、接触单元等,将伸缩缝视为桥梁边界条件的一部分),通过数值手段分析伸缩缝参数对桥梁整体地震响应影响。研究中多将伸缩缝影响作为桥梁抗震性能影响的众多因素之一,以综合考虑土-结

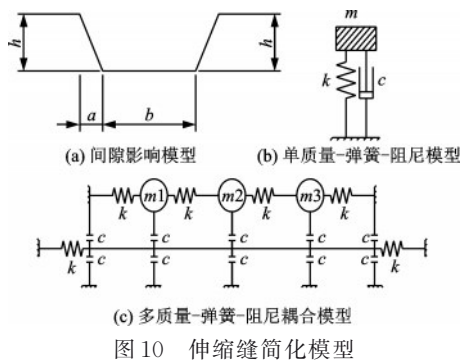


图10 伸缩缝简化模型

Fig.10 Simplified analytical models of expansion joints

构相互作用,地震动空间效应(行波、局部场地、相干),碰撞效应等对桥梁抗震性能的影响。然而由于伸缩缝参数对桥梁地震响应的影响与桥梁结构本身,地震时空特性,伸缩缝自身参数等均相关。因此,伸缩缝精细化力学模型构建,多因素耦合作用下桥梁地震响应分析以及考虑伸缩缝影响的桥梁振动台试验验证仍是未来研究的重要方向。

5 伸缩缝诱发噪声及振动控制方法研究现状

车辆通过伸缩缝会产生一定程度的噪声,导致伸缩缝周边声环境恶化。车辆过缝诱发的车辆动力响应主要依靠车辆的悬挂系统、车轮等耗能减振装置控制^[86-87],不属于土木工程减振控制范畴,在此不再赘述。本节重点阐述车辆过缝诱发噪声机理及其控制,以及车-缝-桥耦合动力响应控制研究现状及发展方向。

5.1 车辆过缝噪声机理及其控制研究

城市桥梁车辆过缝产生的噪声已是城市噪声的重要来源^[88-89],国内外学者对伸缩缝的噪声控制^[90]和耗能需求^[91]均提出建议。为明晰车辆过缝产生噪声机理并对其进行控制,国内外学者开展了系列研究。

现场测试方面,石林泽等^[92]、张纬等^[51]对车辆通过伸缩缝的噪声水平进行了现场实测,指出车辆过缝会产生显著的噪声脉冲,而车辆过缝噪声的影响范围高达1000 m²,为车辆噪声控制提供了基础数据。K.P.Glaeser等^[93]首先对一种典型的模数式伸缩缝附近的声环境进行了测试,指出车辆过缝时会产生噪声脉冲,而噪声脉冲是车辆轮胎撞击伸缩缝单元矩形面和穿越伸缩缝不连续表面的结果。Wakefield等^[50]指出车轮越过伸缩缝间隙时会引起脉冲空气,而脉冲空气被压缩进伸缩缝空腔是车辆过缝噪声形成的根本原因。在现场测试研究的基础上,为了从理论上分析车辆过缝噪声产生的机理和参数影响规律。J.P.Ghimire等^[47]提出了一种有限元-边界元相结合的数值分析方法,分别利用有限元对伸缩缝节点的动态响应进行分析,利用边界元对节点下方空腔内和空腔外的声场进行分析。相关方法可为车辆过缝的数值仿真分析研究所借鉴。

现有研究成果表明车辆穿越伸缩缝不连续表面导致车辆对伸缩缝的冲击作用是造成车辆过缝噪声的主要原因。在车辆过缝噪声机理研究的基

础上,国内外学者对车辆过缝噪声控制方法展开了研究。Wakefield等^[50]利用土工织物填充伸缩缝组件的空腔来控制车辆过缝噪声,该方法得到了实验验证。K.P.Glaeser等^[93]将一种新型的表面降噪装置应用于具有两种典型间隙的模数式伸缩缝上,并验证了该型降噪装置降低车辆过缝噪声的有效性。而对于实际应用,受限于伸缩缝自身的可用空间小,目前主要通过支撑梁和中横梁之间设置橡胶支座的方式来控制伸缩缝振动水平。但由于伸缩缝的使用环境恶劣和受力变形形式复杂,橡胶支座在使用过程中的耐久性不足仍是限制其应用的关键因素^[94]。

5.2 车-缝-桥耦合动力响应控制研究

由4.1节总结和分析可知,伸缩缝参数的介入往往会加剧车-桥耦合动力响应,对车-缝-桥耦合动力响应进行控制是十分必要的。与伸缩缝自身狭小的可用空间相比,伸缩缝位置处的桥梁构件更具有设置减振(震)装置的可能性和施工的便易性。为此,T.Guo等^[95]将粘滞阻尼器设置于伸缩缝与主梁之间,通过粘滞阻尼器来控制车-缝-桥耦合动力响应引起的桥梁纵向位移响应和竖向冲击作用,基于现场实测指出粘滞阻尼器能够在一定程度上控制车致桥梁的纵向动力响应,并可有效地控制伸缩缝的纵向伸缩应力,避免伸缩缝早期病害的发生。

粘滞阻尼器对车-缝-桥耦合动力响应的控制效果好,但由于粘滞阻尼器价格昂贵,维护成本高,受环境条件影响大等特点,国内外学者仍致力于研发低成本、环境适用性强的新型减振装置。H.C.Kwon等^[96]利用调谐质量阻尼器对车致桥梁振动进行了控制研究,指出调谐质量阻尼器能够一定程度的控制车致桥梁竖向振动。王辰^[97]提出了一种双臂弯矩控制系统对车致桥梁的动力响应进行了控制研究,验证了该型减振装置在车致动力响应控制中的有效性。吴延平等^[98]以梁端混凝土填筑减振方法为对象,分析其在伸缩缝冲击作用中的减振效果,并且分析了填筑长度对减振效果的影响。

5.3 未来发展方向

车辆过缝噪声对伸缩缝周边声环境影响巨大,伸缩缝位置处的几何不连续是引起车辆过缝噪声的主要原因;现阶段车辆过缝噪声的参数影响规律和车辆过缝噪声控制仍处于起步阶段。如何利用有限的空间、有限的经费对车辆过缝噪声进行有效地控制是未来研究的重点。

而车-缝-桥耦合动力响应与地震致结构动力响应和风致结构动力响应特点不同,车-缝-桥耦合动力响应控制也应具有鲜明的特点。构造简单、环境适应能力强、价格低廉是车-缝-桥耦合动力响应控制装置应具备的基本特点,而具备上述特点的新型减振装置的研发与应用是未来车-缝-桥耦合动力响应控制研究的方向。

6 结论与建议

桥梁伸缩装置(以下简称伸缩缝)研究有了长足的进步,但仍有系列问题亟待解决和发展。伸缩缝未来研究发展方向及建议如下。

(1)为了考虑伸缩缝对车辆动力作用、桥梁静动力作用以及车-桥耦合动力作用的影响,基于实际的桥梁伸缩缝病害特征,建立能够描述伸缩缝时变力学参数的精细分析模型十分必要。而基于伸缩缝时变力学模型,建立考虑伸缩缝时变参数影响的车-桥耦合动力响应分析方法,明晰伸缩缝、桥梁、车辆等参数对车-桥耦合动力响应的影响规律,是未来伸缩缝损伤机理、损伤状态评估及损伤控制方法研究的基础。

(2)桥梁伸缩装置“韧性”是桥梁结构“韧性”的基本要求。结合“韧性结构”的要求和特点(结构延性设计、具有可恢复功能等),考虑到国内外既有桥梁用伸缩缝装置大范围、普遍性病害的实际情况,以及新建桥梁用伸缩缝装置应具有良好抗冲击力、抗疲劳性能、耐久性等需求,明确了未来桥梁用伸缩缝应具有“韧性”及快速可修复功能。因此,对如何提高桥梁用伸缩缝装置的韧性(新材料、振动控制技术),以及具有良好的快速可修复能力(经济性、时效性)是未来桥梁用伸缩缝装置发展的另一重要方向。

(3)桥梁用伸缩缝装置的使用环境极其恶劣,有缝伸缩缝不仅会影响车辆行驶的平顺性和安全性,同时由于缝的存在容易出现积水、垃圾填充等病害。而无缝整体式桥梁可以有效地避免有缝带来的问题。目前,对于无缝整体式桥梁,其跨度、斜交角和曲率等受到了显著的限制,目前的研究成果仅针对小跨径桥梁较为适用。因此,基于可用材料的发展,进一步发展无缝技术,将其有效地应用于小跨径桥梁,并逐步向中大跨径桥梁拓展是伸缩缝的重要研究方向之一。

参考文献:

- [1] 付岚岚. 大跨度桥梁伸缩装置的研究[D]. 西安:长安大学, 2006.
Fu L L. Study on the expansion joint of the large span bridge [D]. Xi' An: Chang' An University, 2006. (in Chinese)
- [2] Mccarthy E, Wright T, Padgett J E, et al. Development of an experimentally validated analytical model for modular bridge expansion joint behavior[J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(2): 235-244.
- [3] Nielson B G, Desroches R. Seismic fragility methodology for highway bridges using a component level approach [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2007, 36(6): 823-839.
- [4] Pourzeynali S, Hosseini-zhad A. Reliability analysis of bridge structures for earthquake excitations [J]. Scientia Iranica Transaction A-Civil Engineering, 2009, 16(1): 1-15.
- [5] Manual for bridge element inspection: 2015 interim[S]. Washington D C: Aashto., 2015.
- [6] 公路桥梁伸缩装置:JT/T 327—2004[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
Highway bridge expansion and contraction installation: JT/T 327—2004 [S]. Beijing: China Communication Press, 2004. (in Chinese)
- [7] 赵衡平. 现代桥梁伸缩装置[M]. 北京:人民交通出版社, 2008:1-40.
Zhao H P. Qiao Liang Shen Suo Zhuang Zhi [M]. Beijing: China Communication Press, 2008:1-40. (in Chinese)
- [8] Green M F. Dynamic response of high way bridges to heavy vehicle loads: theory and experimental validation [J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 170(1): 51-78.
- [9] Caltrans. Bridge deck joints and deck seals[R]. Sacramento, CA: Memo to Designers 7-10, 1994.
- [10] Dornsife R J. Bridge engineering handbook 25 expansion joints [M]. Washington State: Department of Transportation, 2000.
- [11] Bridge Maintenance and Repair Handbook [M]. Florida: Florida Department of Transportation, 2004: 1-183.
- [12] Lima J M, de brito J. Inspection survey of 150 expansion joints in road bridges[J]. Engineering Structures, 2009, 31(5): 1077-1084.
- [13] Aashto. Section 14: Joints and bearings [R]. 6th ed. Washington, DC: Aashto Lrfd bridge design specificat-

- ions, 2012.
- [14] Milner M H. Survey of past experience and state-of-the-practice in the design and maintenance of small movement expansion joints in the northeast [R]. Washington DC: Aashto Northeast Bridge Preservation Partnership, 2014.
- [15] Chang L M, Lee Y J. Evaluation of performance of bridge deck expansion joints [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2002, 16(1): 3-9.
- [16] Purvis R L. Nchrp synthesis of highway practice 319: bridge deck joint performance: a synthesis of highway practice [R]. Washington D C: Transportation Research Board of the National Academies, 2003.
- [17] Baker. Evaluation of various types of bridge deck joints [R]. Phoenix: Baker Engineering and Energy, 2006.
- [18] Joint sealing systems glued on concrete sealing constructions and new developments for joint sealing compound systems, both used in facilities for the storage, filling and handling of chemical liquids: 7th world congress on joints bearings and seismic systems for concrete structures [Z]. Las Vegas, Nevada USA: Kluge U, 2011.
- [19] Specifications for highway bridges. Part 1: Common specifications [S]. Tokyo: Jra, 1996.
- [20] Guide specifications for horizontally curved highway bridges [S]. Washington D C: Aashto, 2003.
- [21] Eurocode 1: Actions on structures—Part 2: Traffic loads on bridges [S]. Brussels, Belgium: Cen E C F S, 2003.
- [22] Canadian highway bridge design code [S]. Mississauga, ON, Canada: Csa C S A, 2006.
- [23] Bridge manual [S]. Wellington, New Zealand: Nzta N Z T A, 2013.
- [24] Quan G A K K. Effect of finger expansion joints on seismic response of bridges [J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser A1*, 2010, 65(1): 243-254.
- [25] Stamatopoulos G N. Fatigue life of the bolted yoke connection in single support beam (SSB) modular bridge expansion joints [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2017, 17(2): 723-738.
- [26] Roeder C W. Fatigue cracking in modular expansion joints [R]. Olympia, WA: Washington State DOT, 1993.
- [27] Crocetti R, Edlund B. Fatigue performance of modular bridge expansion joints [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2003, 17(4): 167-176.
- [28] Guizani L, Bonnell W, Chaallal O. Fatigue testing and performance of welded single-support bar modular bridge joints [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20(5): 04014079.
- [29] Busel A, Krotau R. The design and composition of expansion joints on big-span bridges with intensive heavy-duty traffic [C]//6th Transport Research Arena (TRA). Poland: Warsaw. 2016, 14: 3953-3962.
- [30] Ding Y, Zhang W, Au F T K. Effect of dynamic impact at modular bridge expansion joints on bridge design [J]. *Engineering Structures*, 2016, 127: 645-662.
- [31] 孙正峰. 大位移桥梁伸缩缝动力特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
Sun Zh F. Dynamic characteristics research of the large displacement bridge expansion joints [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese)
- [32] 吴昊, 王少华, 李冰, 等. 模数式桥梁伸缩缝固有频率及结构参数灵敏度分析[J]. *公路交通科技*, 2014, 31(3): 90-95.
Wu H, Wang Sh H, Li B, et al. Analysis of natural frequency and structural parameter sensitivity of MBEJs [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 31(3): 90-95. (in Chinese)
- [33] Sun Z, Zhang Y. Failure mechanism of expansion joints in a suspension bridge [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(10): 05016005.
- [34] Fu C C, Zhang N. Investigation of bridge expansion joint failure using field strain measurement [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2011, 25(4): 309-316.
- [35] 王立成, 王清湘, 司炳君, 等. 模块型桥梁伸缩缝疲劳试验研究[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(12): 44-49.
Wang L Ch, Wang Q X, Si B J, et al. Experimental research on fatigue testing of modular bridge expansion joint [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2004, 37(12): 44-49. (in Chinese)
- [36] Gao K, Yuan W C, Dang X Z. Development and experimental study on cable-sliding modular expansion joints [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2017, 61(6): 795-806.
- [37] 李婷. 高速公路桥梁伸缩缝快速更换关键技术[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
Li T. Rapid replacement technique of the expansion joint of the highway bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [38] Liu S, Mo L, Wang K, et al. Preparation, microstructure and rheological properties of asphalt sealants for bridge expansion joints [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 105: 1-13.
- [39] Dexter R J O C. Design, specification, installation, and maintenance of modular bridge expansion joint systems [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2001, 6(6): 529-538.
- [40] Okuda M Y S. Reinforcement of expansion joint on Akashi Kaikyo Bridge [C]//JSCE 59th Annual Meet-

- ing. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2004.
- [41] Sorensen O, Bloomstine M L, Bitsch N, et al. Design for movements in bridges [R]. Zurich, Switzerland: IABSE Symposium. Report, 2007, 93(31):96-109.
- [42] Mahmoud K M. Safety and reliability of bridge structures [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.
- [43] Halifax Harbour Bridges Annual Rep [R]. Dartmouth, NS, Canada: Halifax Harbour Bridges, 2010.
- [44] Bradford P. Equidistance in modular expansion joints [C]//Proc. 2006 IJBRC Conf. Halifax, Nova Scotia: International Joints and Bearings Research Council, 2006, 237-248.
- [45] 赵衡平. 我国部分桥梁大位移量伸缩装置的初步调查 [J]. 公路交通技术, 2006 (5): 76-80.
Zhao H P. Primary investigation to large displacement expansion joints for partial bridges in China [J]. Technology of Highway and Transport, 2006 (5): 76-80. (in Chinese)
- [46] Ravshanovich K A, Yamaguchi H, Matsumoto Y, et al. Mechanism of noise generation from a modular expansion joint under vehicle passage [J]. Engineering Structures, 2007, 29(9): 2206-2218.
- [47] Ghimire J P, Matsumoto Y, Yamaguchi H. Vibro-acoustic analysis of noise generation from a full scale model of modular bridge expansion joint [J]. Noise Control Engineering Journal, 2008, 56 (6) : 442-450.
- [48] Ghimire J P, Matsumoto Y, Yamaguchi H, et al. Numerical investigation of noise generation and radiation from an existing modular expansion joint between prestressed concrete bridges [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 328(1/2): 129-147.
- [49] Sexton T. Controlling expansion joint noise on the Tacoma narrows bridge in Washington State, USA [C]//Inter-noise and Noise-con Congress and Conference Proceedings, Washington State: Institute of Noise Control Engineering, 2001: 1016-1021.
- [50] Clair W. Wakefield. Analysis and control of bridge expansion joint croaking noise [J]. Canadian Acoustics Acoustique Canadienne, 2011, 39(3): 138-139.
- [51] 张纬, 金涛, 丁勇, 等. 基于34座桥梁实测的城市桥梁噪声分析 [J]. 城市环境与城市生态, 2015, 28(5): 42-46.
Zhang W, Jin T, Ding Y, et al. Analysis of noise of urban bridges based on measurement of 34 bridges [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2015, 28 (5) : 42-46. (in Chinese)
- [52] Ni Y Q, Hua X G, Wong K Y, et al. Assessment of bridge expansion joints using long-term displacement and temperature measurement [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2007, 21 (2) : 143-151.
- [53] 公路工程质量检验评定标准: JTG F80/1—2012 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
Inspection and evaluation quality standards for highway engineering: JTG F80/1—2012 [S]. Beijing: China Communication Press, 2012. (in Chinese)
- [54] Malla R B, Swanson B J, Shaw M T. Laboratory evaluation of a silicone foam sealant bonded to various header materials used in bridge expansion joints [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25 (11) : 4132-4143.
- [55] Ni Choine M, O'Connor A J, Padgett J E. Comparison between the seismic performance of integral and jointed concrete bridges [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2015, 19(1): 172-191.
- [56] Kozak D L, Lafave J M, Fahnestock L A. Seismic modeling of integral abutment bridges in Illinois [J]. Engineering Structures, 2018, 165: 170-183.
- [57] Kong B, Cai C S, Kong X. Field monitoring study of an integral abutment bridge supported by prestressed precast concrete piles on soft soils [J]. Engineering Structures, 2015, 104: 18-31.
- [58] Hoppe E, Weakley K, Thompson P. Jointless bridge design at the virginia department of transportation [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 3943-3952.
- [59] Balakumaran S S G, O'Neill K, Springer T C, et al. Elastomeric concrete plug joints a new durable bridge expansion joint design [J]. Transportation Research Record, 2017, 2642(1): 18-25.
- [60] 庄一舟, 徐亮, 程俊峰, 等. 简支梁桥桥面连续结构力学特性理论分析 [J]. 中国公路学报, 2017, 30(7): 73-85.
Zhuang Y Zh, Xu L, Chen J F, et al. Theoretical analysis of mechanical properties for continuous deck structure of simply supported beam bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30 (7) : 73-85. (in Chinese)
- [61] 陈宝春, 付磊, 庄一舟, 等. 中国无伸缩缝桥梁应用现状与发展对策 [J]. 中外公路, 2018, 38(1): 87-95.
Chen B Ch, Fu C, Zhuang Y Zh, et al. Application status and development strategy of jointless bridges in China [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2018, 38(1): 87-95. (in Chinese)
- [62] Artmont F A, Roy S A. Model for simulating dynamic vehicular load on modular bridge expansion joint systems [C]//8th World Congress on Joints, Bearings, and Seismic Systems for Concrete Structures. Georgia, Atlanta: Transportation Research Board, 2016.

- [63] Di Mascio P, Loprencipe G, Moretti L, et al. Bridge expansion joint in road transition curve: effects assessment on heavy vehicles [J]. Applied Sciences-Basel, 2017, 7(6): 599.
- [64] Deng L, Yan W, Zhu Q. Vehicle impact on the deck slab of concrete box-girder bridges due to damaged expansion joints[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(2): 06015006.
- [65] Gonzalez A, Cantero D, O'Brien E J. Dynamic increment for shear force due to heavy vehicles crossing a highway bridge [J]. Computers & Structures, 2011, 89(23/24): 2261-2272.
- [66] Broquet C, Bailey S F, Fafard M, et al. Dynamic behavior of deck slabs of concrete road bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2004, 9(2): 137-146.
- [67] 张洪亮,胡长顺,高江平. 路桥过渡段容许台阶高度确定的参数影响[J]. 公路交通科技, 2005, 22(3): 42-46.
Zhang H L, Hu Ch Sh, Gao J P. Parameters' influence on determination of allowable differential settlement between bridge and approach embankment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(3): 42-46. (in Chinese)
- [68] 黄卫. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计[J]. 土木工程学报, 2007, 40(9): 65-77.
Huang W. Design of deck pavement for long-span steel bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(9): 65-77. (in Chinese)
- [69] 单景松,黄晓明,廖公云. 移动荷载下路面结构应力响应分析[J]. 公路交通科技, 2007, 24(1): 10-13.
Shan J S, Huang X M, Liao G Y. Dynamic response analysis of pavement structure under moving load [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(1): 10-13. (in Chinese)
- [70] 钱振东,刘云,黄卫. 考虑不平度的桥面铺装动响应分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(4): 49-53.
Qian Zh D, Liu Y, Huang W. Analysis of the dynamic response of steel-deck pavement with roughness [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(4): 49-53. (in Chinese)
- [71] 谢旭,吴冬雁,王建峰,等. 伸缩缝车辆冲击引起的箱梁桥振动特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(10): 1923-1930.
Xie X, Wu D Y, Wang J F, et al. Dynamical behavior of steel box girder bridges due to vehicle-induced vibration at expansion joint[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 43(10): 1923-1930. (in Chinese)
- [72] 徐勋倩. 大跨径钢桥面铺装层车辆动响应影响因素分析[J]. 公路交通科技, 2009, 26(9): 85-90.
Xu X Q. Analysis of dynamic response of long-span steel deck pavement under moving loads [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(9): 85-90. (in Chinese)
- [73] 杨建荣,李建中. 车辆荷载作用下混凝土箱梁桥桥面板局部振动分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(2): 58-63.
Yang J R, Li J Zh. Local dynamic response in deck slab of a concrete box girder bridge [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, 42(2): 58-63. (in Chinese)
- [74] 丁勇,黄奇,谢旭,等. 载重汽车桥梁伸缩缝跳车动力荷载计算方法与影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 98-107.
Ding Y, Huang Q, Xie X, et al. A computational method for the dynamic load in heavy-vehicle bumping at the bridge expansion joint and analysis of the influencing factors [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 98-107. (in Chinese)
- [75] 臧继成. 重载交通水泥混凝土特大桥桥面铺装受力分析及关键技术研究[D]. 天津:河北工业大学, 2014.
Zang J Ch. Research on force analysis and key technologies of heavy load traffic pavement of cement concrete bridge deck [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [76] 张梦秋. 移动荷载作用下水泥混凝土路面力学响应及接缝传荷能力分析[D]. 天津:河北工业大学, 2015.
Zhang M Q. Response analysis of cement concrete pavement under dynamic load and load-transfer efficiency of joint [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [77] 韩海波. 车-桥耦合作用下空心板桥铰缝的破坏研究[D]. 长春:吉林大学, 2015.
Han H B. Research on hinge joints of hollow slab under vehicle-bridge coupling [D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [78] 黄大强. 高寒地区沥青路面温度与荷载耦合动力行为[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
Huang D Q. Dynamic behavior of the temperature and load coupling effect on asphalt pavement in plateau-cold region [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [79] 蒋欣. 大跨径桥梁钢桥面铺装设计分析[J]. 城市道桥与防洪, 2017(6): 132-133.
Jiang X. Analysis on design of steel deck pavement of long-span bridge [J]. Urban Road Bridges & Flood Control, 2017(6): 132-133. (in Chinese)
- [80] Ramanathan K. Next generation seismic fragility curves for California bridges incorporating the evolution in seismic design philosophy [D]. Atlanta: Georgia Institute

- of Technology, 2012.
- [81] Chen J, Han Q, Liang X, et al. Effect of pounding on nonlinear seismic response of skewed highway bridges [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2017, 103: 151-165.
- [82] Battista R C, Pfeil M S, Carvalho E M L. Fatigue life estimates for a slender orthotropic steel deck [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64 (1) : 134-143.
- [83] Chow N H H. Seismic design of bridge structures with allowance for large relative girder movements to avoid pounding [J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 2009, 42(2): 75-85.
- [84] 张文学, 鲍艳, 王景景. 伸缩缝间隙及纵向阻尼器对斜拉桥的碰撞影响[J]. *公路交通科技*, 2012, 29(8): 60-63.
Zhang W X, Bao Y, Wang J J. Influence of expansion joint gap and longitudinal damper on collision of cable-stayed bridge [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2012, 29 (8) : 60-63. (in Chinese)
- [85] 王天利, 李青宁, 宗雪梅. 地震作用下曲线匝道桥梁伸缩缝碰撞响应研究[J]. *公路交通科技*, 2011, 28 (10): 54-59.
Wang T L, Li Q N, Zong X M. Pounding response of expansion joint in curved ramp bridge under earthquake [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, 28(10): 54-59. (in Chinese)
- [86] 廖昌荣, 余森, 陈伟民, 等. 汽车磁流变减振器设计原理与实验测试[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(16): 1391-1394.
Liao Ch R, Yu M, Chen W M, et al. Design theory and experimental test of a magneto-rheological fluid shock absorber for automobile suspension systems [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(16): 1391-1394.
- [87] Nguyen Q, Choi S. Optimal design of MR shock absorber and application to vehicle suspension [J]. *Smart Materials & Structures*, 2009, 18(3): 035012.
- [88] 声环境质量标准:GB 3096—2008[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2008.
Environmental quality standard for noise; GB 3096—2008 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008. (in Chinese)
- [89] Ancich E J, Chirgwin G J, Brown S C. Dynamic anomalies in a modular bridge expansion joint [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2006, 11(5): 541-554.
- [90] 闫王晨. 桥头路桥不平顺引起的车桥振动研究[D]. 长沙:湖南大学, 2015.
Yan W Ch. Study of vehicle-road-bridge vibration caused by the road and bridge unevenness at the end of the bridge [D]. Changsha: Hunan University, 2015. (in Chinese)
- [91] Brownjohn J M W, Koo K, Scullion A, et al. Operational deformations in long-span bridges [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2015, 11 (4SI) : 556-574.
- [92] 石林泽, 杨阳, 丁勇, 等. 桥梁伸缩缝噪声实测与影响因素分析[J]. *环境与发展*, 2017, 29(6): 145-146.
Shi L Z, Yang Y, Ding Y, et al. Measurement of bridge expansion joint noise and analysis of influence factors [J]. *Environment and development*, 2017, 29(6) : 145-146. (in Chinese)
- [93] Glaeser K P, Schwalbe G, Zoller M. Mitigation the noise emissions of vehicles travelling over bridge expansion joints [C]//Inter-noise and Noise-con Congress and Conference Proceedings. Osaka JAPAN: Institute of Noise Control Engineering, 2011, 2424-2433.
- [94] 大连理工大学桥梁与隧道工程研究所. SSFC系列模数式伸缩装置结构特点[R]. 大连: 大连理工大学, 2016.
Bridge and tunnel engineering of Dlut. Structural characteristics of SSFC modular expansion joint [R]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [95] Guo T, Liu J, Zhang Y, et al. Displacement monitoring and analysis of expansion joints of long-span steel bridges with viscous dampers [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20(9): 04014099-1~11.
- [96] Kwon H C, Kim M C, Lee I W. Vibration control of bridges under moving loads [J]. *Computers & Structures*, 1998, 66(4): 473-480.
- [97] 王辰. 车桥耦合系统的振动理论分析及其振动主动控制[D]. 济南: 山东大学, 2002.
Wang Ch. Analysis and active control of bridge vibrations considering the vehicle-bridge dynamic interaction [D]. Jinan: Shandong University, 2002. (in Chinese)
- [98] 吴延平, 吴冬雁, 谢旭, 等. 车辆通过钢箱梁桥伸缩缝的振动响应及减振[J]. *噪声与振动控制*, 2013, 33(2): 95-100.
Wu Y P, Wu D Y, Xie X, et al. Response and vibration control of steel box-girder bridge when vehicles passing through the expansion joint [J]. *Noise and Vibration Control*, 2013, 33(2): 95-100. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)