

Dynamic Research Status of Bridge Expansion Joint under Complicated Environments

Guoji Zuo, Bo Chen, Xiang Zhao, Yanxuan Gao, Yun Zhang

School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan
Email: zhaoxiang_swpu@126.com, zuoguoji@qq.com

Received: Mar. 6th, 2017; accepted: Mar. 20th, 2017; published: Mar. 23rd, 2017

Abstract

This paper discusses the importance and development status of the bridge expansion joint. The impact vibration research status of bridge expansion joint under the complicated physical environment is presented in detail. This includes four aspects: The domestic and foreign research situation of the expansion joint, dynamics analysis of large displacement expansion joint, the vibration reduction and noise control of expansion joint and the seismic analysis of expansion joint. Through analysis, this paper summarizes research deficiencies at this stage of study and proposes the prospect of future research.

Keywords

Complicated Physical Environment, Expansion Joints, Impact Vibration, Dynamic Analysis

复杂环境下桥梁伸缩缝动力学研究现状

左国稷, 陈波, 赵翔, 高严轩, 张云

西南石油大学, 土木工程与建筑学院, 四川 成都
Email: zhaoxiang_swpu@126.com, zuoguoji@qq.com

收稿日期: 2017年3月6日; 录用日期: 2017年3月20日; 发布日期: 2017年3月23日

摘要

本文介绍了桥梁伸缩缝的重要性及发展状况。详细归纳了复杂物理环境下桥梁伸缩缝的冲击振动研究现状, 包括国内外伸缩缝的研究现状、大位移伸缩缝的动力学分析、伸缩缝的减振和噪声控制以及伸缩缝

抗震分析四个方面。通过分析，本文总结了现阶段研究的不足，并提出了对未来研究的展望。

关键词

复杂物理环境，伸缩缝，冲击振动，动力学分析

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

桥梁伸缩缝是为了满足桥面变形需要，使车辆能够平稳的通过桥面，在桥面伸缩接缝处设置的一种伸缩装置[1] [2]。随着我国桥梁事业的飞速发展，大跨度的桥梁结构越来越多，对大位移伸缩缝的需求也越来越大。伸缩缝除了要承受周期性热荷载外还要承受车辆冲击荷载的反复作用，其中车辆冲击荷载对桥梁的作用会引发冲击振动，伸缩缝和桥面的破坏以及噪声等负面影响。除此之外，伸缩缝的使用环境比较恶劣，又长期暴露在空气中，所以它是桥梁结构中最易遭到破坏而又难以修补的部位。作为整个桥梁结构中最薄弱的部位，由伸缩缝引起的桥梁安全性和交通事故屡见不鲜，因而伸缩缝的质量直接关系到整个桥梁结构的安全和稳定性[3] [4]。目前，国内外学者对伸缩缝在冲击荷载作用下所引起的冲击振动以及动力学响应分析的研究还并不完善。然而伸缩缝在复杂物理环境下的冲击振动和动力学响应将严重影响到桥梁的稳定和行车的安全性，所以针对复杂物理环境下桥梁伸缩缝的动力学研究是十分必要的。

2. 我国桥梁伸缩缝发展状况

从上世纪 50 年代开始到 21 世纪，我国桥梁伸缩缝的发展经历了以下几个阶段[5] [6]:

在 U 型铝板上填充塑料泥是上世纪 50 年代我国从苏联预制装备化施工技术中学习的一种伸缩缝的做法。这种方法技术粗糙，夏季桥梁伸长，伸缩缝中填料被挤出，极易造成桥头跳车现象；冬季此种伸缩缝被拉长，造成漏水现象严重。U 型缝破坏现象严重，给维护工作带来极大的不便，因此在以后的工程中不宜采用。

20 世纪 60 年代，我国自行研制出矩形双孔橡胶条伸缩缝。这种橡胶伸缩缝在过去国内的应用较多，并且沿用至今。橡胶伸缩缝的设计原理是，橡胶条在使用过程中始终处于被压缩的状态。此类伸缩缝在工程上应用并不是很理想，缺点是夏季易鼓起，冬季易脱落，因此不宜继续使用在桥梁上。

板式橡胶伸缩缝是 1983 年上海市政工程研究所研究出来的一种伸缩缝的做法。此类伸缩缝目前的应用仍然不理想，桥头跳车现象依旧存在，主要原因是橡胶本身材料性质、加肋钢板布置安装等研究还不够成熟。

齿形钢板伸缩缝也称指型钢板伸缩缝或梳齿型钢板伸缩缝，是近些年发展起来的一种伸缩缝。广泛的应用于大中型桥梁中，如东北松花江大桥、湖南常德大桥等。此类伸缩缝具有伸缩量大、埋设浅、安装简单、防尘防水性能好以及行车平稳无跳车现象等优点。齿形钢板伸缩缝从构造上可分为悬臂式和支承式两种，其中支承式伸缩缝可有效阻止石子等杂物的落下，但伸缩量不宜太大，否则搭接板的长度随之增大使得整个桥面钢板的宽度增大。当桥梁伸缩量较大的时候，优先选用悬臂式伸缩缝。大量实践证

明, 齿形钢板伸缩缝也存在不少缺点, 如耗钢量大、连接的螺栓容易松动折断、加工生产时的误差变形容易造成响声、跳车甚至钢板脱落[7]。

大位移模数式伸缩缝是以热轧异型钢材和密封橡胶带为主要原料装配而成, 其结构受力合理, 传动机构较好。大位移模数式伸缩缝结构特点为由 V 型截面或其他截面形式橡胶密封带嵌接与异型边梁钢和中梁钢内组成了一个可伸缩的密封体, 异型钢梁直接承受车辆荷载而我们可以根据要求的伸缩量增加中梁钢和密封橡胶带。其主要优点为伸缩量大、伸缩变形时抗力小、使用寿命和安全系数大大提高、可以减小车辆经过伸缩缝的振动和噪音等。大位移模数式伸缩缝的主要缺点是橡胶材料易老化导致橡胶带破坏, 从而降低整个伸缩缝的工作效果。

由于齿形钢板伸缩缝在伸缩量适用范围、排水性、锚固以及防锈及防滑方面存在一些问题, 所以目前复杂物理环境下大位移桥梁中常采用的是大位移模数式桥梁伸缩缝, 利用它吸震缓冲性能好又容易做到密封的橡胶材料与强度高刚性好的异型钢材组合的特点, 来满足复杂物理环境下大位移量的需求[8]。

3. 大位移模数式伸缩缝冲击振动研究现状

3.1. 国内外研究现状

目前, 国内对伸缩缝的研究并不完善, 尤其是大位移模数式伸缩缝装置。国内比较先进的模数式伸缩缝结构是参照德国的毛勒, 日本的好耐尔, 法国的费莱辛涅的结构形式, 根据我国的特点自行研制的一种伸缩缝结构[9] [10]。但是由于超载和超负荷等问题的存在, 致使伸缩缝使用寿命降低, 强度、刚度和位移量不能满足要求。

比如, 山东公路机械厂引进美国布朗公司先进技术生产的桥梁伸缩缝——布朗缝, 将以往大位移伸缩缝中梁与支承梁的联结形式由刚性改为柔性, 大大提高了大位移模数式伸缩缝的使用寿命和安全系数[11]; 而布朗缝独有的支承系统决定了中梁和横梁可以在桥梁横向和垂向发生较大的位移, 更加适用于地震多发地带的桥梁和横向位移较大的特殊桥梁[12]。

国外对大位移模数式伸缩缝装置的研究比较全面, 其中以美国沃特森、瑞士马格巴、英国霍内尔和德国毛勒伸缩装置为主。德国的毛勒公司长期与权威科研机构紧密合作, 对大位移模数式伸缩缝进行深入研究, 生产出著名的模数式伸缩缝——毛勒缝。通过对毛勒缝的分析研究, 发现当汽车通过伸缩缝时, 轮胎对毛勒缝中梁有横向和纵向荷载, 而这些荷载通过支撑单元和弹性控制元件传递到边梁上。边梁则是结构上锚固的, 所以车荷载也就由锚固平板传递到相邻的实体建筑上了[13]。

通过上述的分析发现, 国内关于复杂物理环境下模数式伸缩缝装置的研究还比较匮乏, 而国外有关模数式伸缩缝的研究起步较早但并没有有效的运用有限元软件进行伸缩缝强度和刚度的分析, 因此有必要对模数式伸缩缝进行更深入的研究。

3.2. 大位移模数式伸缩缝动力学分析

3.2.1. 竖直方向动力学响应分析

当车辆通过伸缩缝时, 伸缩缝在竖向具有振动特性。范立础通过对大位移模数式伸缩缝研究, 得到布朗缝独有的支承系统决定了中梁和横梁可以在桥梁竖向发生较大的位移, 更加适用于地震多发地带的桥梁和横向位移较大的特殊桥梁。严情木[14]通过对伸缩缝在竖向荷载作用下动力学响应的研究, 详细阐述了伸缩缝动力学方程的建立过程和求解过程, 即通过将模型进行简化, 以线性化理论为基础, 将理论振动方程组转化成线性状态空间的形式, 从而完成对振动方程组的求解。孙正峰[15]通过对大位移桥梁伸缩缝进行竖向动力学仿真研究, 分析了车辆的荷载形式及竖向频率、弹性支承刚度随车辆激励力频率的变化以及车速、弹性支承刚度、阻尼和缝宽的变化对冲击系数的影响发现: 当车速低于 100 Km/h 时, 弹

性支承刚度取值应大于 60,000 N/mm；冲击系数随弹簧支承刚度、缝宽和阻尼的增大而减小，当车速低于 100 Km/h 时，冲击系数随车速的增大而增大。衡亚霖，王少华等[16]运用解析理论和数值分析方法对大位移桥梁伸缩缝进行竖向振动研究，得到车速与伸缩缝结构参数的变化对冲击系数与最大竖向位移的影响情况：随着缝宽的增大，冲击系数和中梁最大竖向位移的波峰沿车速轴右移；为减小最大竖向位移可限制车速，减小缝宽，增大刚度，增大中梁截面惯性矩。邓伟[17]通过对伸缩缝动力学特性研究发现：伸缩缝最大竖向位移响应随着刚度的增加而减小，随着轮压、缝宽的增大而增大；当车速大于 60 Km/h 时，伸缩缝的竖向位移随着速度的增大而增大；当车速小与 60 Km/h 时，伸缩缝竖向位移较小且与速度关系不易归纳。瑞典学者 Reoberto Crocetti 和 Bo Edlund [18]在 2003 年分析了车辆通过大位移模数式伸缩缝时的荷载形式，并对垂向荷载进行了研究。他们将车辆通过伸缩缝时作用在每根梁上的荷载用正弦函数的形式进行加载，并将伸缩缝系统简化为弹簧-阻尼系统，研究了车辆单轴通过伸缩缝时的动态位移放大系数。

3.2.2. 水平方向动力学响应分析

伸缩缝在正常工作时所受到的水平荷载主要有：车辆过缝时对中梁的水平作用力；由中梁高差产生的水平冲击作用力；中梁与横梁之间相对位移产生的摩擦力等。严情木利用有限元模拟仿真的方法，研究了伸缩缝中梁的水平振动特性发现：剪切弹簧刚度的取值会影响振动的最大幅值；剪切弹簧的阻尼是影响衰减的主要因素，在此参数下，水平方向的振动衰减效果较好。瑞典学者 Reoberto Crocetti 和 Bo Edlund 在 2003 年分析了车辆通过模数式伸缩缝时的荷载形式，分为纵向荷载、水平荷载，并指出水平荷载由制动、加速、路面坡度、滚动摩擦等造成，通过现场试验数据发现，横向荷载具有随机性的特点。孙正峰等[19] [20]通过对桥梁伸缩缝进行水平向动力学仿真分析发现：车速低于 60 Km/h 时，车轮对中梁水平冲击力很小，车速高于 100 Km/h 时，应考虑车轮对中梁的水平冲击；中梁最大水平位移随中梁弹性支承刚度及预压量、滑动摩擦系数、剪切弹簧刚度的增加而减小，从而为确定伸缩缝安装时预应力大小提供依据。吴昊[21]运用理论分析方法建立了伸缩缝水平振动方程，并运用 MATLAB 软件进行数值求解得到：预压量及滑动摩擦系数的变化对中梁最大水平位移的影响最为显著，剪切弹簧刚度次之，弹性支承刚度最小；考虑实际使用过程的方便性，伸缩缝预压量 ΔX 为 4 mm，支撑刚度不低于 60,000 N/mm。

3.2.3. 耦合动力学响应分析

在实际情况下，伸缩缝会同时受到水平荷载和垂向荷载的作用，这就需要研究伸缩缝在两个方向荷载作用下的整体振动特性。孙正峰考虑在竖向和水平荷载共同作用下，对伸缩缝进行了动力学仿真分析发现，中梁竖向振动位移与水平振动位移之间的相互影响很小，故可对伸缩缝竖向或水平向振动响应单独进行研究，以便节省时间，提高效率。吴昊利用 ABAQUS 有限元软件建立了 ZL480 伸缩缝有限元模型，研究了伸缩缝在受水平与垂向荷载共同作用时的振动特性、最大反跳位移、冲击系数以及衰减等问题发现：伸缩缝在垂向上的振动要比水平方向的剧烈，这主要是因为伸缩缝所承受的垂向荷载要比水平方向上的荷载大；剪切弹簧刚度对伸缩缝水平方向上的振动影响较大，对垂向振动影响较小；而弹性支承刚度对伸缩缝水平方向上的振动影响较小，对垂向振动影响较大。吴延平等[22]对车辆通过伸缩缝处的耦合振动分析发现：当车速增加到一定程度时，其对经过伸缩缝时的冲击影响是有限的，而主要表现影响整个车桥的耦合振动过程，当车速由 10 Km/h 增加到 40 Km/h 时，冲击加速度峰值由 0.47 m/s^2 增加到 0.84 m/s^2 。谢旭[23]等采用车桥耦合振动算法对伸缩缝跳车响应进行了数值模拟并通过实测进行对比分析发现，由于车辆经过伸缩缝时产生较大的冲击效应，对于一些桥梁特别是钢桥，有必要进行相应的减振设计。荷兰学者 B. Zuada Coelho, A.H.J.M. Vervuurt, W.H.A. Peelen [24]通过对 Martinus Nijhoff 大桥模数

式伸缩缝动力学性能的研究发现,中梁与横梁的响应取决于支撑装置的有效性,当横梁的滑动支撑去掉时,中梁的动态响应发生改变,并对中梁的线应变以及固有频率产生影响。

3.3. 伸缩缝的减振和降低噪声

车辆通过桥梁时引起的结构振动主要分为两类:车辆通过伸缩缝时的冲击振动和一般路面条件下车辆荷载作用下的桥梁振动。车辆通过伸缩缝时,所产生的冲击作用振动幅度大频率高,但维持时间短,而在一般路面下车辆动荷载作用相对稳定,其引起的振动频率低幅值相对较小但持续时间长。桥梁伸缩缝结构的振动特性将直接影响桥梁结构的安全度和行车的舒适度,所以针对车辆通过伸缩缝时的减振和降低噪声的研究是我们的重点。

吴昊通过对模数式伸缩缝进行抗震性分析发现,改变伸缩缝的剪切弹簧刚度及弹性支承刚度等参数对整个伸缩缝在地震作用下的振动影响很小,这主要是因为伸缩缝垂向、横向顺桥向刚度相对于桥梁来说很小,桥梁运动决定了伸缩缝的位移,伸缩缝的响应主要受桥梁振动的控制。吴延平、谢旭等采用小波变换法研究了车辆通过伸缩缝时的时频域振动特性,并分析了在该类振动下桥梁的减振效果。吴冬雁[25]通过对车辆通过伸缩缝时的冲击荷载及桥梁结构振动特性的研究,提出在一般路面条件下,加大结构本身的刚度对减振效果不明显,而提高路面平顺度对这类结构减振效果显著,当考虑伸缩缝冲击效应时,在主桥梁端处填筑一定长度的混凝土能一定程度上减小车辆通过伸缩缝时的冲击效应。李爱群[26]通过对大位移模数式伸缩缝研究得到当车轮压过 80 min 的缝隙上时,并没有明显振动增加,但是为了保证通行的安全舒适,需要保证伸缩缝表面与路面齐平。Ravshanovich [27]在 2007 年指出,噪声是由于相邻的两个中梁和车轮之间形成了一个空间,车辆通过伸缩缝时空气在这个空间回荡,产生噪声。2006 年 Ancich [28]以模数式伸缩缝为对象,研究了伸缩缝的噪声传播问题以及伸缩缝冲击振动特性。Crocetti 等[29]在 2003 年对模数式伸缩缝在车辆冲击荷载作用下的疲劳问题进行了研究。Aso [30]等在 2000 年对车辆通过伸缩缝装置时桥梁结构辐射的噪音声压进行了实测分析,记录了伸缩缝位置在车辆冲击振动下的实测资料,但是数据分析采用稳态响应振动理论,并没有从响应中分离出噪声的发生源。2004 年 Steenbergen [31]研究了薄型伸缩缝在车辆荷载作用下的振动特性及伸缩缝的动力放大系数。王善林[32]通过对大位移模数式伸缩缝研究得到,对位移量和转角要求较大的伸缩装置,应考虑采用降噪伸缩装置,该类伸缩装置结构复杂、造价高,但能适应的位移量和转角大,性能可靠,是大型城市桥梁伸缩装置的较好选择。

3.4. 伸缩缝的抗震分析

我国是世界上地震灾害最多的国家之一,并且地震是造成人员伤亡最多的自然灾害,具有直接灾害强、二次伤害频繁等特点。对于大跨度桥梁结构来说,在地震力的作用下,伸缩缝装置的振动容易导致主梁梁端混凝土的破碎和伸缩缝装置的破坏,因而伸缩缝装置抗震特性的研究具有重要意义。

吴昊通过对模数式伸缩缝进行抗震性分析发现,改变伸缩缝的剪切弹簧刚度及弹性支承刚度等参数对整个伸缩缝在地震作用下的振动影响很小,这主要是因为伸缩缝垂向、横向顺桥向刚度相对于桥梁来说很小,桥梁运动决定了伸缩缝的位移,伸缩缝的响应主要受桥梁振动的控制。邓育林[33]等通过对强震作用下大跨斜拉桥梁伸缩缝处碰撞效应的研究发现:由于大跨桥梁主、引桥结构体系不同,结构动力学特性相差很大,在强震作用下伸缩缝处主、引桥相邻梁体易发生碰撞。Reginald Des Roches [34]对纵向地震作用下桥梁伸缩缝处双边碰撞效应的研究发现,双边碰撞减小较柔框架的位移,增大较刚框架的位移。王军文[35]等对非规则梁桥在地震作用下伸缩缝处的碰撞现象的研究发现,为保证桥梁刚度和质量的平衡,应优先考虑采用等跨径等墩高的结构形式,尽可能地满足相邻两联的周期比大于 0.7,从而有效地减小伸缩缝处梁体的相对位移,减小落梁及相邻梁体碰撞的可能。

4. 总结与展望

综合分析前人对大位移模数式伸缩缝的研究发现,相对而言我国学者对伸缩缝的研究起步较晚,而且大多数的研究集中在伸缩缝的施工工艺方面,但近些年国内有些学者针对模数式伸缩缝的动力学响应进行了一系列详细的研究,并且在减振和降低噪声方面也取得了一定的研究成果。但是前人对伸缩缝的动力学研究是建立在普通环境下的钢筋混凝土桥梁上的,并没有考虑复杂的物理环境对伸缩缝动力学响应的影响。

通过总结分析前人的研究成果,针对目前研究中存在的问题,提出以下几点展望:

(1) 随着我国大跨度桥梁的发展,复杂物理环境下大跨度桥梁的数量也不断增加,而国内外关于复杂物理环境下桥梁伸缩缝动力学响应的相关研究还很少,因此这将是今后一个重要的研究方向。

(2) 在关于伸缩缝水平方向动力学响应的研究中,仅仅推导了水平方向振动方程,需要进一步解决当考虑摩擦阻力和中梁位移箱翻转时的问题。

(3) 对车辆通过伸缩缝时冲击振动的研究还比较欠缺,需要对车辆和伸缩缝的耦合动力学响应进行更深入的研究,并进一步分析车辆通过伸缩缝时的减振和降低噪声措施。

(4) 大多数的研究结果是基于有限元软件模拟的,同时还要在后期的研究中开展相关实验,并将二者结果进行对比分析,以便得到更加精确可靠的结论。

基金项目

西南石油大学土木工程与建筑学院科技创新项目。

参考文献 (References)

- [1] 赵衡平. 现代桥梁伸缩装置. 北京: 人民交通出版社, 2008: 1-5.
- [2] 李阳海, 程海洋, 鲍卫刚, 郑学珍. 公路桥梁伸缩装置实用手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 1-68.
- [3] 王东霞. 浅析桥梁伸缩缝质量病害的产生原因及防治[J]. 建筑科学, 2010, 10(5): 66-67.
- [4] 何青峰, 王学良. 浅谈模数式桥梁伸缩缝更换改造安装工艺[J]. 华东公路, 2005, 153(3): 80-82.
- [5] 李福生. 桥梁伸缩缝的现状和发展[J]. 市政技术, 1987(4): 27-33.
- [6] 刘德琛. 桥梁伸缩装置的应用与发展[J]. 公路, 1992, 12(3): 21-28.
- [7] 朱森, 等. 梳齿形和模数式伸缩缝性能特点对比分析[J]. 民营科技, 2015(9): 137.
- [8] 刘杰盛. 高性能伸缩缝密封材料的制备、性能及应用研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2010: 2-12.
- [9] 崔恒来. 桥梁伸缩缝施工及养护技术分析[J]. 科技与企业, 2012, 15(9): 151-152.
- [10] 王建辉, 张翔, 张利忠. 公路桥梁伸缩缝对桥梁的影响[J]. 民营科技, 2012(12): 318-319.
- [11] Strasky, J. (2010) Stress-Ribbon Pedestrian Bridges Supported by Arches. American Concrete Institute, 29-33.
- [12] 范立础, 王志强. 桥梁减震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [13] 严情木. 大位移桥梁伸缩缝动力学分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [14] 严情木, 王少华. 大位移桥梁伸缩缝的垂向动力学响应研究[J]. 机械设计与制造, 2013, 7(4): 41-43.
- [15] 孙正峰, 王少华, 李冰, 吴昊, 杨刚. 基于 ABAQUS 的大位移桥梁伸缩缝垂向动力学分析[J]. 机械强度, 2014, 36(2): 228-236.
- [16] 衡亚霖, 王少华, 等. 大位移伸缩缝桥梁垂向振动理论研究[J]. 机械设计与制造, 2014(11): 39-42.
- [17] 邓伟. 车轮——桥梁伸缩缝系统动力学特性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [18] Crocetti, R. and Edlund, B. (2003) Fatigue Performance of Modular Bridge Expansion Joints. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 17, 167-176. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2003\)17:4\(167\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2003)17:4(167))
- [19] 孙正峰, 王少华, 李冰, 吴昊, 杨刚. 模数式桥梁伸缩缝水平向动力学响应分析[J]. 公路工程, 2014, 39(3): 25-28.

- [20] 孙正峰. 大位移桥梁伸缩缝动力特性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [21] 吴昊. 大位移桥梁伸缩装置动力学分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [22] 吴延平, 吴冬雁, 谢旭, 张鹤. 车辆通过钢箱桥梁伸缩缝的振动及减振[J]. 噪声与振动控制, 2013(2): 95-100.
- [23] 谢旭, 吴冬雁, 王建峰, 张世琦, 周永杰. 伸缩缝车辆冲击引起的钢箱桥梁振动特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(10): 1923-1930.
- [24] Zuada Coelho, B., Vervuurt, A.H.J.M., Peelen, W.H.A. and Leendertz, J.S. (2013) Dynamics of Modular Expansion Joints: The Martinus Nijhoff Bridge. *Engineering Structure*, **48**, 144-154.
- [25] 吴冬雁. 考虑荷载随机性影响的桥梁振动及噪声环境研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [26] 李爱群. 工程结构减振控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [27] Ravshanovich, K.A., et al. (2007) Mechanism of Noise Generation from a Modular Expansion Joint under Vehicle Passage. *Engineering Structures*, **29**, 2206-2218.
- [28] Ancich, E.J., Chirgwin, G.J. and Brown, S. (2006) Dynamic Anomalies in a Modular Bridge Expansion Joint. *Journal of Bridge Engineering*, **11**, 541-554. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2006\)11:5\(541\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2006)11:5(541))
- [29] Crocettir, C. and Edlund, B. (2003) Fatigue Performance of Modular Bridge Expansion Joints. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **17**, 167-176. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2003\)17:4\(167\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2003)17:4(167))
- [30] Aso, T., Aida, T., Hironaka, M., et al. (2000) A Study of a Sound Radiated by the Bridge Expansion Joint. *Research Report of Faculty of Engineering, University of Yamaguchi*, **51**, 33-39.
- [31] Steenberg, M. (2004) Dynamic Response of Expansion Joints to Traffic Loading. *Engineering Structures*, **26**, 1677-1690.
- [32] 王善林. 城市桥梁伸缩缝设置要求及选择研究[J]. 城市建设理论, 2014(35): 1-3.
- [33] 邓育林, 彭天波, 李建中. 强震作用下大跨斜拉桥伸缩缝处碰撞效应的影响研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(6): 26-30.
- [34] Reginald, D. and Susendar, M. (2002) Effect of Pounding and Restraints on Seismic Response of Multiple-Frame Bridges. *Journal of Structural Engineering*, **128**, 860-869.
- [35] 王军文, 李建中, 范立础. 非规则桥梁伸缩缝处的碰撞对地震反应的影响[J]. 土木工程学报, 2006, 39(1): 54-59.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ojav@hanspub.org