

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.01.019

## 基于有限元分析的模数式伸缩缝振动噪声研究

李瑞琪<sup>1</sup>, 宋晓东<sup>2</sup>, 陈素华<sup>2</sup>, 丁如珍<sup>1</sup>, 费 梁<sup>1</sup>, 戴世宏<sup>1</sup>

(1. 东南大学建筑设计研究院有限公司, 南京 210096; 2. 东南大学交通学院, 南京 210096)

**摘要:** 模数式伸缩缝 (Modular bridge expansion joints, MBEJs) 作为一种常见的桥梁伸缩缝形式, 目前被广泛应用于各类桥梁工程, 其在解决通行问题的同时也带来了伸缩缝振动噪声污染问题, 严重影响城市居民的生活质量。本文以 MBEJs 为研究对象, 基于有限元分析 (Finite element analysis, FEA) 方法分析了伸缩缝的振动特性和噪声特性, 研究了模数式伸缩缝一阶竖向模态的影响因素以及多阶振动模态的变化规律, 同时在声学模拟软件中建立伸缩缝-空腔联合无限元模型, 进行声学频响分析, 并对伸缩缝空腔进行声模态分析, 探讨伸缩缝噪声的产生和传播机制。研究结果表明: 伸缩缝的车致振动噪声是由伸缩缝竖向振动激励和空腔声模态激励共同耦合作用产生的, 对伸缩缝下部空腔进行填塞与封闭可以降低伸缩缝噪声影响。

**关键词:** 模数式伸缩缝; 振动噪声; 有限元分析; 声学频响; 声模态

中图分类号: U443.31

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)01-0186-09

### Investigation on Vibration Noise of Modular Bridge Expansion Joints Based on FEA

LI Ruiqi<sup>1</sup>, SONG Xiaodong<sup>2</sup>, CHEN Suhua<sup>2</sup>, DING Ruzhen<sup>1</sup>, FEI Liang<sup>1</sup>, DAI Shihong<sup>1</sup>

(1. Architects & Engineers Co., Ltd. of Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Modular bridge expansion joints (MBEJs) is a common form of bridge expansion. So far, it is widely used by different kinds of bridges. However, the noise of joints under vehicle load is still a problem, which seriously influence the life quality of surrounding residents. The paper takes MBEJs as the research object to study the vibration characteristics and noise characteristics of the expansion joints. Several finite element analyses (FEA) are conducted to study the influencing factors of the first-order vertical mode and the variation laws of multiple modes of MBEJs. Besides, analyses for the acoustic frequency responses of joint-cavity system and the acoustic modal responses of the cavity are conducted by using the numerical simulation method. The above results are compared to study the generation and transmission mechanisms for noise of joints under vehicle load. The results show that noise of MBEJs is caused by coupling action of vehicle-induced vibration excitation and cavity acoustic mode excitation. The noise can be reduced by packing and sealing the lower cavity of expansion joint.

**Key words:** modular bridge expansion joints (MBEJs); vibration noise; finite element analysis (FEA); acoustic frequency responses; acoustic modals

桥梁伸缩缝是桥梁结构的重要构件之一, 用于适应桥面的变形要求, 同时保证车辆安全平稳地通

过接缝位置。模数式伸缩缝 (Modular bridge expansion joints, MBEJs) 作为一种常见的桥梁伸缩

**基金项目:** 国家自然科学基金 (52378287)。

**收稿日期:** 2024-08-17; **修订日期:** 2025-01-23

**通信作者:** 李瑞琪, 女, 工程师, E-mail: 827788939@qq.com。

**引用格式:** 李瑞琪, 宋晓东, 陈素华, 等. 基于有限元分析的模数式伸缩缝振动噪声研究 [J]. 南京航空航天大学学报 (自然科学版), 2025, 57(1): 186-194. LI Ruiqi, SONG Xiaodong, CHEN Suhua, et al. Investigation on vibration noise of modular bridge expansion joints based on FEA [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(1): 186-194.

缝形式,目前被广泛应用于各类桥梁工程,其在解决通行问题的同时也带来了一种常见的桥梁伸缩缝类型。随着中国桥梁建设规模的扩大及建设数量增加,模数式伸缩缝在各类桥梁建设特别是大跨桥梁建设中得到了广泛的应用。与此同时,此类伸缩装置在汽车荷载下的振动噪声问题也逐渐引起关注,噪声问题严重影响着桥梁的耐久性、行车舒适性以及周边居民区的生活质量。噪声的根源在于振动,降噪研究的本质是伸缩缝车致振动分析及振动噪声原理研究。

国内外有关模数式伸缩缝的车致振动问题研究较为成熟。荷兰学者 Steenbergen 于 2004 年对桥梁伸缩缝车辆荷载动力特性进行了分析,采用建立数学模型及数值解析的方法分析了毛勒伸缩缝单根中梁在竖向车辆荷载作用下的动力响应、频率响应和动力放大系数取值范围,以及伸缩缝性能参数对动力特性的影响<sup>[1]</sup>。Coelho 于 2013 年对马丁努霍夫大桥的伸缩缝进行了现场试验,记录伸缩缝振动响应,并与数值计算结果进行对比<sup>[2]</sup>。西南交通大学吴昊等基于 ABAQUS 和 MATLAB 的模数式伸缩缝动力特性研究,使用有限元分析(Finite element analysis, FEA)方法研究了伸缩缝动力特性,提出了模数式伸缩缝的减振优化方案<sup>[3-5]</sup>。

相比较为成熟的模数式伸缩缝车致振动研究,模数式伸缩缝振动噪声研究仍处于起步阶段。Ghimire 等<sup>[6]</sup>在 2009 年进行数值分析研究,使用有限元-边界元联合分析方法模拟了模数式伸缩缝噪声的产生及传播过程。Ravshanovich 等<sup>[7]</sup>于 2007 年针对模数式伸缩缝振动噪声机制进行了足尺模型试验,建立一个包含伸缩缝和空腔的足尺模型,在汽车以不同车速通过该伸缩缝时,记录场点声压值以及支承梁动力响应变化,从而研究模数式伸缩缝的噪声与振动特性。Marriner 和 Wakefield<sup>[8]</sup>于 2016 年基于温哥华地区桥梁的噪声实测数据进行了行车过程中模数式伸缩缝振动噪声原理研究。Reinhall 等<sup>[9-10]</sup>于 2022 年开展了一系列模块式伸缩缝降噪研究。

国内有关伸缩缝降噪相关研究主要集中在各类降噪伸缩缝产品研发,而有关伸缩缝振动噪声原理的研究较为欠缺。降噪伸缩缝产品种类多样,涵盖模数式伸缩缝、梳齿板伸缩缝以及无缝式伸缩缝,不同种类的降噪伸缩缝也为研究伸缩缝噪声机制提供了大量数据支持<sup>[11-14]</sup>。

基于以上研究现状,本文以 D320 型号(最大伸缩量 320 mm)的模数式伸缩缝为研究对象,进行伸缩缝振动机制和噪声机制的分析,研究模数式伸缩缝一阶竖向模态的影响因素以及多阶振动模态的

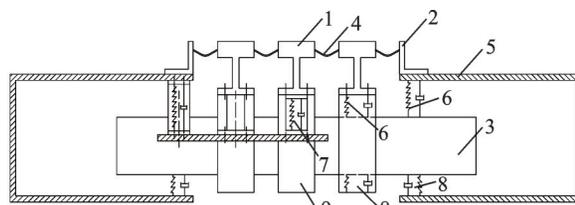
变化规律。同时,基于声学模型进行声学频响分析和声模态分析,探讨伸缩缝噪声的产生和传播机制,并据此提出具有可行性和新型的减振降噪措施。

## 1 模数式伸缩缝

模数式伸缩缝主要由边梁、中梁、横梁、锚箱、竖向支承弹簧(滑动支承弹簧及压紧支承弹簧)、水平剪切弹簧、止水橡胶条等构件组成,可划分为支承、位移、锚固和密封 4 个主要系统。汽车通过伸缩缝时,中梁直接承受车轮荷载并向下传递给支承横梁,再通过横梁两端的支承弹簧传递给锚箱及桥体结构。伸缩缝变位是通过水平弹簧和竖向支承弹簧协调作用实现的。当伸缩缝由于温度作用或车辆制动作用发生宽度改变,中梁通过滑动支承弹簧在横梁上左右滑动,同时横梁在支承箱内滑进或滑出,以实现变位,水平剪切弹簧控制各中梁间隙均匀变化。

模数式伸缩缝的竖向支承弹簧分为以下两种:(1)压紧支承弹簧,连接中梁与横梁;(2)滑动支承弹簧,连接横梁与下部锚箱。弹簧竖向刚度变化范围 20 000~100 000 N/mm,阻尼系数变化范围 0.5~12 N·s/mm<sup>[4]</sup>。

D320 模数式伸缩缝由 3 条中梁、2 条边梁和 8 条横梁组成,中梁间隙变化范围 0~80 mm,总伸缩量 320 mm,横梁间距 1.5 m。D320 模数式伸缩缝立面构造及平面构造分别如图 1、2 所示。



1:中梁; 2:边梁; 3:横梁; 4:橡胶止水带; 5:钢锚箱;  
6:橡胶压紧支承弹簧; 7:水平剪切弹簧;  
8:橡胶滑动支承弹簧; 9:连接托架

图 1 D320 模数式伸缩缝立面构造图

Fig.1 Facade structure diagram of D320 MBEJ

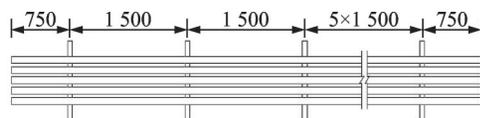


图 2 D320 模数式伸缩缝平面构造图

Fig.2 Plan structure diagram of D320 MBEJ

## 2 伸缩缝一阶竖向模态影响因素

以 D320 伸缩缝为研究对象,在分析软件中建立三维实体有限元模型。中梁间隙 0~80 mm,边梁、中梁、横梁等构件利用 3D 实体单元模拟,材料采用 Q355NHD 焊接耐候钢,弹性模量  $2.09 \times$

$10^5$  MPa, 剪切模量为  $8 \times 10^4$  MPa, 泊松比 0.25, 密度  $7.8 \times 10 \text{ kg/m}^3$ 。

连接中梁与横梁、横梁与下部锚箱的竖向支承弹簧均采用能同时反应支承刚度和阻尼特性的 3D 弹簧单元模拟。

伸缩缝实体有限元模型中边界条件设置如下: 边梁单元 6 个自由度全部固结; 滑动支承弹簧下端面 6 个自由度全部固结; 滑动支承弹簧仅设置竖向刚度, 其余 5 个方向设为固定; 压紧支承弹簧仅设置竖向刚度, 其余 5 个方向设为固定。D320 伸缩缝实体有限元模型的立面视角及三维视角分别如图 3、4 所示。

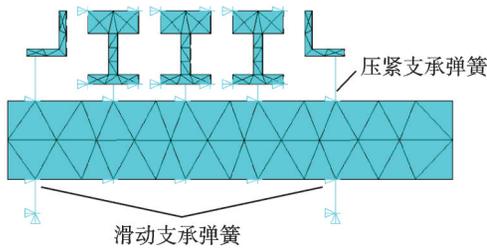


图 3 D320 伸缩缝实体有限元模型(立面视角)

Fig.3 Solid finite element model of D320 MBEJ in facade perspective

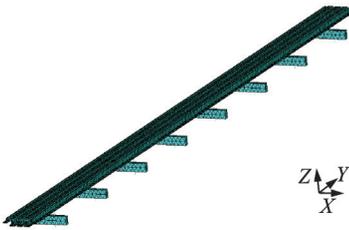


图 4 D320 伸缩缝实体有限元模型(三维视角)

Fig.4 Solid finite element model of D320 MBEJ in 3D perspective

不同中梁间隙、不同支承弹簧刚度的 D320 模数式伸缩缝一阶竖向振动频率及一阶竖向振型参与质量系数对比如表 1 所示。

对比上述模态分析结果, 一阶竖向模态在竖向的振型参与质量系数远远大于其他阶模态在竖向

表 1 一阶竖向振动频率及一阶竖向振型参与质量系数对比  
Table 1 Comparison of the first-order vertical vibration frequency and the first-order vertical mode participation mass coefficient

中梁间隙/ mm	支承弹簧刚度/( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )					Hz
	20 000	40 000	60 000	80 000	100 000	
0	60.8	84.8	102.5	116.8	128.9	
20	60.5	84.4	102.0	116.2	128.2	
40	60.5	84.4	101.9	116.0	127.9	
60	60.5	84.3	101.7	115.8	127.7	
80	60.4	84.2	101.6	115.6	127.3	
一阶竖向振型 参与质量/%	87	83	80	77	75	

的振型参与质量系数的总和, 通常达到 75% 以上, 因此可以判断, 一阶竖向振型是影响伸缩缝竖向动力特性的最主要振型。

上述模态分析结果表明伸缩缝一阶竖向振频与中梁间隙无关, 与支承弹簧的刚度有关。伸缩缝的一阶竖向振频随支承弹簧刚度增加而增加。

### 3 伸缩缝多阶振动模态变化规律

本节分析模型中伸缩缝竖向支承弹簧刚度取值  $60\ 000 \text{ N/mm}$ , 阻尼系数取值  $6 \text{ N} \cdot \text{s/mm}$ , 中梁间隙  $40 \text{ mm}$ 。根据文献[7]可知, 由中梁振动导致的伸缩缝噪声主频段一般在  $400 \text{ Hz}$  以下, 因此本节主要关注振频  $400 \text{ Hz}$  以内的伸缩缝振动模态分析结果。

根据伸缩缝振型特点, 振频在  $1 \sim 400 \text{ Hz}$  的振动模态可分为 4 个阶段, 如表 2 所示。阶段 1: 前 22 阶振型以支承弹簧竖向变形引起的中梁整体竖弹或低阶竖向弯曲为主, 频率变化范围较大, 振频与支承弹簧刚度正向相关。阶段 2: 23 阶到 40 阶振型以中梁的局部水平向弯曲与横梁的上下振动为主, 频率变化范围较小, 振型分布密集。阶段 3: 41 阶振型到 45 阶振型以中梁的竖弯和竖扭为主, 41 阶频率  $253.1 \text{ Hz}$ , 45 阶振型频率  $258.6 \text{ Hz}$ 。阶段 4: 46 阶振型到 54 阶振型以中梁高阶竖弯为主, 46 阶频率  $333.5 \text{ Hz}$ , 45 阶振型频率  $397.4 \text{ Hz}$ 。第 2、3、4 阶段振频与支承弹簧刚度关联不大。4 个阶段的典型振型如图 5~8 所示。

表 2 D320 伸缩缝振型分析结果

Table 2 Modal analysis results of D320 MBEJ

振型	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
振型特点	中梁竖弹及竖弯	中梁水平弯曲	中梁竖弯及扭转	中梁高阶竖弯
阶数范围	1~22	23~40	41~45	46~54
频率范围/ Hz	102.5~ 229.0	238.6~ 251.9	253.1~ 258.6	333.4~ 397.4

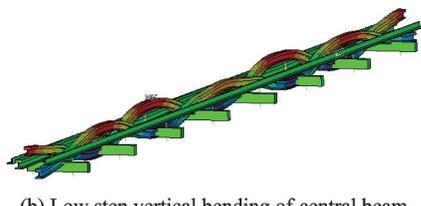
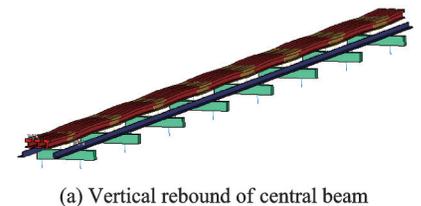


图 5 阶段 1 典型振型示意图

Fig.5 Typical model shape for Stage 1

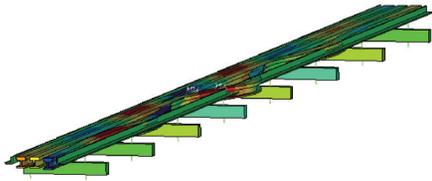


图 6 阶段 2 典型振型示意图

Fig.6 Typical model shape for Stage 2

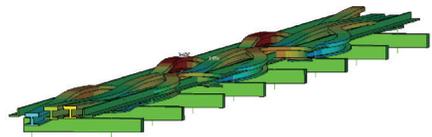


图 7 阶段 3 典型振型示意图

Fig.7 Typical model shape for Stage 3

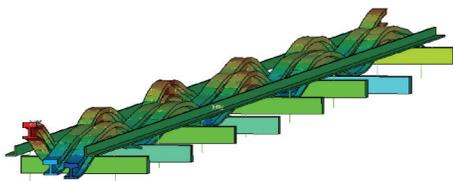


图 8 阶段 4 典型振型示意图

Fig.8 Typical model shape for Stage 4

### 4 伸缩缝谐响应分析

结构的振动噪声由结构在荷载时程作用下的瞬态响应激励而产生,本文采用结构在简谐波荷载下的谐响应替代瞬态响应作为振动激励,这种荷载替代将导致分析结果出现一定的误差,但是依然可以反映基本的伸缩缝动力学特性和伸缩缝-空腔联合体的声学特性。

本节有限元分析模型参数取值与本文第 3 节伸缩缝多阶模态分析模型保持一致,竖向支承弹簧刚度取值 60 000 N/mm,阻尼系数取值 6 N·s/mm,中梁间隙 40 mm。

结合文献[7]及伸缩缝多阶模态分析结果,简谐波荷载频率变化范围可取为 1~400 Hz,荷载峰值及荷载作用位置则与伸缩缝所受车辆荷载相关。本节分析模型中伸缩缝装置顶面的竖向荷载取《公路桥涵设计通用规范 JTG D60—2015》中规定的车辆后轴重力标准值 140 kN<sup>[15]</sup>,单侧轮胎处作用力为 70 kN。车轮横向轮距 1.8 m,当双轮中有一轮作用于两横梁正中位置的中梁上时,为车辆荷载的最不利布置,如图 9 所示,简谐波荷载的 2 个作用点分别距离横梁 0.75 m 与 1.05 m,分别命名为荷载作用点 1 和荷载作用点 2。两个作用点同步加载,均作用于最中间一根中梁,单个作用点处竖向荷载峰值 70 kN,频率变化范围 1~400 Hz。

谐响应分析得到跨中位置荷载作用点 1 的竖

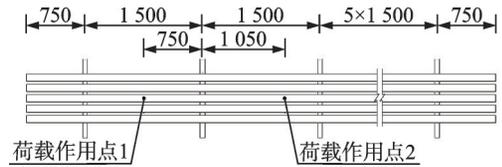


图 9 MBEJs 简谐波荷载作用点示意图

Fig.9 Action points of simple harmonic load on MBEJs

向位移结果如图 10 所示,与伸缩缝多阶模态分析结果对比可得,竖向简谐波荷载作用下位移出现峰值的频率位置与伸缩缝竖向振动的主要振频基本符合。第一峰值出现在第一阶竖向振频 100 Hz 附近;第二峰值出现在与前几阶相距较紧密的自振频率位置;第三峰值频率在 345 Hz 附近,对应伸缩缝第 4 阶段的高阶竖弯振型。

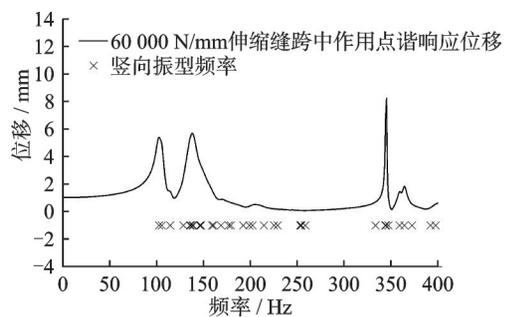


图 10 谐响应分析所得跨中荷载作用点竖向位移

Fig.10 Vertical displacement of mid-span action point by harmonic analysis

### 5 伸缩缝下部空腔声模态分析

伸缩缝下部空腔尺寸如图 11 所示,两侧主梁高 3 m,支承高度 0.3 m,中梁间隙 40 mm 时伸缩缝宽 0.43 m。在声学分析软件中建立伸缩缝下部空腔的三维有限元模型(图 12),计算声模态,前 10 阶声模态结果如图 13 所示。分析声模态结果可知,随着模态阶数升高,模态趋于复杂,空腔第一次出现竖向声模态对应频率 41.7 Hz。

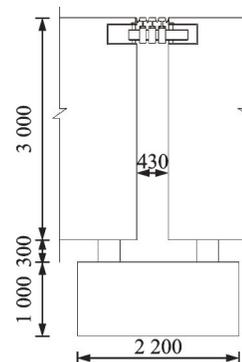


图 11 伸缩缝下部空腔尺寸示意图

Fig.11 Schematic diagram of dimensions for the cavity under MBEJs

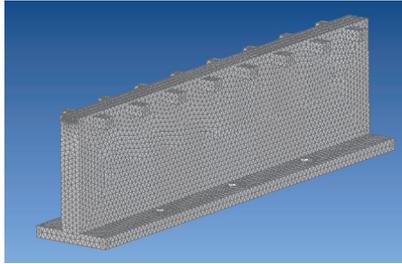


图 12 空腔声学有限元模型

Fig.12 Acoustic finite element model of the cavity under MBEJs

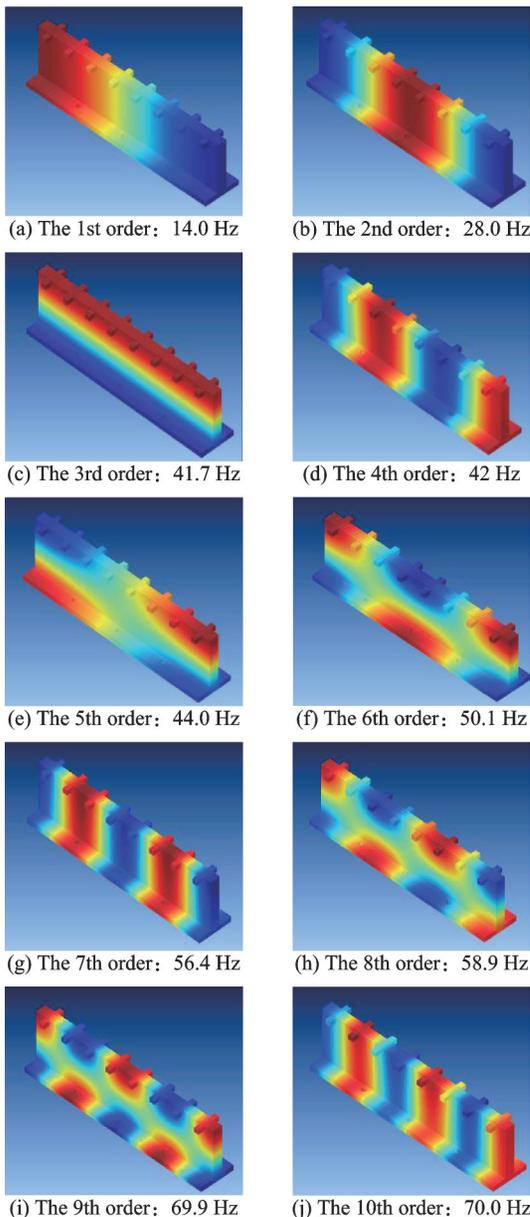


图 13 空腔声模态分析结果

Fig.13 Analysis results of acoustic modals of the cavity under MBEJs

### 6 伸缩缝-空腔联合模型声频响分析

在声学分析软件中建立伸缩缝-空腔联合声无限元分析模型(图 14),考虑伸缩缝两侧各 10 m 范围内的梁体结构影响,有限元/无限元界面选用直

径 36 m 的球面,满足声源到界面的距离大于声源尺度的要求。伸缩缝及两侧梁体布置如图 15 所示。

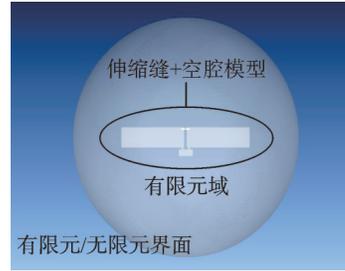


图 14 伸缩缝-空腔联合声无限元模型

Fig.14 Acoustic infinite element model of the joint-cavity system

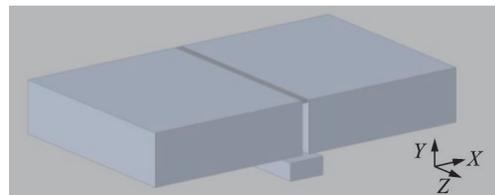


图 15 伸缩缝及两侧梁体布置示意图

Fig.15 Arrangement of MBEJ on beams

将本文第 4 节所述的伸缩缝在简谐波荷载下的简谐激励输入联合模型进行声学频响分析,得到简谐荷载激励作用下声辐射功率级频谱图(图 16)。

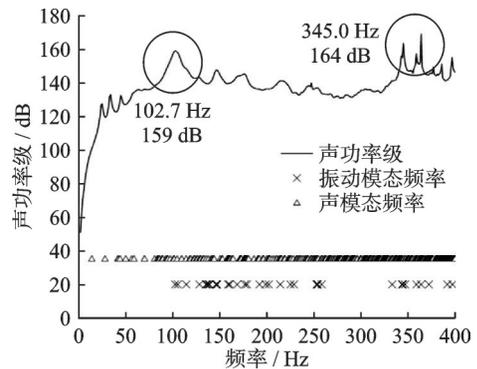


图 16 伸缩缝-空腔联合模型声功率级频谱图

Fig.16 Spectrum analysis of sound power level for the joint-cavity system

对比声功率级频谱峰值位置与伸缩缝竖向振动模态频率、空腔声模态频率之间的关系可知,当施加的简谐荷载频率小于伸缩缝结构一阶竖向振频(102.5 Hz),声功率级峰值频率与空腔声模态频率相吻合,第一峰值频率 14 Hz,第二峰值频率 28 Hz,第三峰值频率 42 Hz 左右;当施加的简谐荷载频率大于伸缩缝结构一阶竖向振频(102.5 Hz),声功率级峰值频率与竖向振频集中区域相吻合。模数式伸缩缝在车辆荷载作用下的振动噪声是由伸缩缝竖向振频和空腔声模态频率两部分组成,其中,低频段主要与声模态频率有关,高频段主要与

伸缩缝竖向振频有关。

伸缩缝-空腔联合模型在峰值频率 24.9、44.9、100.0、345.0 Hz 激励作用下的声压级云图(正视图及侧剖图)如图 17 所示。分析可知,声压级分布云图随着激励频率的增加而趋于复杂。另外,空腔内的声压远高于空腔外声压,从空腔两端开口以及支座间隙向外部迅速衰减。

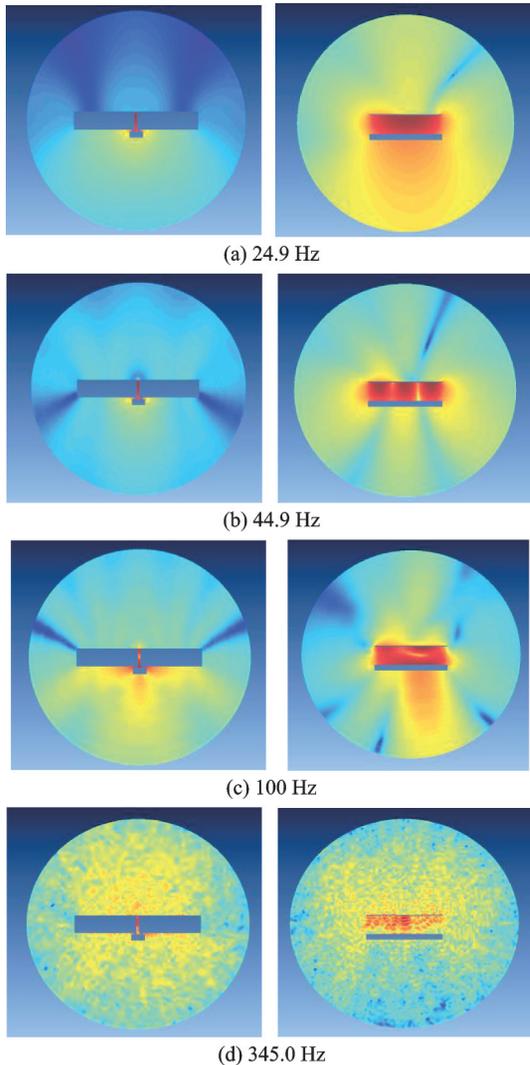


图 17 伸缩缝-空腔联合模型声压级云图

Fig.17 Cloud maps for sound pressure level of the joint-cavity system

由以上分析可以推断,模数式伸缩缝车致振动噪声是由车致振动激励与空腔声模态激励耦合作用产生,振动噪声由空腔两侧开口向外辐射。

### 7 空腔对联合模型声学特性影响分析

为了进一步研究空腔存在对声辐射特性的影响,建立无空腔仅存在伸缩缝的声无限元模型,如图 18 所示。伸缩缝构造详见图 9、11,该模型与存在空腔的声无限元模型中伸缩缝位置一致,仅撤除两侧梁体及下部桥墩盖梁。

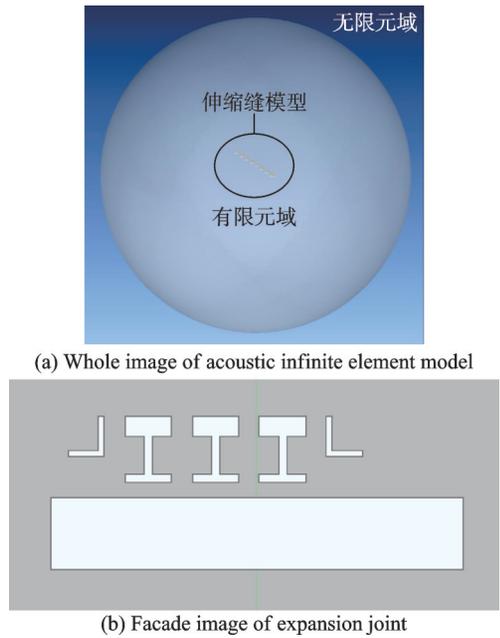


图 18 无空腔伸缩缝声无限元模型

Fig.18 Acoustic infinite element model of the joint system without cavity

模数式伸缩缝无空腔模型在频率 44.9 和 100 Hz 下的声压级云图(正视图及侧剖图)如图 19 所示。对比有空腔模型(图 17)和无空腔模型(图 19)在相同激励频率下的声压级云图,可以发现无空腔模型的声压级分布云图在伸缩缝中梁附近数值最大,以中梁振动点为中心向外辐射衰减,不同于有空腔模型的声压级在空腔内最大的分布特性。此外,有空腔模型与无空腔模型声功率级频谱对比如图 20 所示。

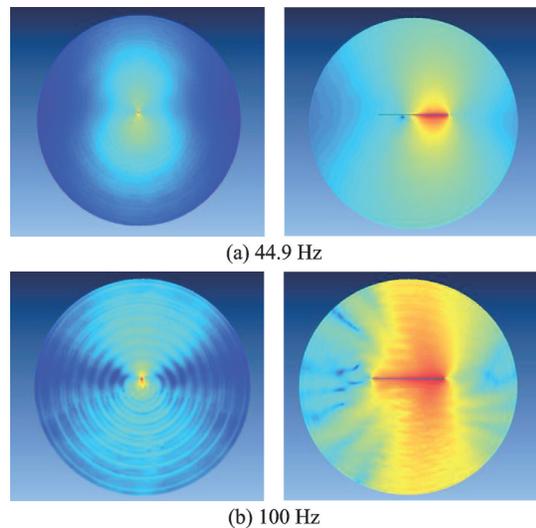


图 19 无空腔伸缩缝模型声压级云图

Fig.19 Cloud maps for sound pressure level of the joint system without cavity

由图 20 可知,当荷载频率小于 60 Hz 时,无空腔模型声功率级频谱曲线相比有空腔模型的频谱曲线缺失了 3 个峰值;当荷载频率小于 250 Hz 时,

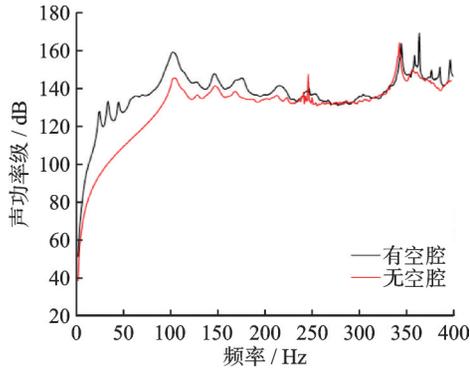


图 20 有空腔模型与无空腔模型声功率级频谱对比

Fig.20 Comparison of the spectrum analysis of sound power level between the joint-cavity system and the joint system without cavity

同一频率简谐荷载作用下,有空腔模型声功率级大于无空腔模型声功率级,以上变化都是因为无空腔模型相比有空腔模型缺失了空腔声模态的激励作用,从而导致的峰值频率缺失和声功率级减小。

有空腔模型与无空腔模型声功率级频谱差值如图 21 所示。在分析频率小于 100 Hz 的频段内,两种模型的声功率级差值比较大,最大可达 33.6 dB,而当分析频率取伸缩缝一阶竖向频率 102.7 Hz 时,声功率级差值为 14 dB,由此推断空腔声模态激励作用对低频段噪音影响比较大。当荷载频率大于 250 Hz 小于 350 Hz 时,有空腔模型与无空腔模型声功率级比较接近;当荷载频率大于 350 Hz 时,声功率谱波动性比较大。

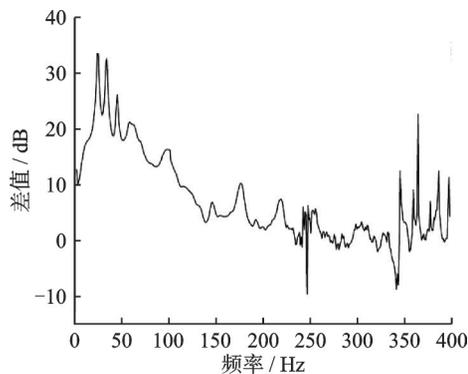


图 21 有空腔模型与无空腔模型声功率级频谱差值

Fig.21 Difference of the spectrum analysis of sound power level between the joint-cavity system and the joint system without cavity

选取 3 处代表性场点(图 22),坐标单位均为米。A 点:场点坐标(0,0,0),空腔中点;B 点:场点坐标(0,0,3),伸缩缝上方;C 点:场点坐标(0,0,-4),伸缩缝下方。以上 3 点在有空腔模型和无空腔模型中的声压级频谱曲线如图 23~25 所示。

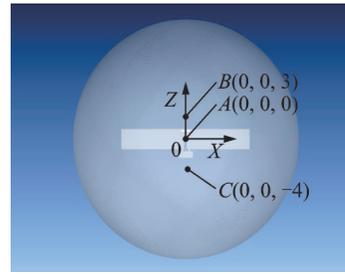


图 22 代表性场点位置示意图

Fig.22 Schematic diagram of representative points

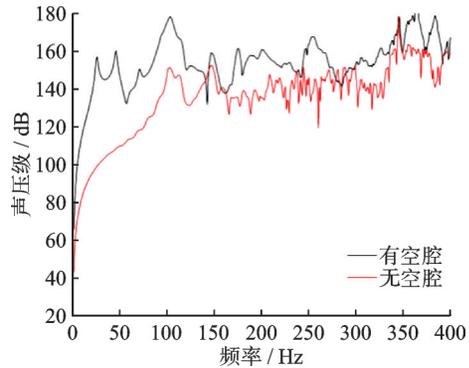


图 23 场点 A 有空腔模型和无空腔模型声压级频谱对比

Fig.23 Comparison of the spectrum analysis of sound pressure between the joint-cavity system and the joint system without cavity at representative point A

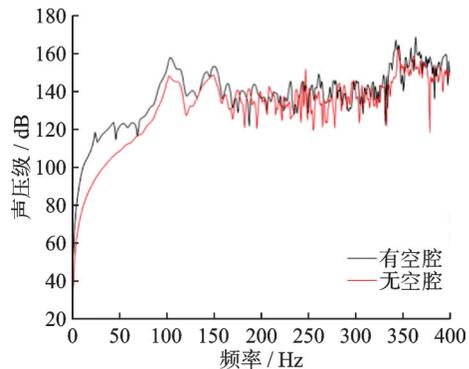


图 24 场点 B 有空腔模型和无空腔模型声压级频谱对比

Fig.24 Comparison of the spectrum analysis of sound pressure between the joint-cavity system and the joint system without cavity at representative point B

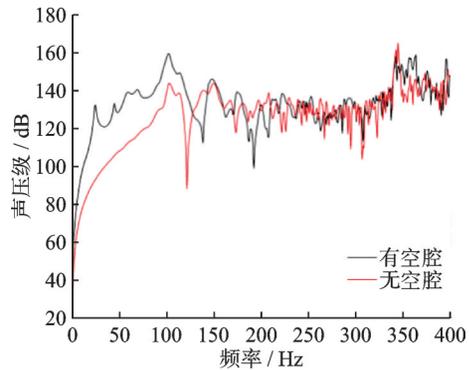


图 25 场点 C 有空腔模型和无空腔模型声压级频谱对比

Fig.25 Comparison of the spectrum analysis of sound pressure between the joint-cavity system and the joint system without cavity at representative point C

对比图 23 可知,无空腔模型中 A 点的声压级频谱曲线在高频频段的波动性相比有空腔模型中 A 点的声压级频谱曲线更为明显,结合图 17 和图 19 的声压级云图分布,这主要是因为空腔不存在后,原点 A 相比 B、C 点,在声场中的位置不再具有特殊性,同样受到分析频率增加导致的声场复杂化的影响,波动性增强。

由图 23~25 可知,对于场点 A,在整个分析频段内,在同一频率简谐荷载作用下,有空腔模型场点声压级均大于无空腔模型场点声压级,差值最大可达 60 dB。对于场点 B、C,当激励频率小于 150 Hz 时,同一频率简谐荷载作用下,有空腔模型场点声压级均大于无空腔模型场点声压级,声压级差值最大可达 25 dB 和 40 dB;当激励频率大于 150 Hz 时,两种模型的声压级频谱曲线的波动性比较强,规律不明显。

综上,伸缩缝的车致振动噪声是由伸缩缝竖向振动激励和空腔声模态激励共同耦合作用产生的,空腔声模态激励作用对中低频段噪声影响比较大,对空腔内场点噪声影响比较大。

基于空腔对伸缩缝的激励作用及伸缩缝噪声空间传播的特点,分别从噪声声源及噪声传播两方面出发,提出以下两种降噪方案。

#### (1) 填塞空腔

空腔声模态激励作用对低频段噪声影响比较大,空腔的存在使低频频段噪声产生较大的增幅,可采用某种疏松易变形质地的材料填塞空腔,破坏空腔声模态激励作用,从噪声源头减弱噪声。

#### (2) 封闭空腔

根据振动噪声的传播特点,在空腔内分布较强并通过空腔两端开口及支座缝隙向外辐射,可在空腔两端锚固吸声材料,阻断噪声的传播路径,达到降噪的目的。

## 8 结 论

本文以 D320 模数式伸缩缝为研究对象,建立模数式伸缩缝的实体有限元模型,以及伸缩缝-空腔联合声无限元模型,通过对伸缩缝的振动特性研究以及对联合模型的声学特性研究,得到以下结论:

(1) 一阶竖向振型是影响伸缩缝竖向动力特性的最主要振型,一阶竖向振频随支承弹簧刚度增加而增加。

(2) 在自振频率 0~400 Hz 范围内,伸缩缝振型主要分为 4 个阶段,第 1、3、4 阶段振型均以中梁的竖向弯曲为主,且竖弯阶数逐渐增加,第 2 阶段

振型以中梁的水平弯曲为主。

(3) 伸缩缝在竖向简谐波荷载激励下位移频谱峰值频率与伸缩缝主要竖向振频保持一致。

(4) 伸缩缝的车致振动噪声由伸缩缝竖向振动激励和空腔声模态激励共同耦合作用产生,空腔内噪声较强并通过空腔两端开口及支座缝隙向外辐射。

(5) 根据伸缩缝振动噪声产生及传播机制的研究,提出可以对伸缩缝下部空腔进行填塞与封闭的方法实现伸缩缝降噪。

伸缩缝降噪研究是城市桥梁降噪研究的重要组成部分,后续需要与工程实际及现场试验数据相结合开展研究。

#### 参考文献:

- [1] STEENBERGEN M J. Dynamic response of expansion joints to traffic loading[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(12): 1677-1690.
- [2] COELHO B Z, VERVUURT A H J M, PEELEN W H A, et al. Dynamics of modular expansion joints: The Martinus Nijhoff Bridge[J]. *Engineering Structures*, 2013, 48: 144-154.
- [3] 吴昊. 大位移桥梁伸缩装置动力学分析[D]. 成都:西南交通大学, 2014.  
WU Hao. Dynamic analysis of large displacement bridge expansion joint[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [4] 严情木. 大位移桥梁伸缩缝动力学分析[D]. 成都:西南交通大学, 2013.  
YAN Qingmu. Dynamic analysis of the Large displacement bridge expansion joint[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [5] 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 Zhengfeng. Dynamic characteristics research of the large displacement bridge expansion joint[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] MARRINER D, WAKEFIELD C. Modular expansion joint noise in B.C.[J]. *Canadian Acoustics*, 2016, 44(3): 38-39.

- [9] REINHALL P, SOLOWAY A G. Modular expansion joint noise mitigation study: Agenda Item 4.1a [R].[S.l.]: Department of Transportation, The State of Washington, 2022.
- [10] REINHALL P, THOMAS S, LIPTON J, et al. Design and testing of modular expansion joint noise mitigation strategies: WA-RD-920.1[R].[S.l.]: Department of Transportation, The State of Washington, 2022.
- [11] 雷久伦.无缝伸缩超韧弹性体在桥梁降噪减振中的应用研究[J].交通节能与环保, 2024, 20(2): 181-183.  
LEI Jiulun. Research on the application of seamless stretchable super-tough elastomer in bridge noise and vibration reduction[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2024, 20(2): 181-183.
- [12] 谭宗林,龙晨杰,刘强,等.耐久型静音桥梁伸缩缝工程应用[J].广东土木与建筑, 2024, 31(1): 60-63.  
TAN Zonglin, LONG Chenjie, LIU Qiang, et al. Engineering application of durable silent bridge expansion joint[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2024, 31(1): 60-63.
- [13] 单华刚,林道锦,于长海,等.降噪型伸缩装置影响效果及应用展望[J].公路, 2020, 65(8): 188-191.  
SHAN Huagang, LIN Daojin, YU Changhai, et al. Effect and application prospects of noise reducing device[J]. Highway, 2020, 65(8): 188-191.
- [14] 仇冰洁.降噪减振橡胶伸缩装置施工工艺研究[J].城市道桥与防洪, 2024(4): 189-192.  
QIU Bingjie. Study on construction technology of rubber expansion device reducing noise and vibration[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2024(4): 189-192.
- [15] 中华人民共和国交通部.公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社, 2015.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. General code for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: People's Communications Press, 2015.

(编辑:孙静)