

文章编号: 1673-3193(2024)06-0859-12

# 地铁致振作用下局域共振混凝土结构的动力响应

卓国威, 马 钢, 高松涛, 李 波, 张 凯

(太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 地铁运行穿过建筑物时会造成振动干扰, 本研究基于地铁减振问题, 提出了一种新型的周期性局域共振混凝土板(PLRCs), 并结合试验测试与仿真计算对其带隙特性、减振机理进行了分析和验证。开展了列车致振PLRCs振动衰减性能研究并探究了结构几何参数及材料参数对弯曲波带隙的影响。研究表明, PLRCs可打开频率范围为54.3~121.8 Hz的弯曲波带隙, 抑制其动力学响应。模态之间的耦合作用导致产生弯曲波带隙, 这种耦合效应将弯曲波局限于谐振腔内, 阻止其在平板内的传播, 进而抑制了振动。合理改变PLRCs结构尺寸参数和材料参数可以优化带隙范围, 随着柔性包覆层的厚度、宽度及弹性模量的增加, 衰减域范围逐渐降低。缩尺试验和模拟试验都表明PLRCs结构比混凝土板具有更好的减振效果。因此, PLRCs结构可为当前建筑结构的减振问题提供新的思路和方法。

**关键词:** 轨道交通; 结构减振; 动力学响应; 局域共振; 周期性结构

**中图分类号:** TU591 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.06.015

**引用格式:** 卓国威, 马钢, 高松涛, 等. 地铁致振作用下局域共振混凝土结构的动力响应[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(6): 859-870.

ZHUO Guowei, MA Gang, GAO Songtao, et al. Dynamic response of local resonant concrete structures under excitation by subway [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(6): 859-870.

## Dynamic Response of Local Resonant Concrete Structures Under Excitation by Subway

ZHUO Guowei, MA Gang, GAO Songtao, LI Bo, ZHANG Kai

(School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The subway line will cause vibration interference when passing through buildings. In this paper, based on the problem of subway vibration reduction, a new type of periodic local resonance concrete slab (PLRCs) was proposed, and its band-gap characteristics and vibration reduction mechanism were analyzed and verified by combining test and simulation. The vibration attenuation performance of PLRCs induced by train vibration was studied, and the effects of structural geometry and material parameters on the band gap of bending wave were investigated. The results show that PLRCs can open the band gap of bending wave in the frequency range of 54.3~121.8 Hz and suppress its dynamic response. The coupling between the modes leads to the flexural band gap, which restricts the flexural wave to the cavity and prevents its propagation in the plate, thus suppressing the vibration. The band gap range can be optimized by changing the PLRCs structure size

**收稿日期:** 2024-02-29

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52178239)

**作者简介:** 卓国威(2000—), 男, 硕士生, 主要从事结构减振方面的研究。

**通信作者:** 马 钢(1988—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构减振、冲击方面的研究。E-mail: magang@tyut.edu.cn。

parameters and material parameters reasonably. The attenuation range decreases gradually with the increase of the thickness, width and elastic modulus of the flexible coating. Both scale test and simulation test show that PLRCs structure has better damping effect than concrete slab. Therefore, PLRCs structure can provide new ideas and methods for vibration reduction of current building structures.

**Key words:** rail transit; structural vibration reduction; dynamic response; local resonance; periodic structure

## 0 引言

随着城市化进程的加快,地铁作为高效轨道交通在全球各大城市迅速发展。地铁系统的建立和扩展不仅极大地提高了城市交通的效率,缓解了地面交通的压力,而且促进了城市各区域之间的快速连接,推动了经济的发展和城市的现代化。然而,伴随着地铁网络的不断扩展,地铁运行带来的振动问题逐渐显现,成为不可忽视的环境公害,特别是对文物、历史建筑、精密仪器以及人体健康的危害<sup>[1-5]</sup>。

研究表明<sup>[6-9]</sup>地铁运行所产生的交通环境振动主要集中在40~90 Hz频率范围内。研究人员发现通过引入周期性局域共振结构可以有效抑制弹性波的传播<sup>[10-11]</sup>,这为建筑结构减振提供了一种新的解决途径。Lei等<sup>[12]</sup>通过设计局域共振周期波垒,实现了弹性波能量的有效局域化,从而减小了建筑物的振动危害。秦凯强等<sup>[13]</sup>通过调整埋入深度和顶端尺寸,使部分埋入地下的工字形截面周期波屏障能够在1.5~20 Hz频段内有效衰减瑞利表面波。

优化受振体本身的设计与在传播路径上设置减振措施同样重要。建筑基础相比外部屏障具有不受周围环境影响的优势,能够稳定有效地减少振动对建筑物的影响。Casablanca等<sup>[14]</sup>设计的基于超材料的复合地基建筑隔震墙,可衰减频率大于4.5 Hz的S波,耗散带隙内50%以上的振动能量。Cheng等<sup>[15]</sup>研究了材料阻尼对层状周期基础性能的影响,材料阻尼会进一步减少通带内上部结构的振动响应,提高了不同场地条件下的抗振性能。Franchini等<sup>[16]</sup>设计了局部共振基础来减轻细长储罐在振动中由垂直分量引起的水动力压力,通过在框架的第二层交错排列柱子,可以显著提高衰减性能。盛曦等<sup>[17]</sup>将TID引入隔振器浮置板使得传统钢弹簧浮置板新增弯曲波带隙,实现了对板内弹性波的调控,但是产生的带隙范围

较小。金星等<sup>[18]</sup>研究新型幂指数棱台局域共振型晶体发现其带隙因共振单元的局域共振效应产生,其可有效提高船体板结构强度,但在棱台斜边处产生了能量聚集现象,导致斜边的位移要远大于其他位置处的位移。

除了对建筑基础进行改进,混凝土楼板作为传播振动最严重的部位亦是减振的关键<sup>[19]</sup>。楼板可采用预制混凝土构件和模块化组件使其方便施工与维护。同时,PLRCs结构属于局部减振,可根据实际情况需要来制定特定的方案以此来降低造价,也有利于后期进行一些减振改造。为了缓解地铁运行带来的振动问题,本文结合局域共振机制提出了周期性局域共振混凝土板(PLRCs)。

## 1 缩尺PLRCs试件振动衰减性能试验研究

### 1.1 结构介绍

制备缩尺PLRCs试件与NCs(普通混凝土板)试件,对其进行正弦振动试验并对比分析PLRCs与NCs的振动衰减性。结构及材料参数见表1和表2。

表1 PLRCs的结构几何参数

Tab. 1 Structural geometry parameters of PLRCs

mm										
$a$	$b$	$t_1$	$t_2$	$r_1$	$r_2$	$b_1$	$b_2$	$d$	$h$	$w$
50	25	1	1	33	35	23	20	6	7	8

表2 PLRCs的结构材料参数

Tab. 2 Structural material parameters of PLRCs

结构名称	杨氏模量/MPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比
基体	3.75×10 <sup>4</sup>	2 068	0.20
柔性包覆层	0.117 5	1 300	0.47
重质核心体	2×10 <sup>5</sup>	7 788	0.33

PLRCs结构在建筑中的应用及其内部构造示意图、PLRCs单元结构尺寸变量图分别见图1和图2。

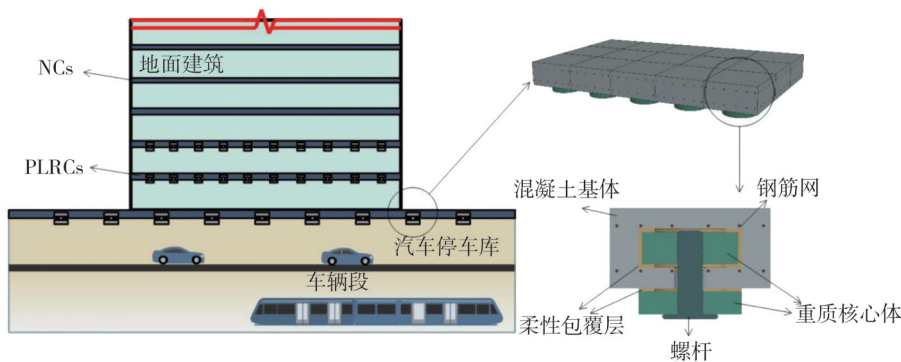


图 1 PLRCs结构在建筑中的应用及其内部构造示意图

Fig. 1 The application of PLRCs structure in architecture and its internal structure diagram

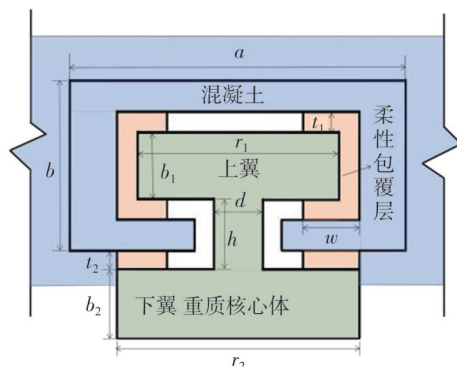


图 2 PLRCs胞元尺寸

Fig. 2 PLRCs cell size

### 1.2 试件设计与制备

PLRCs 试件: 600 mm×600 mm×10 mm 开有 11×11 个直径为 6 mm 圆形螺杆孔方阵的底板;

M6 螺母为重质核心体; 柔性包覆层厚度为 1 mm; 600 mm×5 mm×40 mm 的侧板。NCs 试件: 同尺寸的未开孔底板与侧板。PLRCs 试件制作流程及结构如图 3 所示。

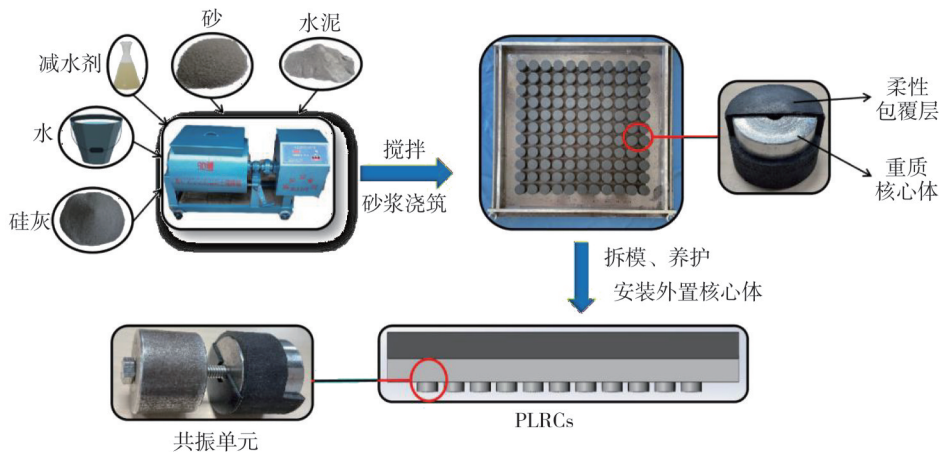


图 3 PLRCs 试件制备图

Fig. 3 PLRCs specimen preparation diagram

### 1.3 试验步骤

- 1) 将 PLRCs 试件固定在 DY-1000-8 振动台上, 确保试件表面平整且稳定。
- 2) 在 PLRCs 试件表面附加速度传感器①~

⑥, 用于实时监测试件在振动过程中的加速度响应, 如图 4 所示。

- 3) 输入垂直于表面方向且频率为 5~1 000 Hz 范围的正弦振动信号, 进行扫频试验。对试验中获取的振动数据进行实时采集和详细分析。

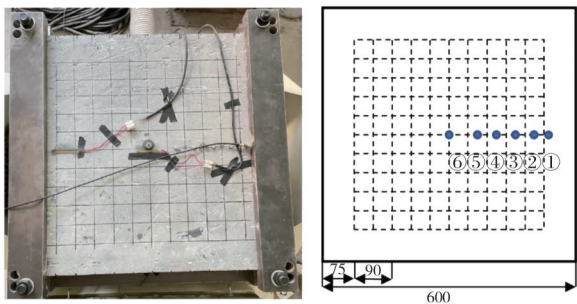


图4 PLRCs 振动试验

Fig. 4 PLRCs vibration test

#### 1.4 缩尺PLRCs试件减振特性研究

图5为NCs及PLRCs试件各点的频响函数(FRF)。FRF的数值反映了测点的加速度响应状

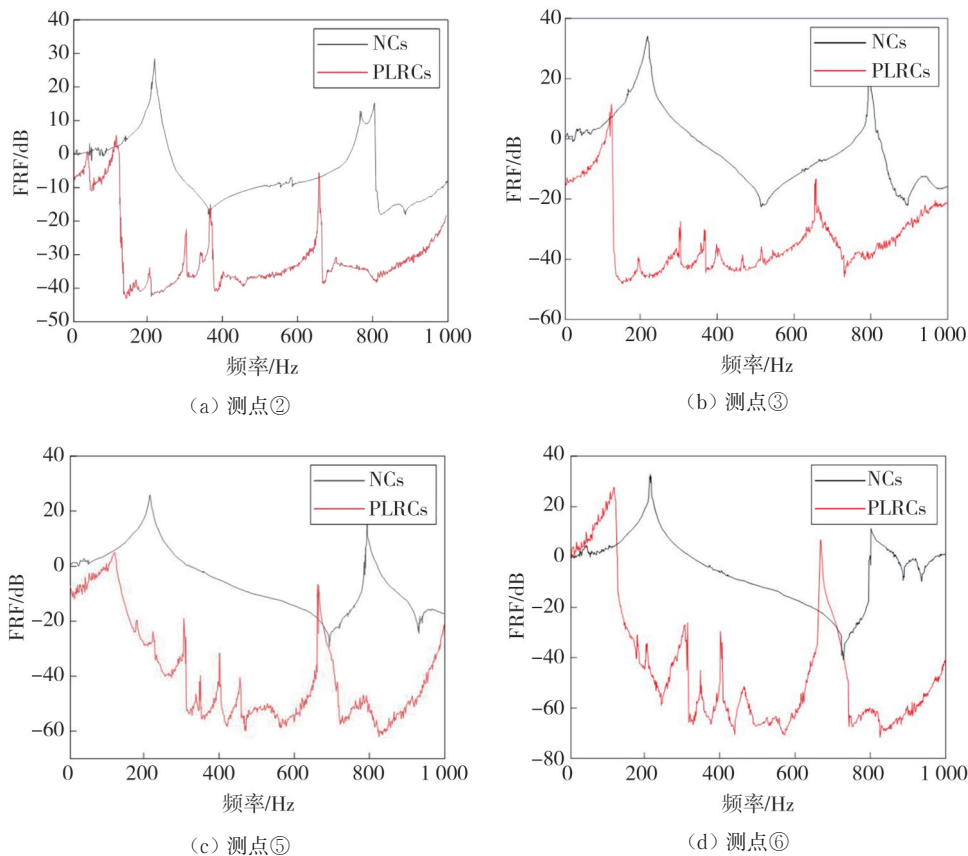


图5 PLRCs及NCs的频率响应函数图

Fig. 5 PLRCs and NCs frequency response function graph

该试验是对PLRCs进行减振机理上的探索,因此进行了大范围扫频试验。为探究PLRCs对地铁诱发的楼板响应频率的衰减性能,后续进行了列车致振下PLRCs振动衰减性能的研究。

## 2 试验与仿真结果的对比分析

通过在Comsol中构建PLRCs和NCs模型,

况,频率响应函数的计算公式为

$$F_{FR} = 20 \lg \left( \frac{U_1}{U_0} \right), \quad (1)$$

式中:  $U_0$ 为输入端的位移幅值;  $U_1$ 为输出端的位移幅值。

通过试验对比可以发现,PLRCs试件展示了优于NCs试件的振动抑制效果。从128.75 Hz起,PLRCs试件的振动衰减随着共振单元周期的增加而显著提升,最大衰减分别达到了-43, -46, -62和-71 dB; NCs试件的最大衰减则较低,且衰减域频率范围也远小于PLRCs试件。因此,PLRCs试件在建筑结构中的振动抑制性能显著优于NCs试件。

进行有限元计算并与试验结果的对比分析发现:在0~200 Hz范围内,NCs和PLRCs结构的加速度频率响应基本相符。在高频范围内由于复杂的振动模式和边界条件导致存在较大误差。试验结果显示,实际PLRCs试件的振动抑制效果优于仿真结果,原因是平板型结构抗弯刚度较低,从而使其具有更宽的频带和更好的减振效果。本文研

究 150 Hz 以下的振动衰减特性, 因此仿真计算可较为准确地模拟实际试验情况。在 150 Hz 以下频

率范围内, PLRCs 的振动衰减效果比 NCs 更好。

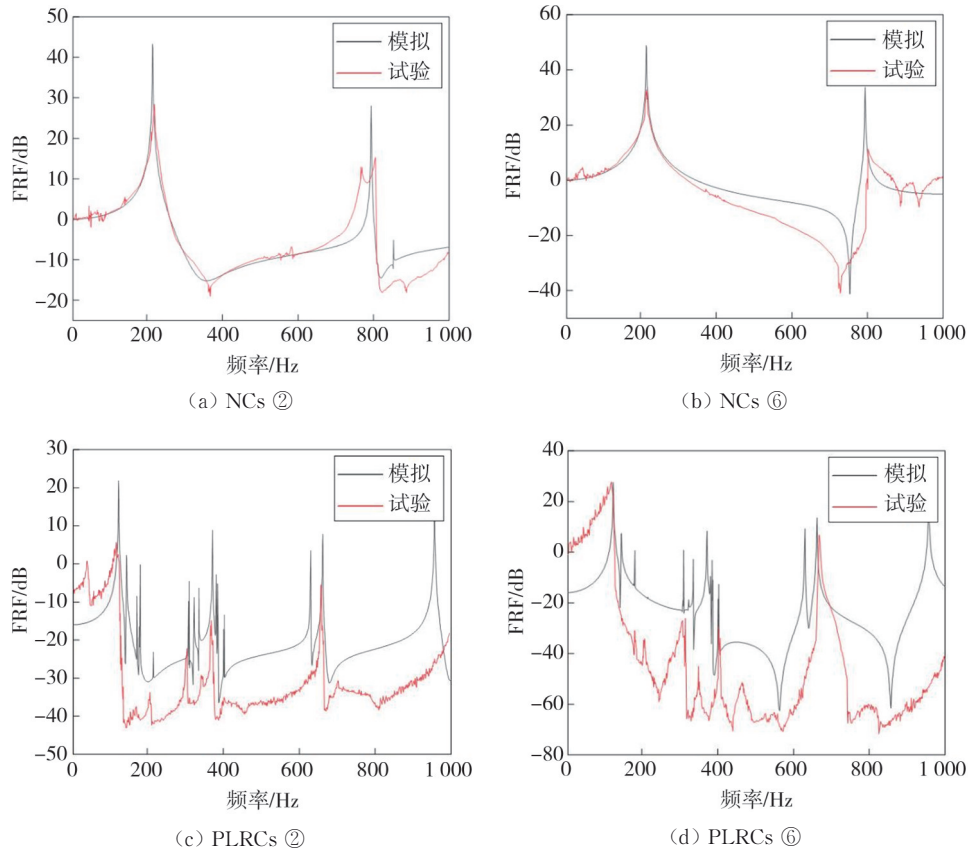


图 6 试验与模拟频率响应函数计算结果对比

Fig. 6 Comparison of calculated results of frequency response function between test and simulation

### 3 PLRCs 带隙分析

#### 3.1 弯曲波带隙理论计算方法

在二维波动问题中, 假设弹性波只在  $xOy$  平面内传播而与  $z$  方向无关, 即

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right], \\ \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) \right], \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为密度;  $\lambda$  和  $\mu$  为 Lamé 常数。

根据二维周期结构的 Bloch 定理, 对于任意一个具有平移周期性的线性系统, 其位移场的数学表达式为

$$u(r) = u_k(r) e^{ik \cdot r}, \quad (4)$$

式中:  $k$  为第一布里渊区(见图 7)的波矢。

单元结构的外边界条件应满足

$$u_k(r) = u_k(r + R), \quad (5)$$

$$u(r, t) = u(x, y, t), \quad (1)$$

式中:  $r$  为位置矢量;  $u$  为位移矢量;  $t$  为时间。

$Z$  模式和  $XY$  模式的控制方程分别为

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u_z}{\partial y} \right), \quad (2)$$

式中:  $R$  为晶格常数。

在单元内建立质量和刚度矩阵, 得到本征方程

$$(K_s - \omega^2 M_s) u(r) = 0, \quad (6)$$

式中:  $K_s$  为刚度矩阵;  $M_s$  为质量矩阵;  $u(r)$  为位移矩阵。

对波矢  $k$  沿不可约布里渊区边界进行扫描。根据边界条件计算特征值和特征向量, 将计算得

到的特征值按顺序排列,形成能带结构图。

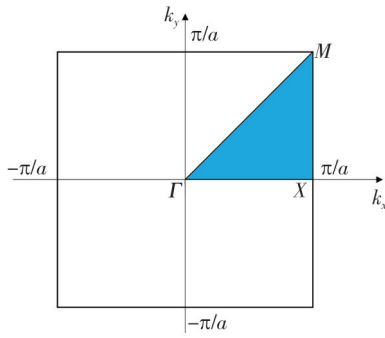


图7 第一布里渊区  
Fig. 7 The first Brillouin zone

### 3.2 带隙特性

优化材料参数见表3,结构尺寸见表4。在

Comsol中建立一个包含10个周期模型的结构,并应用Floquet周期边界条件来模拟无限周期的行为,如图8所示。模型左端设置为 $z$ 方向激励,右端设置为输出端。能带结构图及频率响应函数图如图9所示。

表3 材料参数

Tab. 3 Material parameter

结构	杨氏模量/MPa	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比
基体	$3\times 10^4$	2 390	0.20
柔性包覆层	0.5	1 300	0.47
重质核心体	$2\times 10^5$	7 850	0.33

表4 结构尺寸参数

Tab. 4 Structural dimension parameter mm

$a$	$b$	$t_1$	$t_2$	$r_1$	$r_2$	$b_1$	$b_2$	$d$	$h$	$w$
500	250	10	10	400	400	160	225	80	55	50

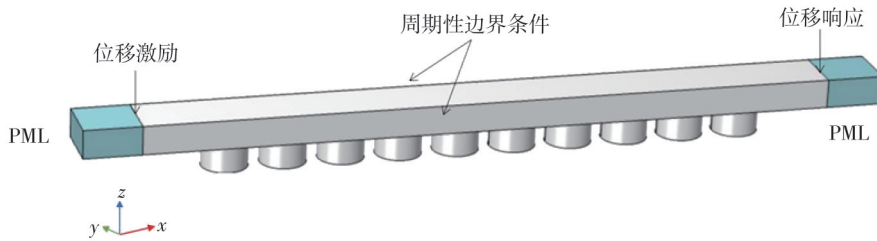


图8 频率响应函数计算示意图  
Fig. 8 Frequency response function calculation diagram

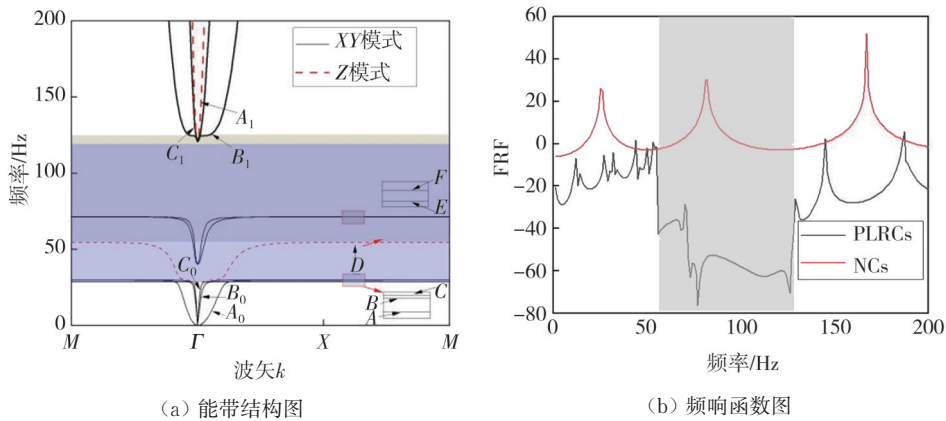


图9 PLRCs的能带结构图及频率响应函数图  
Fig. 9 PLRCs band structure diagram and frequency response function diagram

从图9(a)可得出,XY模式存在一条29.7~121.8 Hz的带隙(蓝色阴影区域),Z模式存在一条54.3~124.4 Hz的带隙(黄色阴影区域)。综合可得存在频率范围为54.3~121.8 Hz的完全带隙,实现对弹性波传播和弯曲波传播的有效抑制。

图9(b)的频率响应函数图展示了普通混凝土板(NCs)和PLRCs的减振性能比较。灰色阴影区域

表示面外带隙对应的衰减域。在这一频率范围内,PLRCs能够有效抑制弹性波的传播。相比之下,NCs在面外带隙范围内几乎没有抑制能力。这一结果表明,PLRCs通过其周期性局域共振单元有效增强了结构的振动衰减性能。对比PLRCs的面外带隙与理想周期结构的计算结果,两者基本吻合,验证了PLRCs设计的有效性和理论计算的准确性。

### 3.3 PLRCs 带隙机理分析

#### 3.3.1 振动模态分析

频率较低时,共振单元长度远小于波长,无法产生局域共振效应,此时应力波在 PLRCs 结构中的传播与普通板中无异。基于此,列出频率为 0

附近处的能带曲线即可区分板波模态。此处 3 条能带曲线分别表示板中的反对称 Lamb 波模式的能带、水平剪切波模式的能带及对称 Lamb 波模式的能带。提取图 8(a) 中  $A_0$ 、 $B_0$ 、 $C_0$ 、 $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$  的振动模态来详细分析带隙形成机理,见图 10,位移单位为 mm。

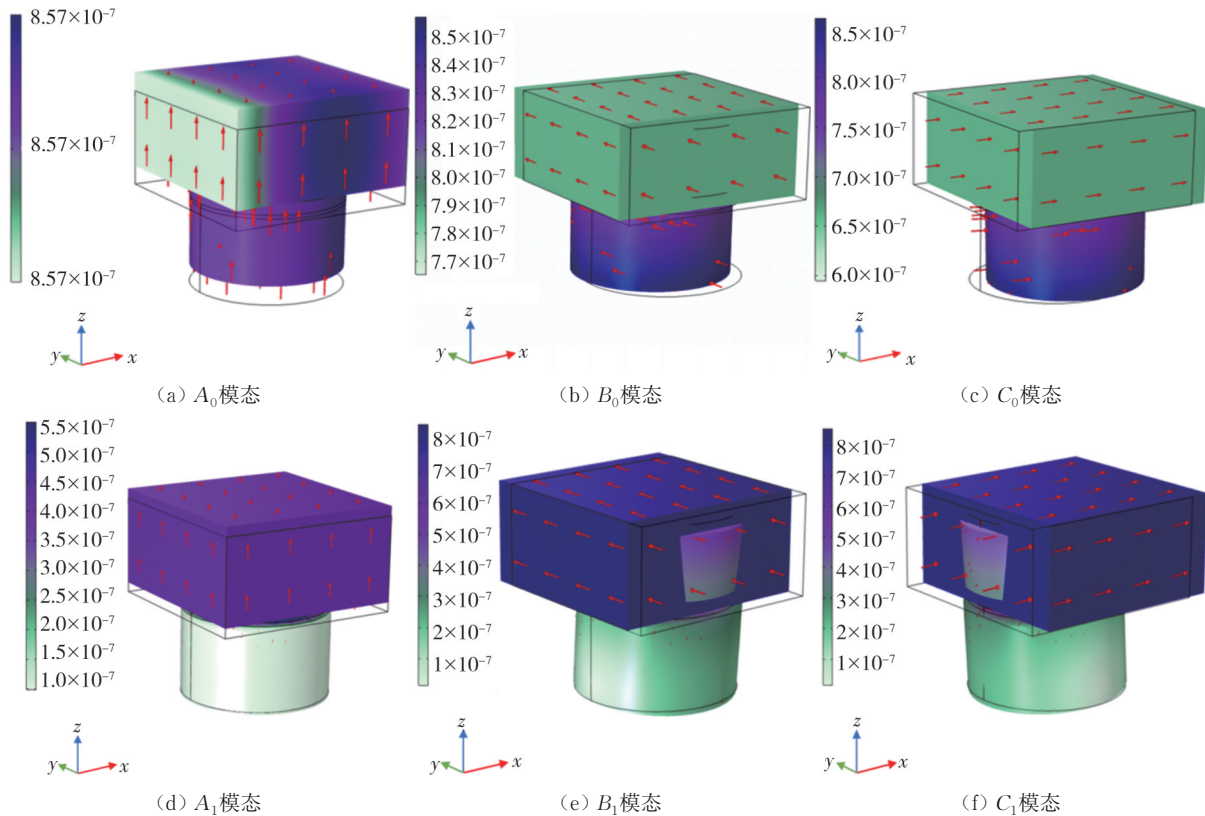


图 10 单元结构各阶板波模式模态图

Fig. 10 Modal diagram of plate wave modes of each order in unit structure

从图 10(a)、(b)、(c) 中可以看出,在  $A_0$ 、 $B_0$ 、 $C_0$  模态示意图中,基体和共振单元共同只产生  $z$ 、 $y$ 、 $x$  方向的位移,但无相对运动,因此没有发生局部谐振现象。只有分别以  $z$ 、 $y$ 、 $x$  方向位移占主导地位的振动模态才能与  $A_0$ 、 $B_0$ 、 $C_0$  模态耦合。从图 10(d)、(e)、(f) 中可以看出,在  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$  模态中,基体分别产生  $z$ 、 $y$ 、 $x$  方向位移,而共振单元只产生微弱位移,因此不能发生耦合作用。只有分别具有  $z$ 、 $y$ 、 $x$  方向位移并占主导地位的局域共振模式才能与  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$  模态发生强烈耦合效果。其中,  $A_1$  模态对应面外带隙的截止频率,  $B_1$  模态和  $C_1$  模态对应面内带隙截止频率。

#### 3.3.2 局域共振模态分析

通过对图 9(a) 中的平直能带进行分析,发现平直能带在这些频率下的振动模式具有较高的局

域化程度,图 11 展示了平直带上各点的振动模态,通过对这些模态的分析,可知振动模态与板波模态之间存在的强烈耦合是局域共振带隙产生的关键因素。

图 11(a) 中的特征频率为 28.5 Hz,基体未动,共振单元发生扭转,因无方向位移,无法与板波模态耦合。图 11(b)、(c)、(d) 中的特征频率分别为 29.5, 29.7, 54.3 Hz,共振单元分别产生以  $x$ 、 $y$  方向为主的扭转及  $z$  方向的平移运动,分别与  $C_0$ 、 $B_0$ 、 $A_0$  模态耦合。图 11(e) 的特征频率为 71.1 Hz,共振单元产生以  $x$  方向为主的微弱的扭转,难以与板波模态耦合。图 11(f) 的特征频率为 71.3 Hz,共振单元产生以负  $y$  方向为主的扭转,打开了一条狭窄的通带。

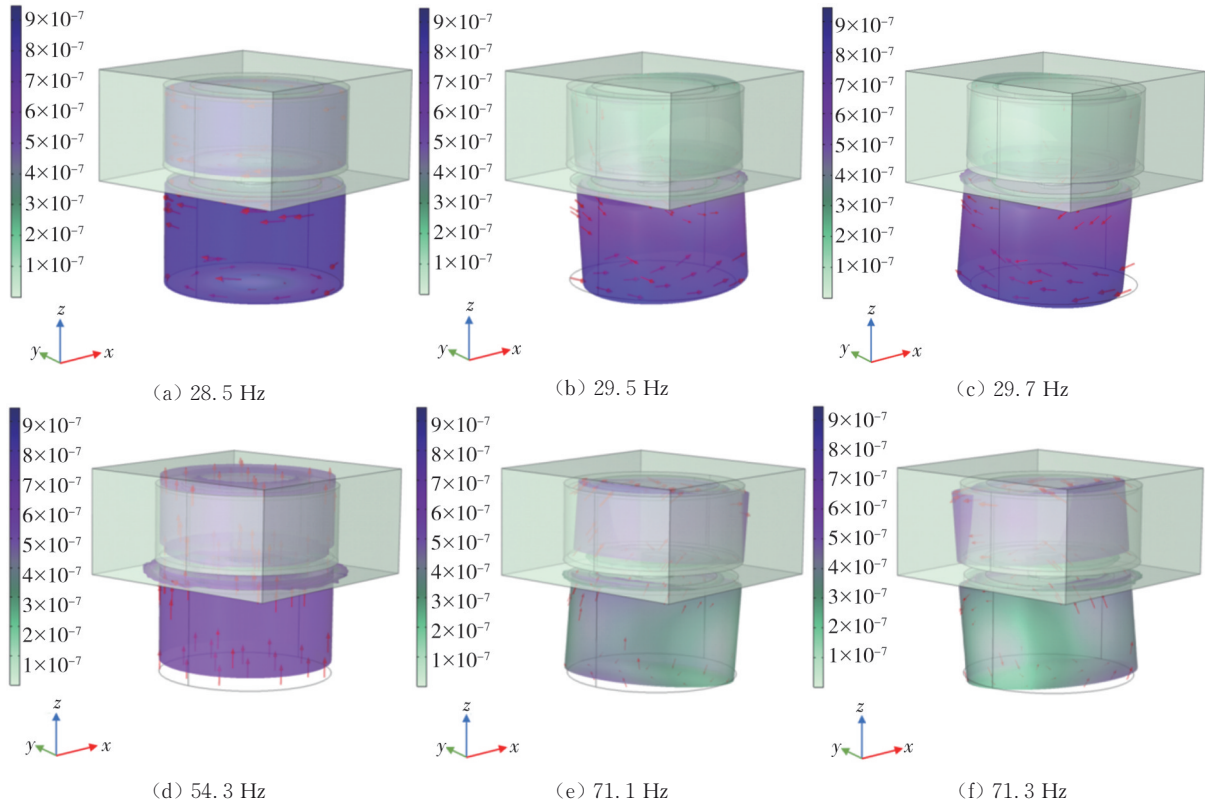


图 11 局域共振模式模态图

Fig. 11 Modal diagram of locally resonance modes

### 4 列车致振 PLRCs 振动衰减性能

在广州某车辆段的现场实测中,测得地面 20 s 的振动信号如图 12 所示。将该振动信号输入

到 PLRCs 混凝土模型的左端,得到其振动加速度响应信息如图 13 所示。通过对比分析实测信号的模型响应,可进一步验证 PLRCs 模型在实际应用中的减振性能。

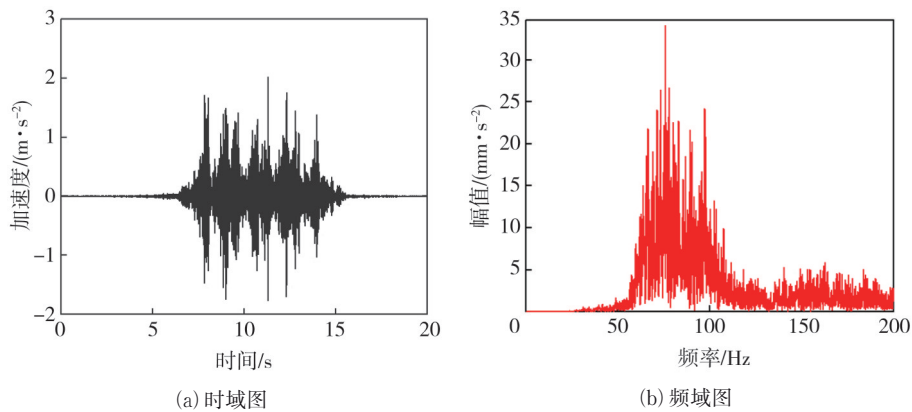


图 12 试车线地面振动加速度<sup>[20]</sup>

Fig. 12 Ground vibration acceleration of test track<sup>[20]</sup>

从图 13(a)、(c)中可以看出,PLRCs 和 NCs 在 z 方向的加速度极值分别为  $2.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$  和  $3 \times 10^{-2} \text{ m/s}^2$ ,表明振动经过 PLRCs 结构时的衰减效果比 NCs 显著。从图 13(b)、(d)中可以看出,NCs 几乎没有振动衰减,而 PLRCs 对在 59~130 Hz 范围内的振动有显著的减振效果,并与理

论的禁带一致。

本研究只对广州某地铁车辆段振动实例进行了单一共振单元的带隙特性研究,也可在基体上设置多种共振单元来实现带隙展宽使其应用于更加广泛的场景。

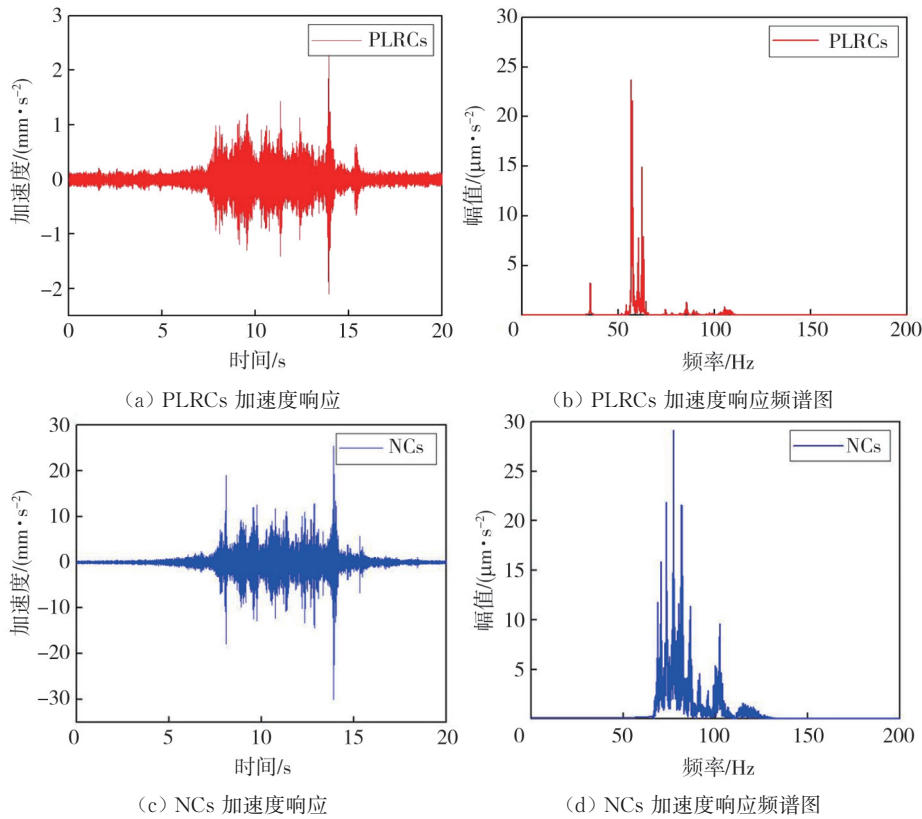


图 13 PLRCs 及 NCs 振动加速度响应时域和频谱图

Fig. 13 PLRCs and NCs vibration acceleration response time domain and spectrum diagram

### 5 PLRCs 结构弯曲波带隙的影响因素分析

通过 Comsol 软件进行能带图计算,以探究结构及材料参数的改变对带隙起止频率的影响,改变的参数值见表 5,结果分别如图 14 和图 15 所示。

表 5 结构及材料几何参数

Tab. 5 Structural and material geometric parameters

$t_1/\text{mm}$	$t_2/\text{mm}$	$w/\text{mm}$	$r_2/\text{mm}$	$b_2/\text{mm}$	柔性包覆层弹性模量 $E/\text{MPa}$	密度之比 $\alpha(\alpha = \rho_c/\rho_m)$
5	5	30	250	50	0.2	2
10	10	50	300	100	0.3	3
15	15	100	350	150	0.5	3.5
20	20	150	400	200	0.7	4
30	30	—	450	225	0.9	5
—	—	—	—	250	—	—

注:  $\rho_c$  为重质核心体密度;  $\rho_m$  为混凝土基体密度。

2) 环状包覆层的宽度  $w$  对禁带的影响。由图 14(c) 可以看出,带隙起止频率随着  $w$  的增加而增大,带宽变大。这主要是由于  $w$  的增加导致了结构等效刚度的增加和  $A_1$  模态激发频率的升高,从而提升了带隙的起始和终止频率。

3) 重质核心体下翼的直径  $r_2$  对禁带的影响。由图 14(d) 可以看出,等效质量随  $r_2$  的增加而增加,使起始频率降低。由于终止频率几乎不变,

1) 基体内部柔性包覆层的厚度  $t_1$ 、 $t_2$  对禁带的影响。由图 14(a)、(b) 可以看出,随着结构参数  $t_1$ 、 $t_2$  的增加,带隙的起止频率减小,带宽逐渐减小的趋势明显。 $t_1$  和  $t_2$  的增加导致了共振单元的等效刚度减小,使得结构在低频段的振动特性变得更为显著,从而降低了带隙的起始频率。

导致带宽增大。

4) 重质核心体下翼的高度  $b_2$  对禁带的影响。由图 14(e) 可以看出,终止频率随着  $b_2$  的增加而降低,但其降低速率逐渐减缓。这表明,在一定范围内,  $b_2$  的增加对终止频率的影响趋于饱和。 $b_2$  的变化对起始频率的调控具有较强的线性关系。 $b_2$  的增加使共振单元的有效质量增大,进而导致带隙的起始频率降低。

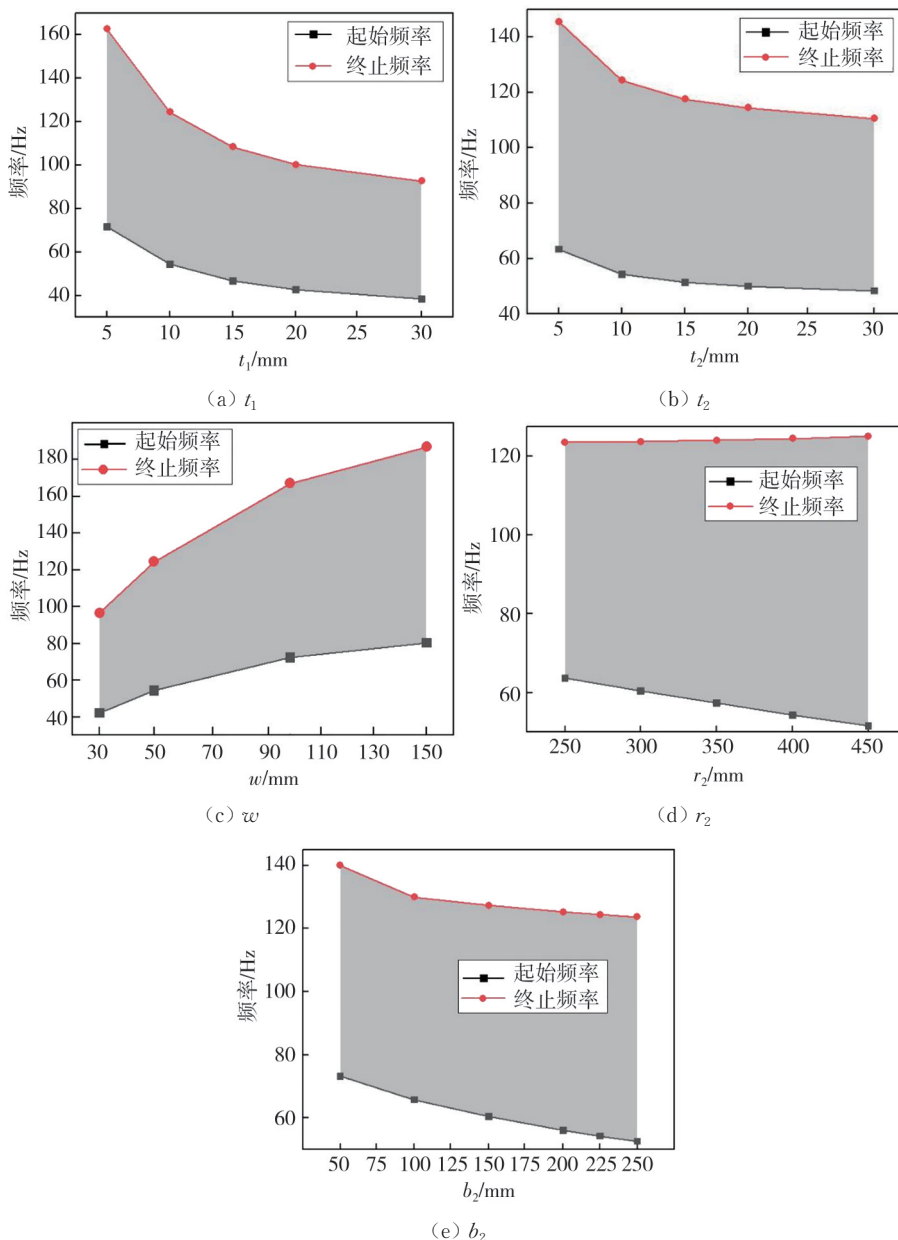


图 14 结构尺寸对带隙的影响  
Fig. 14 Effect of structure size on band gap

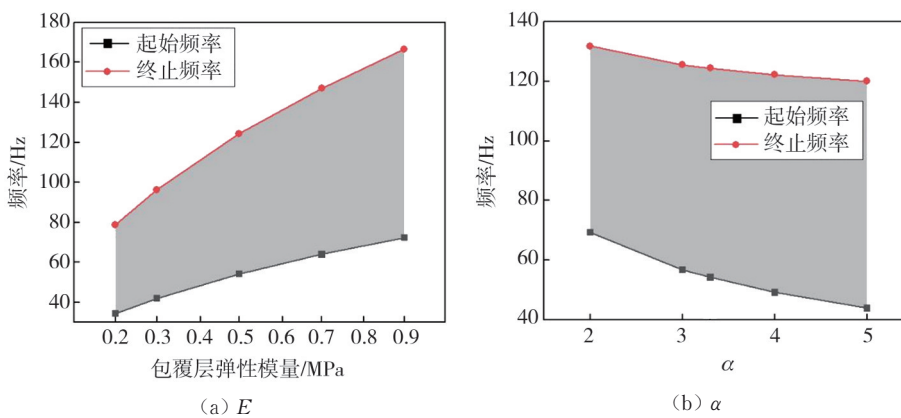


图 15 材料参数对带隙的影响  
Fig. 15 Effect of material parameters on band gap

5) 柔性包覆层弹性模量  $E$  对带隙的影响。由图 15(a) 可以看出, 增加  $E$  将显著提高弯曲波带隙的起止频率。带隙带宽增加速率减缓。这种现象表明, 在高弹性模量下, 进一步增加弹性模量对带隙频率的提升效果会逐渐减弱。

6) 密度之比  $\alpha$  对带隙的影响。随着密度之比的增大, 核心体的高密度使得共振单元的等效质量增大, 带隙的起止频率均呈现出减小的趋势。但是, 由于终止频率的下降幅度较小, 导致带宽增加。通过合理调整密度比, 可以有效控制带隙的下限, 从而优化结构的振动控制性能。

## 6 结 论

1) 周期性局域共振混凝土板 PLRCs 结构可以打开 54.3~121.8 Hz 的弯曲波带隙来抑制地铁运行致振产生的弯曲波传播。抑制其动力学响应的原因是共振单元将能量局限至其内部, 阻断应力波的传播。

2) 试验证明 PLRCs 相较普通混凝土板 NCs 能够对振动进行有效衰减, 可以减小振动的加速度响应。

3) PLRCs 结构可以通过调整结构和材料参数来调整带隙的起止频率。改变其下翼半径、高度或者密度可使带隙的频率范围降低。

### 参考文献:

[1] SADEGHI J, ESMAEILI M H. Safe distance of cultural and historical buildings from subway lines [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2017, 96: 89-103.

[2] 石志飞, 程志宝, 向宏军. 周期结构理论及其在隔震减振中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017.

[3] 孙晓静, 袁扬, 马蒙, 等. 地铁列车运行引起远场低频振动响应预测研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(4): 198-202.

SUN Xiaojing, YUAN Yang, MA Meng, et al. Prediction of metro train-induced low frequency vibration responses in far field [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4): 198-202. (in Chinese)

[4] 董霜, 朱元清. 环境振动对人体的影响[J]. 噪声与振动控制, 2004, 24(3): 22-25.

DONG Shuang, ZHU Yuanqing. Effects of environmental vibration on man[J]. Noise and Vibration Control, 2004, 24(3): 22-25. (in Chinese)

[5] 马蒙, 张厚贵. 城市轨道交通环境振动对人体影响的

暴露-响应关系研究现状[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(1): 1-5.

MA Meng, ZHANG Hougui. Research advance of the exposure-response relationship between railway vibration and human comfort [J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(1): 1-5. (in Chinese)

[6] ZOU C, WANG Y M, WANG P, et al. Measurement of ground and nearby building vibration and noise induced by trains in a metro depot [J]. Science of the Total Environment, 2015, 536: 761-773.

[7] 何卫, 谢伟平. 地铁车辆段列车动荷载特性实测研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 132-137.

HE Wei, XIE Weiping. Field measurement of the subway train loading in a car depot [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 132-137. (in Chinese)

[8] 谢伟平, 陈艳明, 姚春桥. 地铁车辆段上盖物业车致振动分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(8): 110-115.

XIE Weiping, CHEN Yanming, YAO Chunqiao. Vibration analysis of train depot over-track buildings induced by train load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(8): 110-115. (in Chinese)

[9] 楼梦麟, 贾宝印, 陆秀丽, 等. 地铁振动下基础隔振效应的实测与分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(11): 1622-1628.

LOU Menglin, JIA Baoyin, LU Xiuli, et al. Base isolation building response to subway-induced vibration and its analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(11): 1622-1628. (in Chinese)

[10] 邹超, 冯青松, 何卫. 列车运行引起地铁车辆段与上盖建筑环境振动研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(1): 27-46.

ZOU Chao, FENG Qingsong, HE Wei. Research review on environmental vibrations in metro depot and over-track buildings induced by train operation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 27-46. (in Chinese)

[11] CHENG Z B, SHI Z F. Composite periodic foundation and its application for seismic isolation [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2018, 47(4): 925-944.

[12] LEI L, MIAO L, LI C, et al. Locally resonant periodic wave barriers for vibration isolation in subway engineering [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(4): 1239-1251.

[13] 秦凯强, 刘泽, 于桂兰. 具有低频超宽衰减域的部分埋入式表面波屏障[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(2): 187-194.

QIN Kaiqiang, LIU Ze, YU Guilin. Partially embed-

- ded barrier for broad band attenuation of surface waves in low frequencies [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2020, 40(2): 187-194. (in Chinese)
- [14] CASABLANCA O, VENTURA G, GARESCI F, et al. Seismic isolation of buildings using composite foundations based on metamaterials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(17): 174903.
- [15] CHENG Z B, SHI Z F, PALERMO A, et al. Seismic vibrations attenuation via damped layered periodic foundations [J]. *Engineering Structures*, 2020, 211: 110427.
- [16] FRANCHINI A, BURSI O S, BASONE F, et al. Finite locally resonant metafoundations for the protection of slender storage tanks against vertical ground accelerations [J]. *Smart Materials and Structures*, 2020, 29(5): 055017.
- [17] 盛曦, 曾会柯, 石灿, 等. TID隔振器浮置板轨道低频减振特性研究[J]. *工程力学*, 2023, 40(5): 49-58. SHENG Xi, ZENG Huike, SHI Can, et al. Study on low-frequency vibration mitigation characteristics of tid-vibration-isolator floating slab track [J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(5): 49-58. (in Chinese)
- [18] 金星, 张振华. 幂指数棱台局域共振型声子晶体板的带隙特性与减振机理研究[J]. *振动与冲击*, 2023, 42(14): 107-114. JIN Xing, ZHANG Zhenhua. Band gaps characteristics and vibration reduction mechanism of power exponentialprismatic local resonance phononic crystal plates [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023 42(14): 107-114. (in Chinese)
- [19] TABRIZIKAHOU A, KUCZMA M, NOWOTARSKI P, et al. Sustainability of civil structures through the application of smart materials: A review [J]. *Materials*, 2021, 14(17): 4824.
- [20] 冯青松, 王子玉, 刘全民, 等. 地铁车辆段不同区域振动特性对比分析[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(14): 179-185. FENG Qingsong, WANG Ziyu, LIU Quanmin, et al. Comparative analysis of environmental vibration characteristics in different regions of a metro depot [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(14): 179-185. (in Chinese)