

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.05.018

蜂窝型周期屏障结构地震波衰减性能研究

赵春风¹, 薛友¹, 王鹏辉², 王胤植¹, 陈青杰¹, 高志伟¹

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中国铁路呼和浩特局集团有限公司呼和浩特供电段, 内蒙古 呼和浩特 010070)

摘 要:针对特定范围内的低频 Rayleigh 表面波, 文章设计一种半埋入式蜂窝型地震超屏障结构, 阻隔 Rayleigh 波的传播以减少其对建筑物的震害损伤。首先基于 Bloch-Floquet 理论求解得到蜂窝型地震超屏障单胞的频散关系和带隙特性, 然后通过参数化分析埋深、柱高和土壤等对单胞带隙的影响, 最后选取正弦波和地震波对蜂窝型超屏障进行时程分析, 探究超屏障对不同主频率地震波的阻隔效果, 验证超屏障对 7.07~13.02 Hz 范围内地震波的衰减作用。结果表明, 蜂窝型地震超屏障对主频在衰减域范围内的地震波具有较好阻隔作用, 在建筑结构隔震减振中具有良好的应用前景。

关键词:地震超屏障; 周期性结构; 局域共振; 带隙; 隔震减振

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2026)05-0703-09

Research on seismic wave attenuation performance of honeycomb periodic barrier structure

ZHAO Chunfeng¹, XUE You¹, WANG Penghui², WANG Yinzhi¹, CHEN Qingjie¹, GAO Zhiwei¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Hohhot Power Supply Depot, China Railway Hohhot Group Co., Ltd., Hohhot 010070, China)

Abstract: For the low-frequency Rayleigh surface wave in a specific range, a honeycomb semi-buried seismic super-barrier structure was designed to block the propagation of Rayleigh wave and reduce its seismic damage to buildings. Firstly, based on the Bloch-Floquet theory, the dispersion relation and band gap characteristics of honeycomb seismic super-barrier cells were obtained. Secondly, the influence of buried depth, column height and soil on the cell band gap was analyzed parametrically. Finally, sine wave and seismic wave were selected to analyze the time history of the honeycomb super-barrier, and the blocking effect of the super-barrier on seismic waves of different main frequencies was studied, and the attenuation effect of the super-barrier on seismic waves in the range of 7.07-13.02 Hz was verified. The results show that the honeycomb seismic super-barrier has a good blocking effect on the seismic waves with the main frequency in the attenuation domain, and has a good application prospect in the seismic isolation and vibration reduction of building structures.

Key words: seismic super-barrier; periodic structures; local resonances; band gaps; seismic isolation and vibration reduction

近年来, 全球进入地震高发期, 地震直接造成的生命财产损失以及间接引发的多种次生灾害都

给社会带来极大压力。因此, 针对工程结构的减隔震研究一直受到广泛的关注。其中, 周期性结

收稿日期: 2024-01-15; 修回日期: 2024-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278302); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项资助项目(2020EEVL0404)

作者简介: 赵春风(1983—), 男, 内蒙古察右中旗人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: zhaowindy@hfut.edu.cn.

构在土木和交通^[1-3]等领域有一定的发展。

文献[4]研究发现,在软性基体材料中嵌入铅制共振单元能够显著改变结构性能,制造出具有晶格常数比相关波长小 2 个数量级的声波晶体,首次突破布拉格散射型声子晶体的尺寸限制,为低频带隙的产生引入新的局域共振机理;文献[5-6]在实验室做过类似的研究工作,分别研究空心、填充圆孔的周期系统,并对填充率等参数对衰减域的影响进行详细讨论;文献[7]探索了不同的超材料构型,结合声子晶体和局部共振结构以及不同范围的力学性能,发现超材料屏障对地震表面波和体波均可以有效衰减;文献[8]推导了内平面波周期结构的定向衰减,设计一种新型的多维复合周期隔震基础,通过创新排列基础和利用周期结构的定向衰减特性,实现多维衰减域;文献[9]设计一种由混凝土和橡胶周期排列的一维基础,通过振动台试验结果分析,发现当激发的频率在周期基础的衰减域范围内时,结构的动态响应明显降低;文献[10]设计一种对低频地震波能够产生有效衰减作用的十字形超材料屏障结构,并在此基础上设计正、逆梯度式波屏障结构,对于地震波有更好的衰减效果。

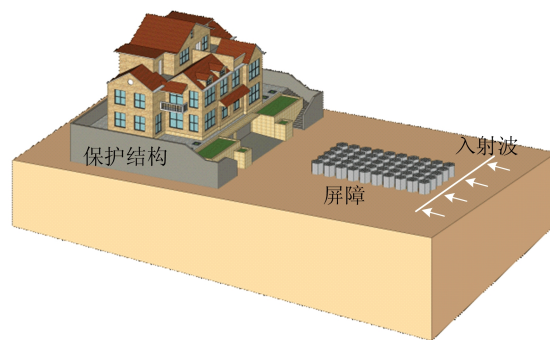
目前,已有的减隔震技术大都会改变结构的特性,而周期性结构不仅不改变结构特性,还适用于已有建筑和地震敏感性结构的震振双控。由于局域共振周期性结构可以利用小尺寸控制大波长,对该周期性结构的研究和应用较为广泛,但是如何产生低频宽带隙依旧是难点,利用六角蜂窝结构^[11]在填充系数不大时就可产生绝对带隙这一特点,因此本文设计一种六边形蜂窝型超屏障,该屏障可有效应对处于 7.07~13.02 Hz 范围内的地震 Rayleigh 波。

1 蜂窝型局域共振超屏障结构

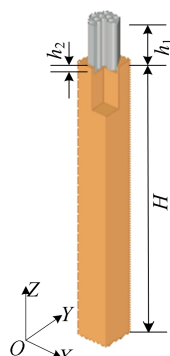
1.1 单胞模型与计算方法

本文提出的蜂窝型超屏障可以适用多向地震动,周期阵列及单胞结构如图 1 所示。三维周期阵列模型如图 1a 所示,该结构半埋入保护结构土壤的四周,沿着入射波传播方向路径上设置了周期屏障。图 1b、图 1c 中:灰色区域为混凝土;橙色区域为土壤。单胞结构几何参数为:晶格常数 $a=2.35$ m;正六字形柱体结构外接圆半径 $r=1.1$ m;边缘转角处宽度 $s_1=0.05$ m;内部相邻六边形宽度 $s_2=0.1$ m;混凝土柱体高度 $h=3.5$ m;突出地面高度 $h_1=3.0$ m;埋深 $h_2=0.5$ m;填充

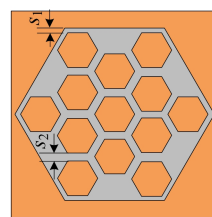
率达到 0.49^[6]。文献[12]研究表明,为获得表面波的频散关系曲线,单胞结构的土壤厚度需要满足一定条件($H>10a$),且单胞底部需要设置固定边界条件,故取土体厚度 $H=40$ m。屏障单元模型的材料相关参数^[13]见表 1 所列。



(a) 周期阵列模型



(b) 单胞三维图



(c) 单胞俯视图

图 1 周期阵列及单胞结构图

表 1 结构模型材料参数

材料	密度/(kg/m ³)	弹性模量/MPa	泊松比
混凝土	2 500	4×10^4	0.2
土壤	1 800	20	0.3

在满足微小变形和初始应力为 0 的假设条件下,取均匀且各向同性的完全线弹性波介质中的任意微分体作为研究对象。根据弹性波理论,建立介质在笛卡尔坐标系下传播的弹性波方程:

$$(\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{f} = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (1)$$

其中: ρ 为质量密度; $\mathbf{u}$ 为矢量位移; $\mathbf{f}$ 为体积力; λ, μ 为 Lamé 常数。

根据 Bloch 定理可知,周期结构中的波动物理场可以表示为:

$$\begin{cases} \psi(\mathbf{r}) = \exp(\mathbf{i} \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \phi(\mathbf{r}), \\ \phi(\mathbf{r}) = \phi(\mathbf{r} + \mathbf{R}) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{r}$ 为位移矢量; $\mathbf{R}$ 为正格矢; $\mathbf{k}$ 为倒格子空间的波矢。

式(2)表明,对周期势场中的单电子波动方程,其本征函数可以表示为一个平面波 $\exp(\mathbf{i}\mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ 乘以一个具有晶格周期性的函数 $\phi(\mathbf{r})$ 。结合研究的对象是周期性结构,相邻格矢的波场可写为:

$$\phi(\mathbf{r} + \mathbf{a}) = \exp[\mathbf{i}\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r} + \mathbf{a})]\phi(\mathbf{r} + \mathbf{a}) = \exp(\mathbf{i}\mathbf{k} \cdot \mathbf{a})\phi(\mathbf{r}) \quad (3)$$

得到周期结构中的弹性波位移场 $u(\mathbf{r}, t)$:

$$u(\mathbf{r}, t) = u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})\exp[\mathbf{i}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)] \quad (4)$$

其中: ω 为角频率; t 为时间; $u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ 为调幅函数。

由 Bloch 定理可知,周期结构中相邻弹性波场之间满足的边界条件为:

$$u(\mathbf{r} + \mathbf{a}, t) = \exp(\mathbf{i}\mathbf{k} \cdot \mathbf{a})u(\mathbf{r}, t) \quad (5)$$

式(5)表明周期结构 $\mathbf{r} + \mathbf{a}$ 处的弹性波场相比 $\mathbf{r}$ 处增加了一个与格矢相关的相位因子 $\exp(\mathbf{i}\mathbf{k} \cdot \mathbf{a})$ 。根据给定的波矢值,采用有限元计算,可获得一组结构特征频率。第一 Brillouin 区如图 2 所示,由于该单元高度对称,沿着不可约 Brillouin 区(图 2 中黄色部分)扫描波矢,可求解结构在这一方向的特征频率和特征模态,将频率按方向进行排列,得到屏障结构的能带图。

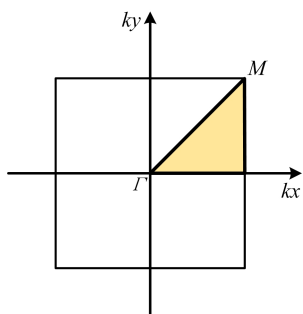


图2 第一 Brillouin 区及不可约 Brillouin 区

为评估该周期性结构对地震波的衰减,引入频响系数来评估周期性结构对地震 Rayleigh 波的衰减效果。定义有限周期性结构的频响系数 G_{FRF} :

$$G_{\text{FRF}} = 20 \lg \frac{\int_0^S |a_{z, \text{with}}| dS}{\int_0^S |a_{z, \text{without}}| dS} \quad (6)$$

其中: $a_{z, \text{with}}$ 为有周期屏障输出端的垂直加速度分量; $a_{z, \text{without}}$ 为无周期屏障时输出端的垂直加速度分量。

1.2 模型验证与带隙分析

本文主要研究周期波屏障对地震表面波的衰减性能。为验证有限元模拟的准确性,选取文献[14]提出的圆柱形地震超材料单胞,用声锥法绘

制频散关系曲线并进行对比,计算验证模拟结果,如图 3 所示。由图 3 可知,两者模拟结果高度一致,表明所用方法的可行性和表面波识别准则的准确性。

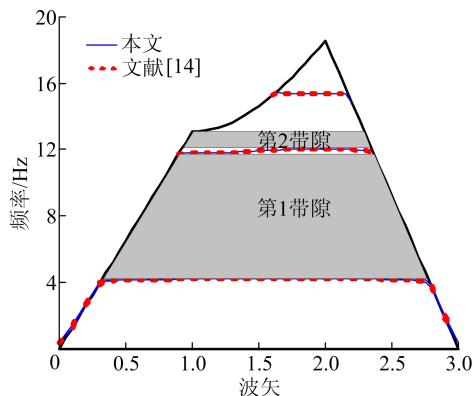


图3 地震超材料计算验证模拟结果

对于图 3 中的黑色声线,使用 2 种方法进行比较,本模型能带结构如图 4 所示。由图 4 可知,2 种方法计算结果高度一致,表明有限元模拟得到可靠的声线结果。且处于 7.07~13.02 Hz(灰色阴影部分)范围内没有表面波存在,这表明,位于该频率范围内的地震波将无法在周期性结构中传播,形成完全带隙。

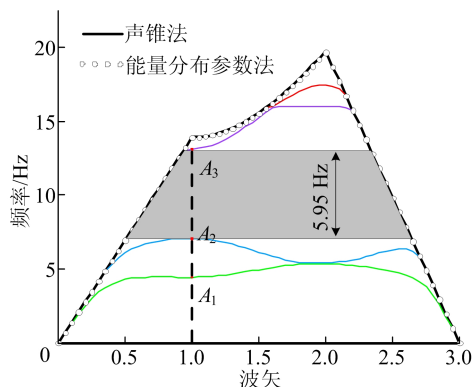


图4 能带结构

为研究带隙的产生机理,在图 4 中选取并分析波矢为 1.0 的 3 个特殊点 A_1 、 A_2 、 A_3 的振动模态,特殊点的振型模态如图 5 所示。 A_1 点对应的频率为 4.44 Hz,此时土体变形微小,振动变形主要集中在混凝土柱体上部,发生在 XOZ 平面内。 A_2 点对应的频率为 7.07 Hz,位于带隙下边缘,此时的振动变形主要集中在混凝土柱体上部,发生在 YOZ 平面内,土体振动的位移几乎为 0。 A_3 点对应的频率为 13.12 Hz,处在衰减域外,此时的振动方向沿着竖直方向,变形主要集中在混凝土柱体及接触面。上述 A_1 、 A_2 点的振型模态发

生明显的局域共振现象,且从频散曲线可看出, A_2 点对应的共振模式是打开全带隙的主要原因。

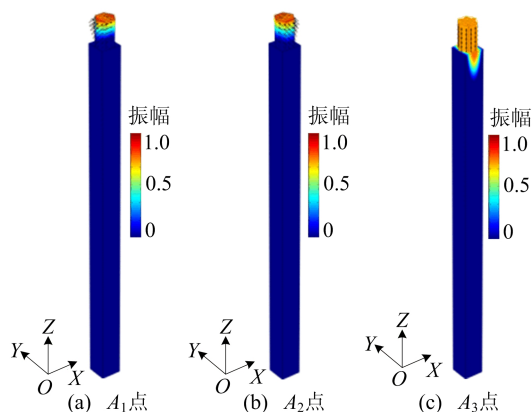


图 5 特殊点的振型模式

为验证屏障产生的全带隙,本文建立频域分析有限周期模型内的位移场分布如图 6 所示。

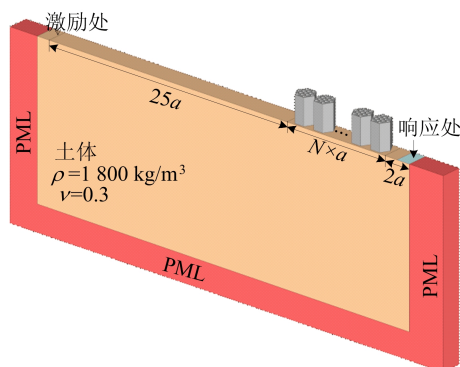


图 6 频域分析有限周期模型内的位移场分布

其中 X 向排列共有 5 个单胞, Y 向设置周期性边界条件,以减少计算量。在左侧激励处施加

线位移激发土壤中的体波和 Rayleigh 波^[15],线位移大小为 1,沿着 Z 轴负方向。因设计的周期性屏障主要用于保护建筑结构免受 Rayleigh 波作用,为充分消耗线位移引起的体波,将激励处设置在屏障左侧距离为 $25a$ 的线上。响应处设置在屏障右侧,拾取面大小为 $a \times a$,距离为 a 。考虑到土壤边界会对波产生反射和折射,在土壤的侧面和下底面均设置厚度为 $3a$ 的完美匹配层(perfective matched layers,PML)。

对图 6 的超屏障三维模型进行频域分析,计算波矢在 $0 \sim 1$ 范围内方向带隙和频率响应曲线,如图 7 所示,其中存在 3 个衰减效果明显的区域(灰色阴影部分),衰减区域对应的频率范围分别为 $4.46 \sim 5.16$ Hz、 $7.07 \sim 13.02$ Hz、 $13.12 \sim 13.92$ Hz,总范围可达 7.45 Hz,与周期结构在 $0 \sim 1$ 波矢方向的带隙基本匹配。设置 10 个周期屏障接收到的响应衰减程度更加明显。

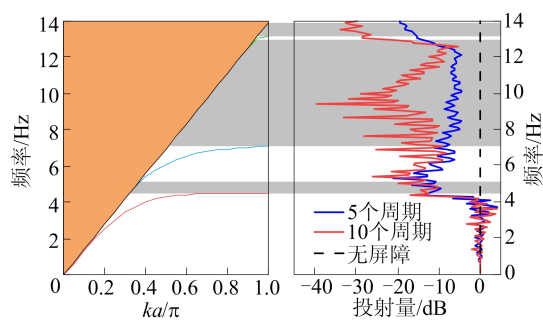


图 7 方向带隙和频率响应曲线

为验证地震波的衰减机理,本研究给出周期结构频率范围外(3.6 Hz)、内(7.2 Hz)的位移场如图 8 所示。

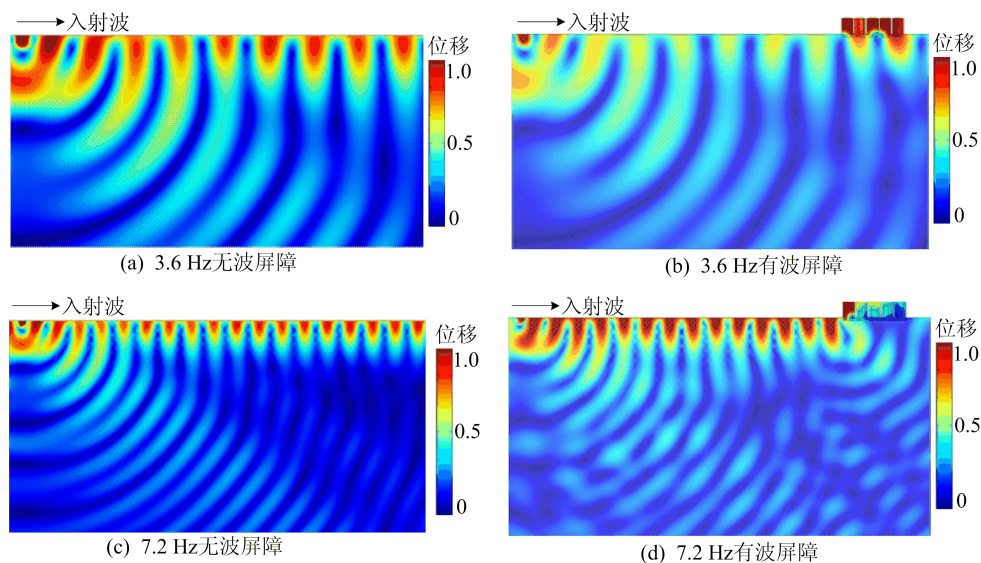


图 8 周期结构频率范围外、内的位移场

图 8a 和图 8c 由于无波屏障作用,沿 X 向传播的表面 Rayleigh 波并未削弱;由图 8b 可知,波屏障对于带隙频率外(3.6 Hz)的波无衰减作用,并导致屏障后的位移幅值变大;由图 8d 可知,波在经过屏障后,部分转化为体波模态向地下传播,削弱带隙频率内(7.2 Hz)的波引起的位移幅值。

为对比有无超屏障对衰减域内波的衰减效果,计算 $f=7.2$ Hz 的 Z 向位移分布,如图 9 所示。结果表明,在经过周期性屏障作用后,响应处 Z 向的位移较无屏障有大幅衰减。这是由于入射波在第 1 个屏障前产生最大幅值,经过第 1 个屏障后部分波的模态发生改变,且屏障发生局域共振消耗能量,波朝着入射方向迅速衰减,在响应拾取到的位移经过有效削弱。因此,可以判断超屏障产生的衰减域与柱体的局域共振机制有关。

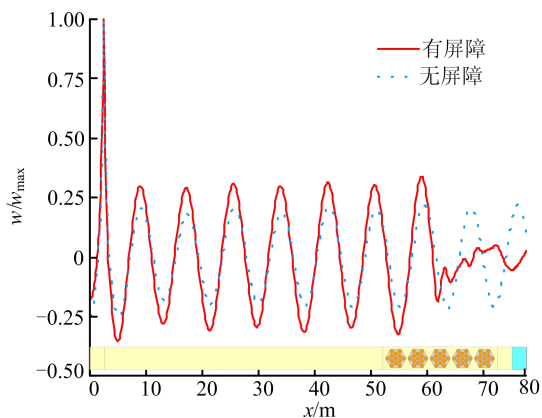


图 9 $f=7.2$ Hz 的 Z 方向位移分布图

2 参数化分析

为找到衰减效果更优的组合,本文对超屏障结构的埋入深度、柱体高度以及土壤的密度、弹性模量进行参数化分析,研究上述参数对超屏障带隙和衰减效果的影响规律。为更加科学地比较参数变化对带隙宽度的影响,采用中心频率和相对带宽来表示带宽的变化趋势。中心频率和相对带宽分别定义为:

$$f_m = (f_u + f_b)/2 \quad (7)$$

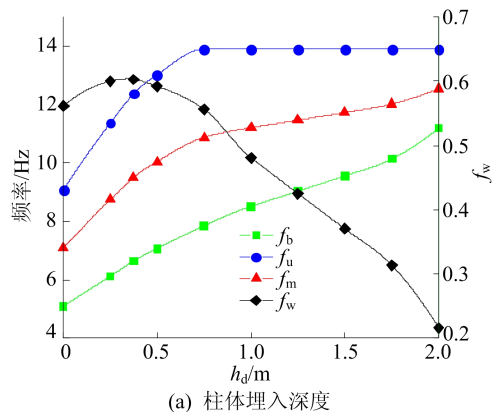
$$f_w = (f_u - f_b)/f_m \quad (8)$$

其中, f_u 和 f_b 分别为衰减域的上、下边缘频率。

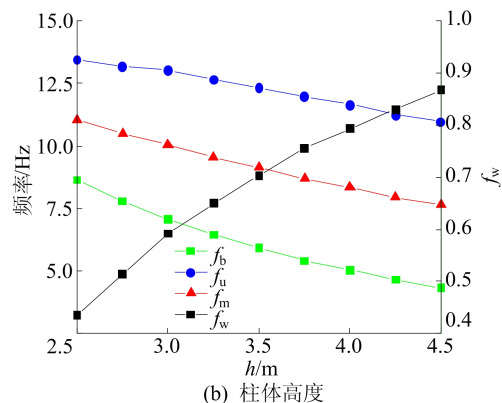
2.1 埋入深度和柱体高度对带隙的影响

屏障参数对带隙的影响如图 10 所示。由图 10a 可知,在保持其他参数不变的情况下,仅改变超屏障单胞埋入深度 h_d ,变化范围从 0~2.0 m 的变化过程中,带隙起始频率在持续上升,截止频率在埋深达到 0.75 m 时不再变化,带隙宽度整

体呈现先增后减的趋势,在埋深达到 0.75 m 时达到最值。随着单胞结构埋深的增加,结构整体刚度也在不断提高,导致带隙的上、下边缘频率上升。当埋深达到 0.75 m 时,截止频率达到波矢为 1 所对应的声锥高度,由于声锥高度是由单胞的晶格常数 a 决定,后续埋深增加并不会引起截止频率上升。相对带宽 f_w 先增后减,在 $h_2 = 0.375$ m 时达到最大值。综合考虑相对带宽和绝对带宽,本文取埋入深度为 0.5 m。



(a) 柱体埋入深度



(b) 柱体高度

图 10 屏障参数对带隙的影响

由图 10b 可知,当保持其他参数不变,仅改变柱体高度 h 取值,随着柱体高度的不断增加,带隙的起始频率和截止频率在持续下降,带隙宽度整体呈现略微增加的趋势。相对带宽 f_w 随着主体高度增加也不断变大。由于柱体高度变高,其结构整体质量也会增加,导致柱体的刚度降低、柔度变大,两者的变化均造成带隙向低频移动。通过比较不同柱高得到的带隙关系,选出合适的柱高,可以产生更优良的衰减效果。

2.2 土壤参数对带隙的影响

文献[16-17]研究表明,土壤的相关参数(包括弹性模量、密度和泊松比)会对结构频散曲线的分布产生一定程度的影响。由于我国地理环境复杂,不同区域的地理条件不尽相同,需要研究土壤

材料对低频带隙的影响。本文讨论土壤参数包括弹性模量和密度。

在保持土壤泊松比为 0.3 的条件下,改变土壤的密度和弹性模量,得到土壤参数对带隙的影响如图 11 所示。随着土壤密度的持续增加,带隙的 f_m 和 f_w 都略有下降。原因是单元的固有频率与土壤密度无关,当土壤密度发生变化时,带隙的起始频率基本保持不变,然而带隙上限在不断降低,导致带隙宽度的变窄。此外,土壤的弹性模量对带隙的影响较大,通过增加土壤的杨氏模量,带隙的 f_m 明显提高,而 f_w 几乎不变,带隙整体向更高的频率范围移动。

综上所述,要想实现优良的低频宽带隙,土壤材料应具有高弹性模量和低密度的性质。

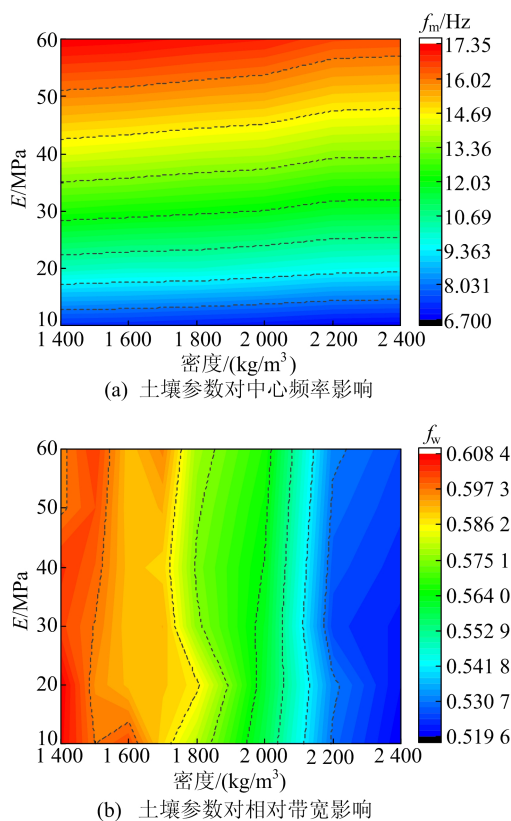


图 11 土壤参数对带隙的影响

3 时域分析

为探究周期性超屏障结构对表面 Rayleigh 波的衰减效果,本文对其进行时程分析。时域分析的三维模型将图 6 中的 PML 替换为低反射边界条件,激励处沿 Z 轴负方向偏移 $3a$,充分模拟地震表面波,其他参数保持不变,对排列 5 个单胞结构的周期性屏障进行加速度时程分析,选取响应处加速

度响应,比较有、无波屏障对表面波的衰减性能。

3.1 正弦波

为探究所设计的周期性波屏障对频率处于带隙范围内的波的衰减效果,在激励处 Z 向施加正弦波,正弦波由汉宁窗调制函数生成,公式为:

$$A_{in} = \begin{cases} \frac{1}{A_{max}} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi f_c t}{C}\right) \right] \sin(2\pi f_c t), & 0 \leq t < \frac{C}{f_c}; \\ 0, & t \geq \frac{C}{f_c} \end{cases} \quad (9)$$

其中: A_{max} 为输入信号最大振幅; f_c 为中心激励频率; C 为波周期数; t 为波持续时间。

分别选取 10 个汉宁窗调制中心频率为 4 Hz 和 8 Hz 的正弦函数,持续时间都是 6 s,得到经归一化处理的正弦波作用下的加速度响应如图 12 所示。由图 12 可知,处于衰减域频率范围内的正弦波经周期性屏障后衰减效果更加明显。频率 4 Hz 处于带隙外,响应处 Z 向最大加速度衰减 25.6%,8 Hz 处在带隙内,对应输出 Z 向最大加速度衰减幅值达到 82.7%。

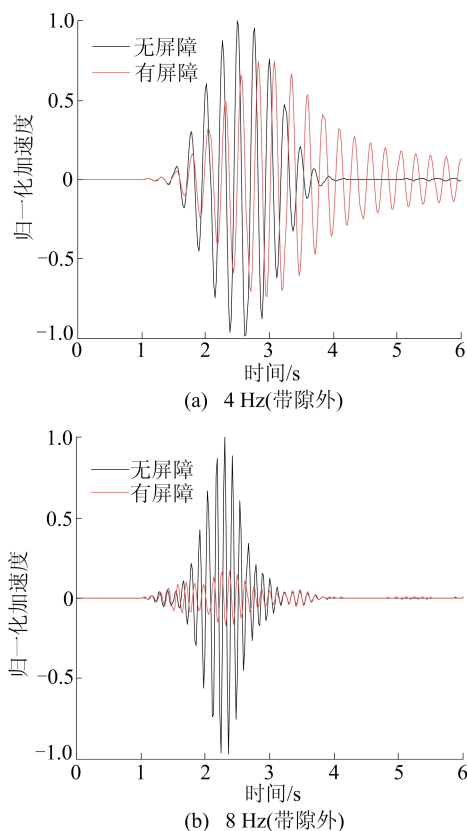


图 12 正弦波作用下加速度响应

3.2 地震波

为验证设计的周期性结构屏障在真实地震作

用下对建筑结构的保护效果,在 PEER 地面运动数据库中选取具有对比性的 El-Centro 地震波和 Saguenay 地震波,地震波频谱曲线如图 13 所示。

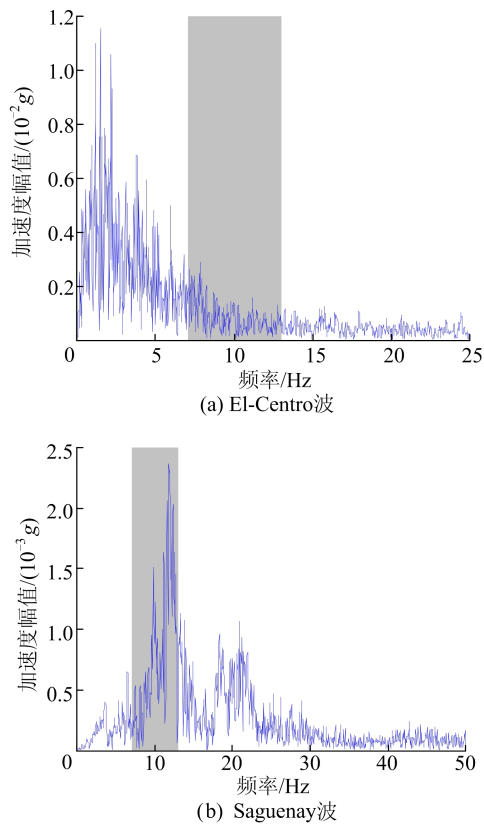


图 13 地震波频谱曲线

其中图 13a、图 13b 分别是地震波经傅里叶变换后的反应谱曲线,阴影部分为衰减域覆盖范围。从图 13a 可以看出,El-Centro 地震波的主频集中在 0~5 Hz,处在衰减域外。从图 13b 可以看出,Saguenay 地震波的主频率集中在 10~13 Hz,处在衰减域内。

施加地震波进行时程分析,El-Centro 地震波和 Saguenay 地震波的加速度响应如图 14、图 15 所示。计算响应处 X、Z 两方向的加速度响应及对应反应谱曲线。El-Centro 地震波作用下 X、Z 方向加速度响应如图 14a、图 14c 所示,可以看出,El-Centro 地震波输出端 X、Z 方向最大加速度响应衰减分别达到 24.0%、32.2%。Saguenay 地震波作用下 X、Z 方向加速度响应如图 15a、图 15c 所示,对比发现周期性屏障对 Saguenay 地震波的衰减效果更优异,输出端 X、Z 方向最大加速度响应减小分别达到 41.4%、61.1%。两者频谱曲线都表明,屏障对 7.07~13.02 Hz 范围内的衰减效果更好,说明周期性结构屏障对处在衰减域内频率有很好的衰减作用。

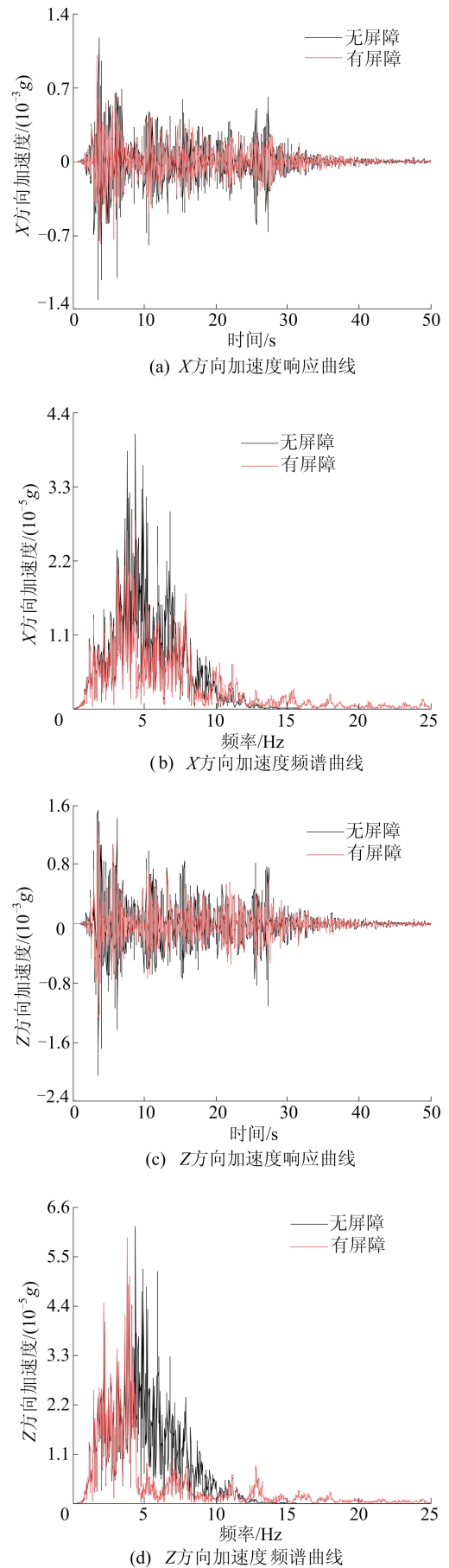


图 14 El-Centro 地震波作用下的加速度响应及其反应谱曲线

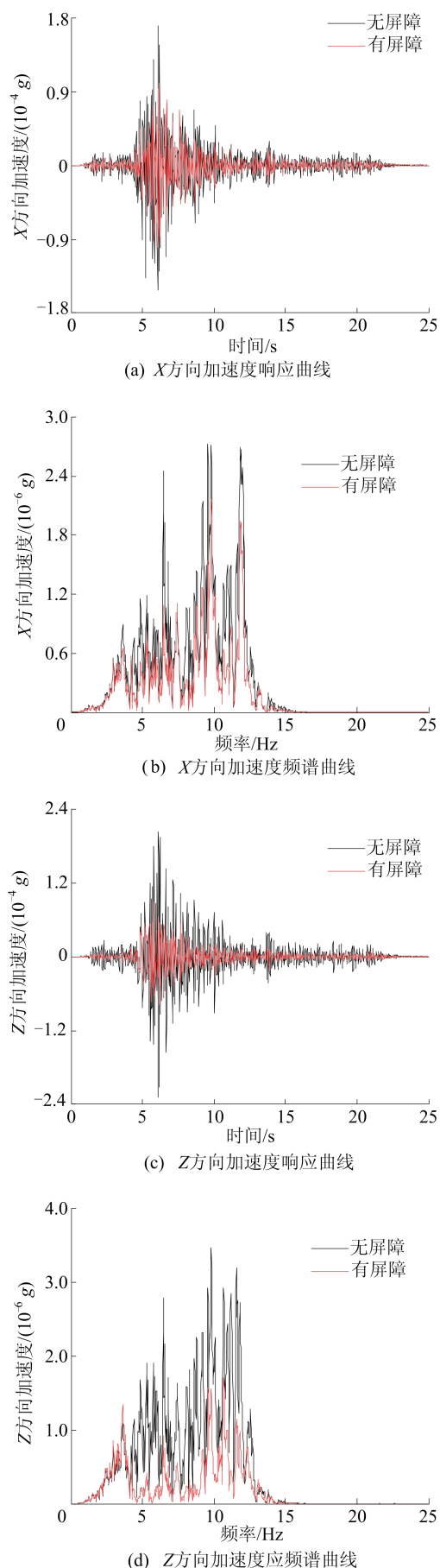


图 15 Saguenay 地震波作用下的加速度响应及其反应谱曲线

4 结 论

1) 蜂窝型周期性结构屏障对处于带隙频率范围内的 Rayleigh 波有较好的衰减效果,带宽衰减总范围达到 5.95 Hz,通过分析特殊点模态和三维模型带隙频率内(7.2 Hz)的位移场,确定产生带隙的原因是柱体的局域共振。

2) 几何参数是影响单胞带隙变化的重要因素,通过合理设计,可以找到适当的几何尺寸产生宽带低频带隙;场地土壤的密度和弹性模量变化也会对带隙产生影响,研究发现高弹低密度的土壤更容易产生宽带低频带隙。通过参数调整可以实现对带隙的调控。

3) 蜂窝型周期性结构屏障对处于带隙范围内的表面波有着很好的衰减作用,其对主频集中在衰减域内的正弦波和 Saguenay 地震波衰减效果更佳。Saguenay 地震波输出端 X、Z 方向峰值加速度衰减分别达 41.4%、61.1%。

4) 蜂窝型周期性超屏障对 7.07~13.02 Hz 主频范围内的地震波有很好的衰减效果,对主频处在衰减域范围外的地震波也有较好的衰减作用,可以为建筑减隔震提供思路。

[参 考 文 献]

- [1] 高健. 周期性排桩在轨道交通隔振中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [2] 姜博龙, 刘维宁, 马蒙, 等. 基于 Bloch-Floquet 理论的周期性排桩在轨道交通隔振中的应用研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(3): 146-152.
- [3] 王颖. 层状周期性结构在地铁隔振中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [4] LIU Z Y, ZHANG X, MAO Y W, et al. Locally resonant sonic materials[J]. Science, 2000, 289: 1734-1736.
- [5] WU T T, WU L C, HUANG Z G. Frequency band-gap measurement of two-dimensional air/silicon phononic crystals using layered slanted finger interdigital transducers[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(9): 167.
- [6] WU T T, HUANG Z G, LIU S Y. Surface acoustic wave band gaps in micro-machined air/silicon phononic structures: the oretical calculation and experiment[J]. Zeitschrift für Kristallographie, 2005, 220: 841-847.
- [7] MINIACI M, KRUSHYNSKA A, BOSIA F, et al. Large scale mechanical metamaterials as seismic shields[J]. New Journal of Physics, 2016, 18(8): 083041.
- [8] 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.

(下转第 720 页)

- squared-error-mse-in. html.
- [25] KINGMA D P, BA J. Adam: a method for stochastic optimization[C]//International Conference on Learning Representations. [S. l. : s. n.], 2015: 23-38.
- [26] OBER P B. Introduction to linear regression analysis[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 2010, 40 (12): 2775-2776.
- [27] HYNDMAN R J, KOEHLER A B. Another look at measures of forecast accuracy[J]. International Journal of Forecasting, 2006, 22(4): 679-688.
- [28] WILLMOTT C, MATSUURA K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance[J]. Climate Research, 2005, 30(1): 79.
- [29] Python Software Foundation. Python language reference, Version 3. 7. 2 [EB/OL]. (2021-05-03) [2023-11-01]. <https://www.python.org>.
- [30] ALZUBAIDI L, ZHANG J, HUMAIDI A J, et al. Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions [J]. Journal of Big Data, 2021(8): 53-127.
- [31] 张然, 柴志勇, 张婷, 等. 基于机器学习模型的洪水预报研究进展[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(11): 89-101.
- [32] 许敏, 胡丽丹. 径向基函数神经网络快速算法及其应用[J]. 统计与决策, 2021, 37(16): 52-56.
- [33] 成睿, 孟广源, 殷瑶, 等. 神经网络 BPNN 模型机器学习方法应用于电化学去除氨氮过程的预测与优化[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2023, 49(2): 202-210.
- [34] 崔晓宁, 王起才, 张戎令, 等. 基于随机森林的高性能混凝土抗压强度预测[J]. 兰州交通大学学报, 2021, 40(6): 1-6, 14.
- [35] KAMAL M M, SAAFAN M, ETMAN Z A, et al. Effect of polypropylene fibers on development of fresh and hardened properties of recycled self-compacting concrete[J]. International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), 2013, 5(2): 86-93.
- [36] WANG W, SHEN A, LYU Z, et al. Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete: a review[J]. Construction and Building Materials, 2021, 296: 123734.
- [37] CENTONZE G, LEONE M, AIELLO M A. Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: a mechanical characterization[J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 46-57.
- [38] WU Z, SHI C, HE W, et al. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 103: 8-14.
- [39] 曹二伟. 混杂纤维混凝土碳化性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.
- [40] 代超. 钢纤维-水泥石基体界面特征及对混凝土宏观性能影响的研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [41] 肖巍. 混凝土强度与耐久性的关系研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 710 页)

- [9] ZHAO C, ZENG C, HUANG H, et al. Preliminary study on the periodic base isolation effectiveness and experimental validation [J]. Engineering Structures, 2021, 226(7): 111364.
- [10] 赵春风, 王胤植, 楚凡, 等. 十字形梯度地震超材料带隙特性与隔震性能研究[J]. 工程力学, 2025, 42(9): 63-75.
- [11] 关春颖, 苑立波. 六角蜂窝结构光子晶体异质结带隙特性研究[J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1244-1247.
- [12] OUDICH M, ASSOUAR M B. Surface acoustic wave band gaps in a diamond-based two-dimensional locally resonant phononic crystal for high frequency applications[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(1): 014504.
- [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.
- [14] 李丽霞, 李鹏国, 贾琪, 等. 新型半埋入式地震超材料超低频带隙机理及性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2023, 55(1): 103-110.
- [15] COLQUITT D J, COLOMBI A, CRASTER R V, et al. Seismic metasurfaces: sub-wavelength resonators and rayleigh wave interaction[J]. Journal of the Mechanics & Physics of Solids, 2016, 99: 379-393.
- [16] XU R, MUZAMIL M, FAN L, et al. Broadband seismic metamaterial with an improved cylinder by introducing plus-shaped structure[J]. Europhysics Letters, 2021, 133(3): 37001-37006.
- [17] LIU Y F, HUANG J K, LI Y G, et al. Trees as large-scale natural metamaterials for low-frequency vibration reduction [J]. Construction and Building Materials, 2019, 199(2): 737-745.

(责任编辑 吴 亮)