

十字分形地震超材料隔震性能

石南南, 亢志宽, 罗方慧, 刘 晗, 王利辉, 赵 卓
(北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为了解决基于表面波理论的地震超材料带隙窄的问题, 设计了一种基于十字分形柱的低频宽带隙地震超材料, 并通过数值模拟计算其频散曲线, 发现三阶十字分形地震超材料的相对带宽高达 60%。对不同阶数十字分形地震超材料的频散曲线进行比较研究, 以阐明分形地震超材料带隙扩展的机理。通过材料参数分析, 研究不同材料参数对带隙宽度及位置的影响。为验证所设计的地震超材料对实际地震波的屏蔽效果, 进行频域和时域分析。通过对 El Centro 地震波和 Taft 地震波的瞬态动力学分析发现, 三阶十字分形地震超材料可以将 2 种地震表面波位于带隙频率范围内的加速度幅值降低 50% 以上, 具有良好的隔震性能。

关键词: 地震超材料; 十字分形结构; 地震表面波; 带隙; 隔震; 透射谱

中图分类号: TU 352

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2023)01-0033-11

doi: 10.11936/bjtxb2021110024

Seismic Isolation Performance of Cross-fractal Seismic Metamaterials

SHI Nannan, KANG Zhikuan, LUO Fanghui, LIU Han, WANG Lihui, ZHAO Zhuo

(Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To solve the problem of the narrow band gap of seismic metamaterials based on surface wave theory, a low-frequency and wide-bandgap seismic metamaterial based on cross fractal columns was designed in this paper, and the dispersion curve of the designed structure was calculated by numerical simulation. It is found that the relative band gap width of the third-order cross-fractal seismic metamaterial is as high as 60%. The dispersion curve of cross-fractal metamaterials of different orders was comparatively studied to clarify the mechanism of the band gap expansion of fractal seismic metamaterials. Through material parameter analysis, the influence of different material parameters on the width and position of the band gap was studied. To verify the shielding effect of the designed seismic metamaterial against actual seismic waves, time-domain and frequency-domain analyses were carried out. Through the transient dynamic analysis of El Centro seismic wave and Taft seismic wave, it is found that the third-order cross-fractal seismic metamaterial can reduce the acceleration amplitude of the two seismic surface waves in the band gap frequency range by more than 50%, which indicates that it has good isolation seismic performance.

Key words: seismic metamaterial; cross fractal structure; seismic surface wave; band gap; seismic isolation; transmission spectrum

收稿日期: 2021-11-22; 修回日期: 2022-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708008)

作者简介: 石南南(1984—), 女, 高级实验师, 主要从事地震超材料设计与应用方面的研究, E-mail: snn@bjut.edu.cn

通信作者: 亢志宽(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事地震超材料设计与隔震性能方面的研究, E-mail: kangzk@emails.

bjut.edu.cn

根据2021年中国地震台网最新数据显示,全球最近1年内发生6级以上地震130余次.地震所造成的灾害是所有灾害当中影响最大的.地震发生时,地震波携带的能量从震源向四面八方传播,其中地震面波的频率为0.1~20.0 Hz^[1],正好对应大多数建筑的共振基频^[2-3],从而造成建筑物的倒塌.传统抗震控制的方法包括结构抗震、基础隔震和消能减震等.然而这些方法都存在一个共同点,即对低频地震表面波(0.1~20.0 Hz)难以控制或隔离.地震超材料的出现为抗震保护提供了新思路,可以在不改变原结构形式基础上,有效控制和衰减地震波^[4].

地震超材料是一种人工设计的周期性排列结构,具有带隙特性^[5-8].位于带隙范围内的地震波无法通过所设计的地震超材料.将其布置在建筑周围,沿建筑物环向布置,可以衰减任意方向的地震波.2014年,Brülé等^[9]通过钻孔、布孔的实验发现这种地震超材料对特定频率50 Hz的地震波有良好衰减效果,因此拉开地震超材料研究的序幕.此后许多学者对地震超材料进行广泛研究.目前,地震超材料根据不同的划分角度有许多种分类方式^[10-13].根据其带隙机理^[14]划分,地震超材料主要分为布拉格散射型和局域共振型.布拉格散射型地震超材料的特征主要为结构尺寸与地震波波长尺寸相近,主要依靠结构的周期性.研究初期,很多学者研究了这类地震超材料对地震波的屏蔽效果^[15-17].然而地震波波长覆盖十几米到几十米,限制了这类地震超材料的应用范围.局域共振型地震超材料的结构尺寸可以比地震波尺寸小2~3个数量级,使得局域共振型地震超材料的研究广受欢迎.然而这类地震超材料存在带隙窄的问题^[18].为拓宽带隙,学者们提出“彩虹陷阱”^[19-20]、H分形结构^[21]、套娃结构^[22]和加形结构^[23]等结构形式.基于半空间的工字型钢^[24]和组合型钢^[25]等新型结构对瑞利波具有明显衰减效果.此外,在结构的组成中选择贫铀^[26]或拉涨泡沫^[27]等特殊材料来代替钢或橡胶也可以带来巨大的相对带宽.森林树木是一种天然的地震超材料^[28-29], Muhammad等^[30]进一步分析了树枝在瑞利波衰减中的作用.基于自然界中土壤为分层形式这一事实,一些学者^[31-32]研究了土壤分层对地震超材料隔震屏蔽性能的影响.地震超材料不仅可以用于保护常规建筑物和构筑物,而且还可以用于铁路隔震方面^[33].目前,地震超材料的研究虽已取得很多成就,但其距离广泛应用还有很长的路要走.

为解决基于表面波理论的地震超材料带隙窄的问题,本文基于分形结构的自相似性,设计了一种低频宽带隙十字分形地震超材料.通过数值模拟计算了所设计结构的频散曲线,以获得带隙范围.对不同阶数的十字分形地震超材料的能带结构进行比较研究,以阐明分形地震超材料带隙扩展的机理.通过材料参数分析,研究材料参数对带隙宽度及位置的影响.为验证所设计结构对地震表面波的屏蔽效果,进行频域和时域分析,发现三阶十字分形地震超材料可以将El Centro波和Taft波位于频率范围内的加速度幅值降低50%以上.本文为地震超材料的设计提供了研究思路,进一步推动了地震超材料的工程应用.

1 模型与方法

1.1 模型简介

分形结构具有良好的自相似性,以此为出发点,设计了一种具有宽带隙的十字分形结构.图1为3种不同阶数十字分形地震超材料单胞示意图,其中上部结构材质为钢,下部为土壤.一阶十字分形地震超材料由相互垂直的长方体型钢构成.相邻单胞结构中心间的距离称为周期常数 a ,钢板长度、厚度和高度分别用 L 、 t 和 h 表示.为模拟地球半无限场地条件,在已有研究中通常会设置 $10a$ 或 $15a$ 的基底土壤.本文基底土壤厚度取 $H = 20a$.二阶十字分形结构以一阶结构为基础,距质心 $L/3$ 处,布置长度为 $L/3$ 的钢板.再次布置的小型钢板以距离质心 $L/3$ 处为中心.三阶十字分形结构是在二阶结构的基础上,在每块钢板的最外侧布置长度为 $L/6$ 的钢板.最后布置的小型钢板以最外侧位置为中心.

1.2 材料和方法

1.2.1 材料参数

从应用的角度出发,选用普通建筑材料作为设计地震超材料的原材料,如钢、土壤等.地震超材料基本单元的材料特性见表1,这些材料参数是钢材和土壤的常用参数.

1.2.2 计算方法

在本研究中,假设材料是线弹性、均质和各向同性的.第1个不可约布里渊区的方向如图2箭头包围的三角形区域所示.单胞的4个垂直面设置Floquet周期性边界条件,以模拟周期性结构.单胞底部设置固定约束,顶部设置自由边界条件.使用有限元软件COMSOL Multiphysics通过沿 Γ -X-M- Γ

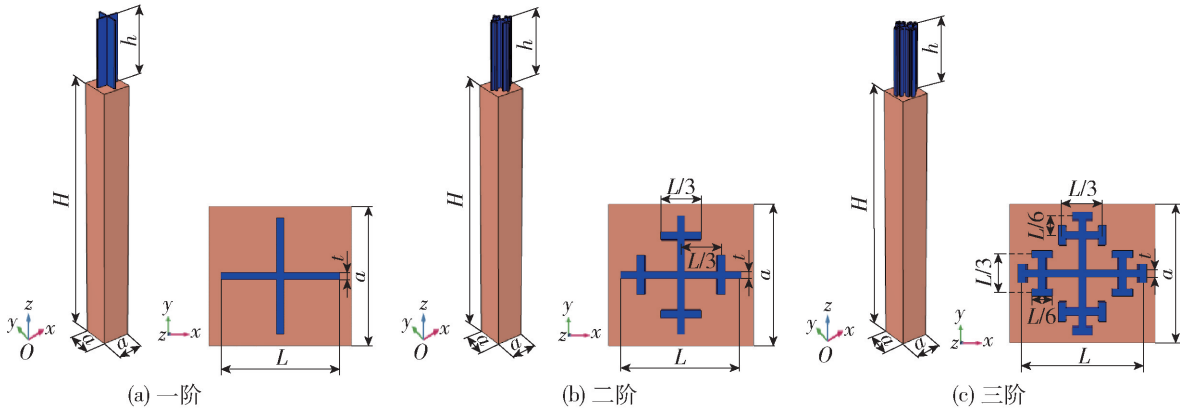


图1 3种不同阶数十字分形地震超材料单胞模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three different orders of cross-fractal seismic metamaterial unit cell model

扫描波矢量可以获得频散曲线. 通过分析, 可以获得与模态位移场有关的特征值和特征向量.

表1 材料参数^[21]

Table 1 Material parameters^[21]

项目	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性 模量/Pa	泊松比
钢	7 784	2.07×10^{11}	0.3
土壤	1 800	2.00×10^7	0.3

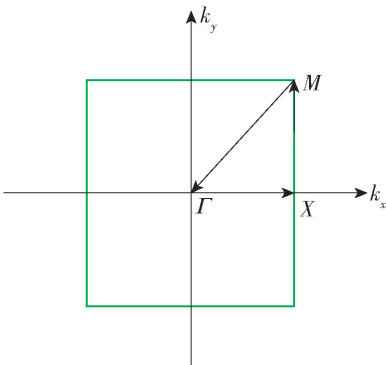


图2 方格周期复合材料的第一不可约布里渊区: $\Gamma = (0, 0)$, $X = (\pi/a, 0)$, $M = (\pi/a, \pi/a)$

Fig. 2 First irreducible Brillouin zone for the periodic composites with square lattice: $\Gamma = (0, 0)$, $X = (\pi/a, 0)$, and $M = (\pi/a, \pi/a)$

2 结果与讨论

2.1 十字分形结构频散曲线

图3(a)~(c)展示了3种不同阶数的地震超材料频散曲线, 声锥曲线外侧被标记为深灰色区域, 表面波模式位于声锥曲线内部, 而体波模式位于声锥曲线外部. 表面波全带隙是地震超材料具有的一种

特性, 位于全带隙范围内的表面波无法通过所设计的周期性结构, 图3中全带隙范围被标记为浅灰色区域. 对于一阶十字分形结构, 如图3(a)所示, 在0.52~1.00 Hz的低频范围内出现了一个很窄的带隙, 而在11.00~16.37 Hz高频范围内出现了一个宽带隙. 对于二阶地震超材料如图3(b)所示, 2个带隙的范围为0.42~1.27 Hz和9.46~16.37 Hz. 可以发现, 第1带隙宽度由于上边缘稍微向上偏移, 下边缘稍微向下偏移而略有增加, 而第2带隙宽度明显增加, 这是因为第2带隙下边缘的第6个频带向较低频率偏移. 对于三阶地震超材料, 如图3(c)所示, 2个带隙范围为0.43~0.96 Hz和8.81~16.37 Hz. 与二阶地震超材料相比, 三阶十字分形结构第1带隙宽度由于带隙上边界稍微向下偏移而略有减小, 第2带隙宽度由于带隙下边界明显向下偏移而显著增加. 相对带宽是描述带隙的重要参数, 定义为 $2(f_u - f_l)/(f_u + f_l)$, 其中 f_u 和 f_l 分别是带隙上下边界的频率. 发现一阶十字分形地震超材料全带隙相对带隙宽度约为40%, 二阶相对带隙宽度约为55%, 三阶相对带隙宽度约为60%. 随着十字分形结构阶数的不断增加, 总带宽和相对带隙宽度逐渐增加, 且高频带隙(第2带隙)的中心频率下降. 可以将振动简化为弹簧-质量模型, 随着阶数的不断增加, 等效刚度和等效质量都在逐渐增加. 根据 $f = \sqrt{(K_e/M_e)}/2\pi$, 其中 K_e 为等效刚度, M_e 为等效质量, 等效质量增加的速度大于等效刚度增加的速度时, 结构的频率逐渐降低, 而声锥曲线不变. 这使得频带逐渐下移, 从而使得带隙中心频率减小, 带隙宽度增大.

2.2 振动模态

3个阶数十字分形地震超材料的频散曲线中,

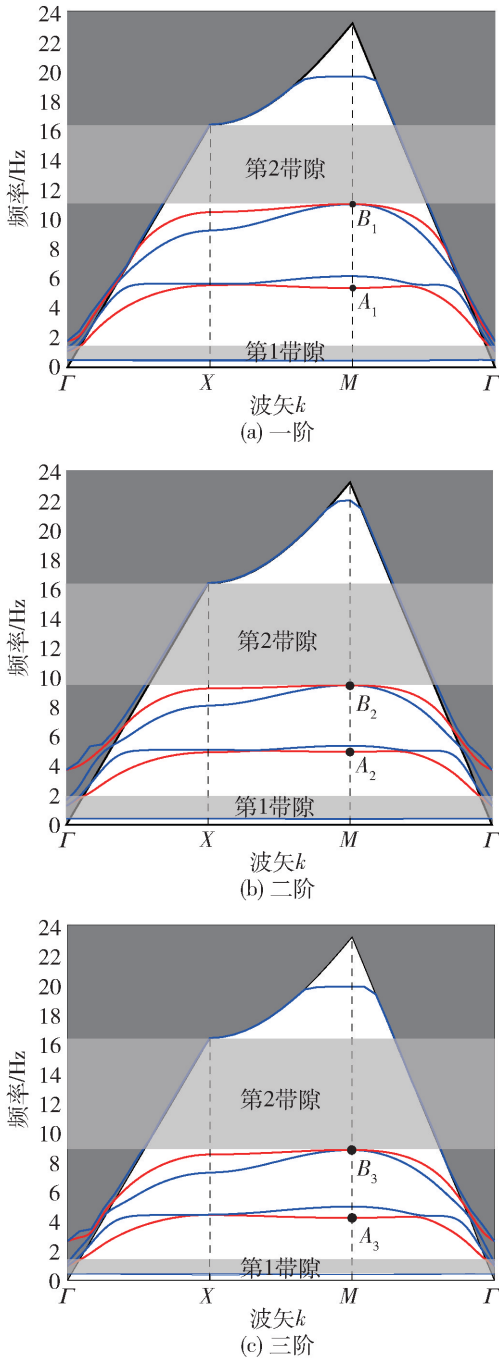


图3 3种不同阶次的十字分形地震超材料频散曲线

Fig. 3 Dispersion curves of cross-fractal seismic metamaterials of three different orders

所有能带向低频移动,而且能带宽度与分形阶数同向变动。这些能带主要为柱的谐振模式,并具有平面偏振特性。为了探索分形阶数对频散曲线的影响,重点分析了图3中特殊标注的振动模态。因为它们的位置发生了显著变化,并在改变带隙的宽度方面发挥重要作用。 A 点所在能带主要控制第1带隙上边界, B 点所在能带主要控制第2带隙下边界。

在图4中的振动本征模式图中,从蓝色到红色,振动位移逐渐变大。小箭头表示特征频率的位移矢量,其长度和方向表示位移矢量的幅度和方向。

对于一阶十字分形地震超材料,如图4(a)(b)所示, A_1 点的振动模式中的小箭头表明柱子在平面上顺时针旋转,而且振动主要位于十字分形结构的4个端面。十字分形支柱围绕中心旋转,同时支柱体积膨胀。这进一步证明了它是一种局域共振模式。 B_1 点的振动模式中,柱子顶部和底部沿着相反的方向振动。其中,柱子底部沿 xy 平面与 x 轴呈负 45° 方向振动,振动主要发生在柱子底部,而柱子上部沿 xy 平面与 x 轴呈 135° 方向振动。对于二阶十字分形地震超材料,图4(c)(d)所示 A_2 和 B_2 点的振动方向分别与 A_1 点和 B_1 点类似。 A_2 点与 A_1 点主要区别是振动主要集中在小尺寸的十字分形柱上,而不仅仅是一阶的十字形结构的4个端面上。这也解释了第3个谐振能带转换到较低的频率。类似,图4(d)所示 B_2 点的振动模式与 B_1 点的振动相似,振动同样主要集中在柱子底部。对于三阶十字分形地震超材料,图4(e)所示 A_3 点的振动模式中,小箭头表明在平面内逆时针绕支柱中心旋转,同时支柱体积膨胀,这与 A_1 和 A_2 的振动方向相反,这也解释了第3个谐振能带转换到较高的频率。图4(f)所示 B_3 点的振动模式与上述 B_1 、 B_2 点振动方向均不同,柱子底部沿 xy 平面与 x 轴呈 45° 方向斜向上振动,振动主要集中在柱子底部,而柱子顶部与底部振动方向相反。随着分形阶数的逐渐增加,主要振动从大分形结构逐渐向较各分支柱转移,这可能导致带隙的宽度逐渐增大。

2.3 频域分析

为了验证所设计地震超材料对地震表面波的屏蔽效果,以三阶十字分形结构为例,进行了频域分析,计算表面波传播的透射谱以验证结构的频散曲线。图5(a)为三阶十字分形结构透射谱计算模型。作为激发表面波的线震源被施加在基底表面的线震源 A 处。线震源 A 沿 xz 极化方向设置初始位移以产生瑞利波,这是将面波引入系统的一种常见而简单的方法^[22-24]。同时,将频率从0.1 Hz扫描到24 Hz,扫描步长为0.1 Hz,进行逐步的频率分析。然而,如果震源距离地震超材料很近,当震源产生面波时,会导致激发一种类似于体波的消逝波,这可能会影响地震超材料对表面波的衰减结果。这主要是由于表面波沿着表面传播,而体波也沿着 x 方向传播到基底内部。因此这里将地震超材料的第1个结构

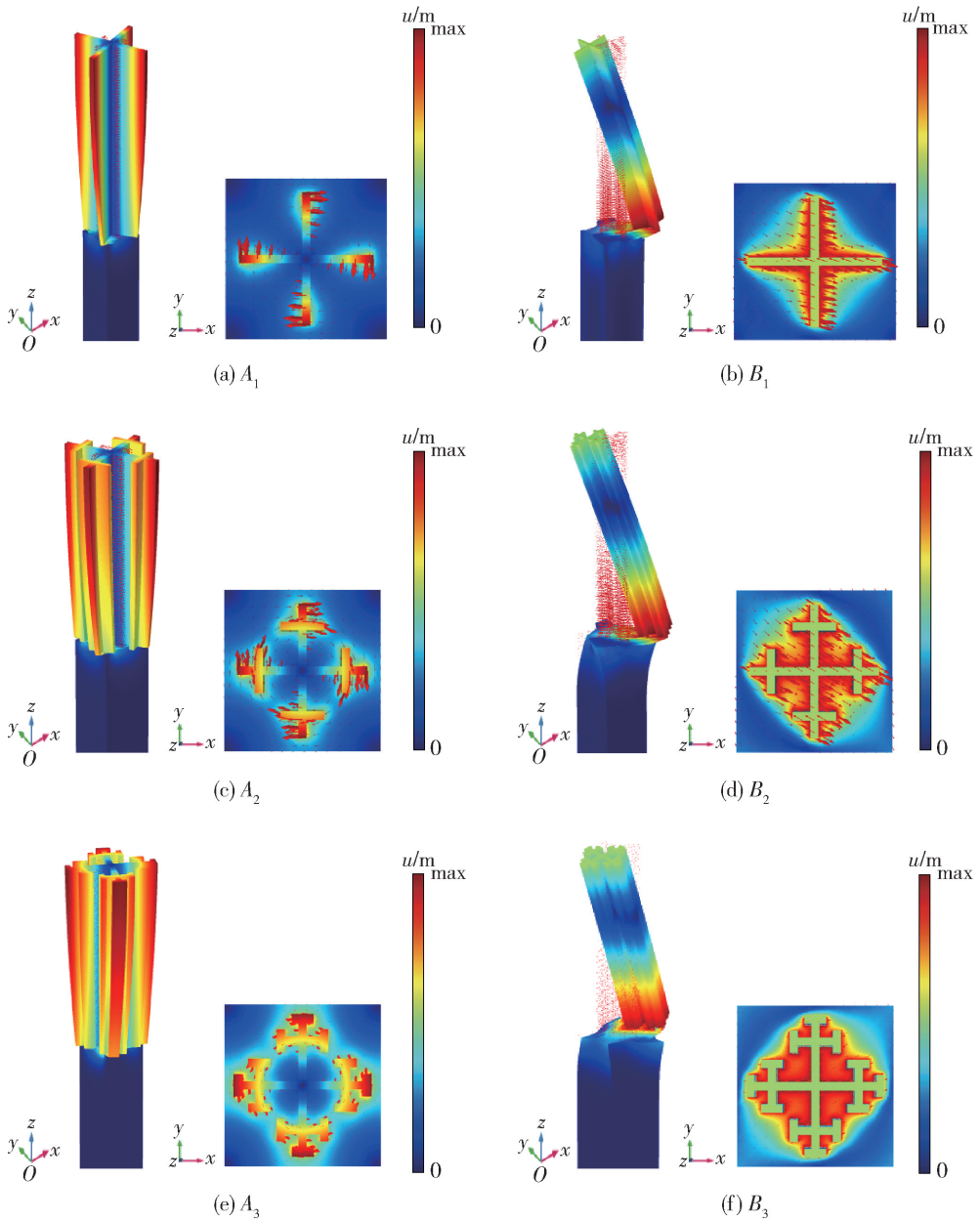


图 4 频散曲线中各标注点对应的振动模式

Fig. 4 Vibration modes corresponding to each marked point in the dispersion curve

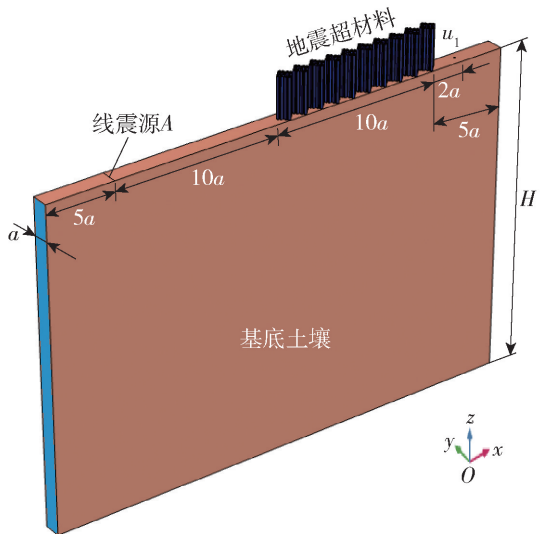
单元与线震源 A 之间的距离设置为 $10a$. 距离足够远, 使得地震超材料只受表面波的影响. 该模型沿 y 方向设置周期性边界条件来模拟周期结构. 如图 5(a) 中蓝色区域所示, 在基底模型的两侧和底部设置低反射边界条件, 以防止产生的地震波在边界处反射. 10 排三阶十字分形结构在距线震源 $10a$ 处布置, 线源 A 距离基底土壤左侧边界 $5a$. 透射系数被定义为 $20 \times \lg(u_1/u_0)$, 由该公式计算三阶结构的透射谱, 其中, u_1 为结构后方 $2a$ 处拾取点的位移幅值, u_0 为无结构时相同点的位移幅值.

如图 5(b) 所示, 灰色阴影区代表衰减域, 透射

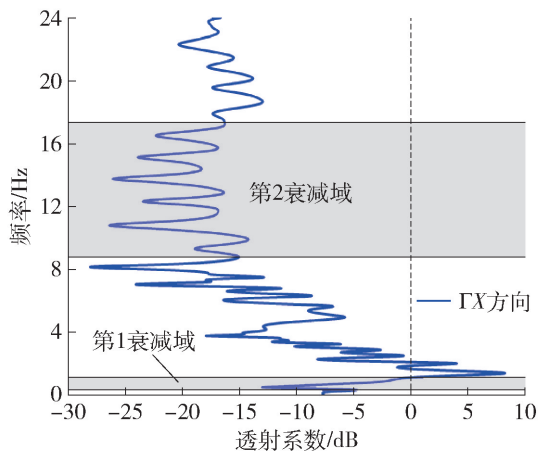
谱计算结果表明, 在 $0.4 \sim 1.1 \text{ Hz}$ 和 $8.8 \sim 17.2 \text{ Hz}$ 之间形成了 2 个明显的波衰减域. 这与图 3(c) 中计算的频散曲线的全带隙范围基本一致. 通过频散曲线和透射谱计算结果的相互验证, 再次说明所设计的三阶十字分形结构对于 2 个特定频段地震表面波衰减的准确.

2.4 材料参数分析

以三阶十字分形结构为例, 首先考虑钢的弹性模量和密度对带隙演化的影响. 其中钢的弹性模量和质量密度分别用 E_{st} 和 ρ_{st} 表示, 并且通常分别在 $100 \sim 300 \text{ GPa}$ 和 $4\,000 \sim 11\,000 \text{ kg/m}^3$ 范围内变



(a) 计算模型



(b) 透射谱

图5 三阶十字分形地震超材料透射谱

Fig. 5 Third-order cross-fractal seismic metamaterial transmission spectrum

化^[21]. 泊松比和所有几何参数保持不变.

E_s 对带隙的影响如图6(a)所示,其中红色、蓝色和青色分别代表第1、第2和第3带隙宽度. 模拟结果表明,当 E_s 发生变化时,第1带隙上下边界基本保持不变. 对于第2带隙,当 E_s 从100 GPa增加到150 GPa时,由于上边界向更高的频率移动,而下边界基本保持不变,其宽度变大. 同时,第3带隙由于下边界上移和上边界受声锥曲线的限制,其带隙宽度变窄. 当 E_s 达到150 GPa时,第3带隙关闭,第2带隙上下边界基本不变. 第3带隙消失是由于 E_s 的增加,导致振动模态上移至声锥曲线外. 值得注意的是, E_s 在总带隙宽度中并没有起到很大的作用. ρ_{st} 对带隙的影响如图6(b)所示. 2个带隙下边界总体趋势均为下降,第1带隙上边界只是略有下降,第2带隙上边界由声锥曲线决定,而声锥曲线是

固定的,因此第2带隙上边界基本保持不变. 当 ρ_{st} 上从4 000 kg/m³增加到11 000 kg/m³时,第1、第2带隙变宽,并向低频移动,其中心频率均下移,带隙总宽度在逐渐增大,这主要是由于第1、第2带隙下边界下移到更低位置引起的. 这些结果表明,总带隙宽度随着十字分形结构 ρ_{st} 的增加而变宽. 这与总带隙随着分形阶数的增加而变宽的机理类似.

此外,考虑了土壤的弹性模量和密度对带隙的影响. 其中土壤的杨氏模量和质量密度分别用 E_s 和 ρ_s 表示,并且通常分别在1~90 MPa和1 400~2 400 kg/m³范围内变化^[21]. E_s 对带隙的影响如图6(c)所示,结果表明,当 E_s 从1 MPa增加到90 MPa时,第1带隙宽度略有增大,中心频率略有上移. 而第2、第3带隙会迅速移动到更高频率范围. 值得注意的是,总带隙宽度会随着 E_s 的增加而显著增大. 相反, ρ_s 对带隙的影响如图6(d)所示,当 ρ_s 从1 400 kg/m³增加到2 400 kg/m³时,第1带隙基本保持不变,第2带隙变窄,并且中心频率稳定地移动到较低的频率. 带隙的演变趋势表明,土壤的材料参数对带隙的位置和宽度有更重要影响. 这些结果还表明,可以通过改变建筑场地的土壤环境,以获得所需的带隙宽度和位置.

2.5 地震波屏蔽效果分析

为验证所设计的十字分形地震超材料对实际地震波的屏蔽效果,模拟了三阶十字分形结构分别对El Centro地震波^[34-35]和Taft地震波^[36-37]的加速度-时间响应,瞬态动力分析的计算模型与图5(a)所示的频域分析计算模型一致. 图7(a)为El Centro地震波的加速度-时程,加速度谱如图7(b)所示,其主频位于8~12 Hz,主频范围在三阶十字分形结构的第2条带隙范围内. 图8(a)所示为Taft地震波的加速度-时程,加速度谱如图8(b)所示,其主频位于1~5 Hz,上述主频范围在结构带隙范围外. 图9为在El Centro地震波作用下x方向和z方向的时域加速度响应. 与不设置十字分形结构相比,设置结构后,x方向的加速度最大值降低55.65%,z方向加速度最大幅值降低66.08%. 图10为在Taft地震波作用下的x方向和z方向的时域加速度响应. 与不设置十字分形结构相比,设置结构后,x方向加速度最大值降低42.24%,z方向加速度最大值降低44.75%. 可以发现,三阶十字分形结构对El Centro地震表面波的隔震性能更好,加速度最大值降低50%以上,同样具有隔震效果的还有H型分形结构^[38].

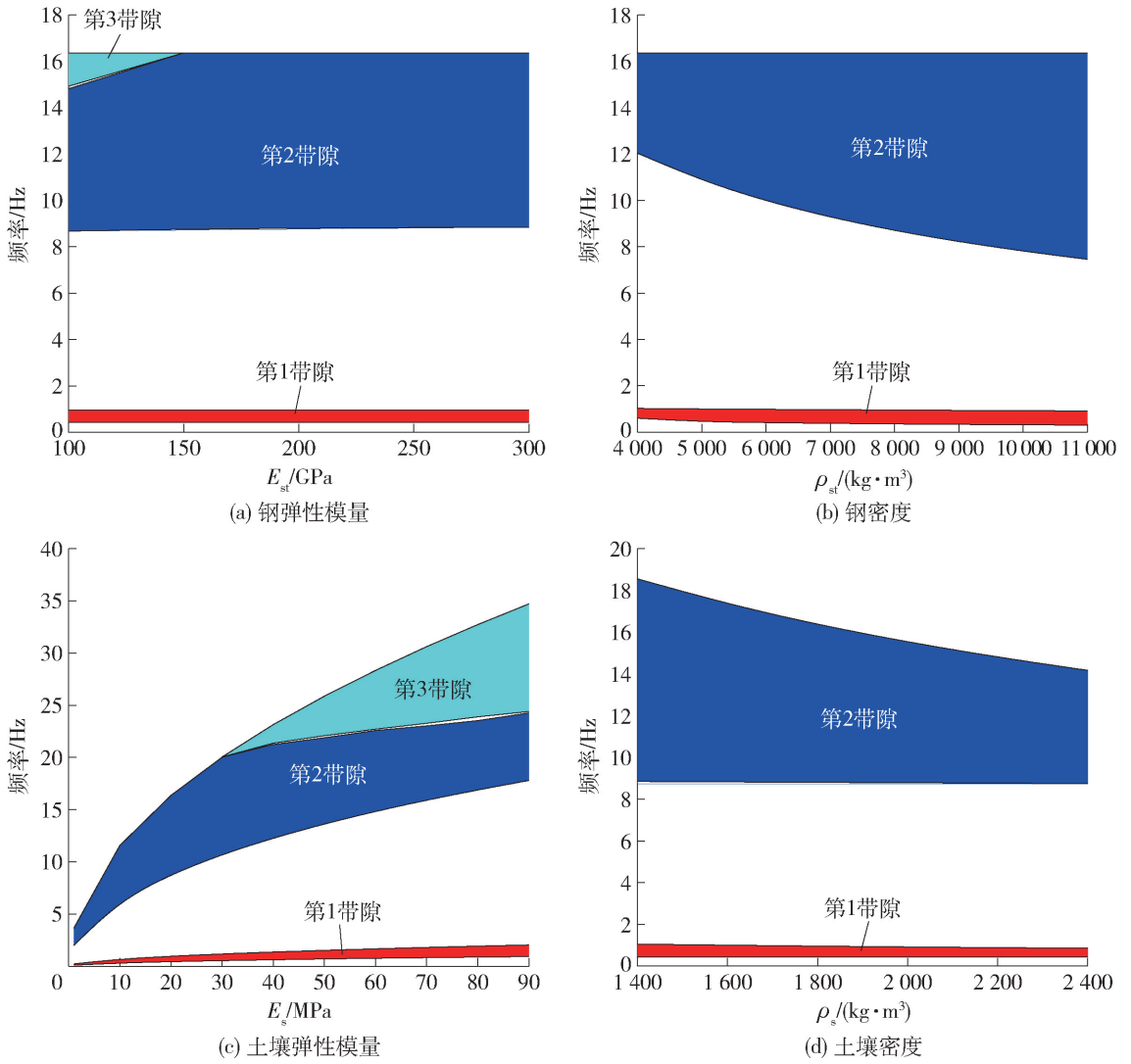


图6 材料参数分析

Fig. 6 Material parameter analysis

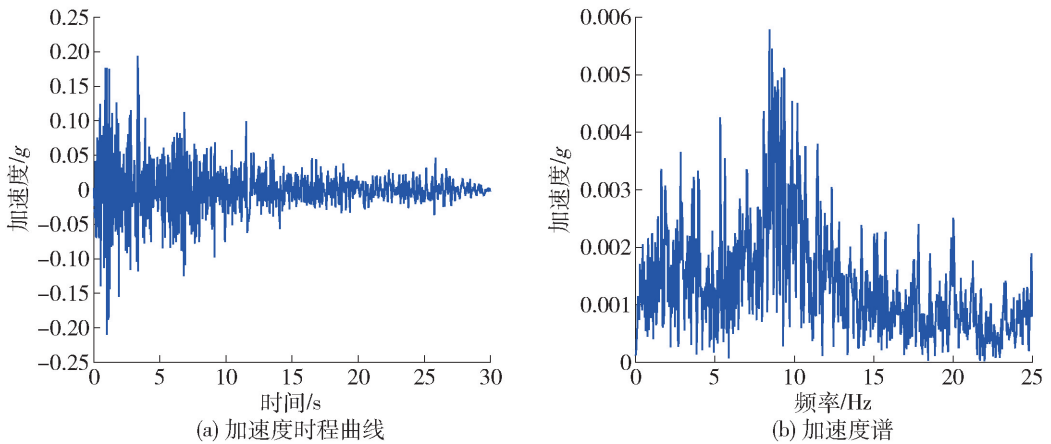


图7 El Centro 地震波

Fig. 7 El Centro seismic waves

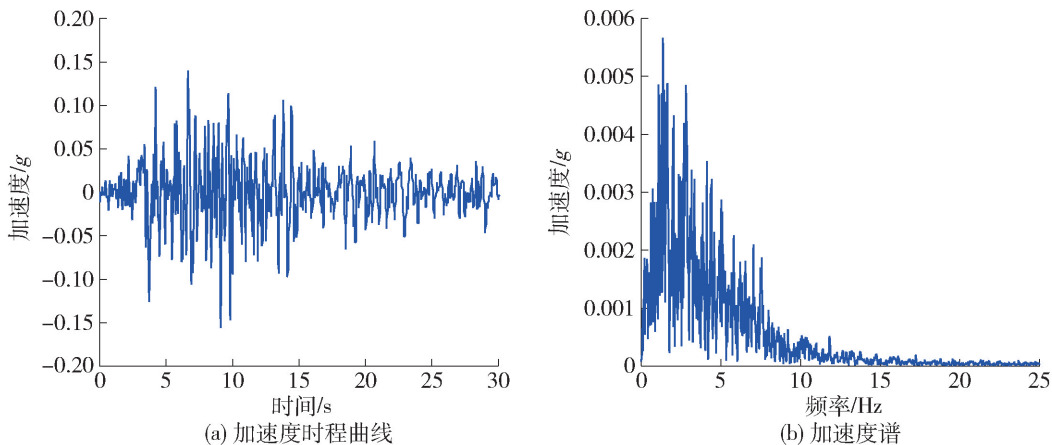


图8 Taft地震波

Fig. 8 Taft seismic waves

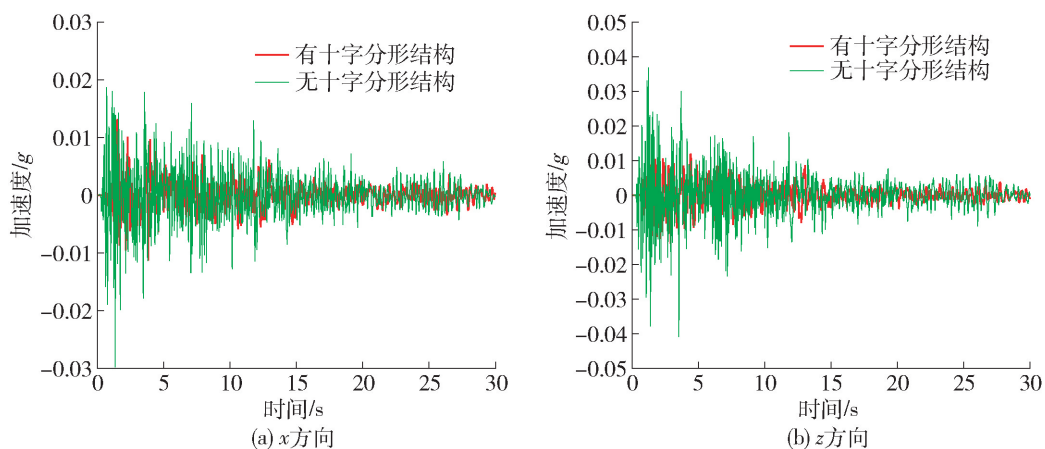


图9 El Centro地震波时域加速度响应

Fig. 9 El Centro seismic waves time-domain acceleration responses

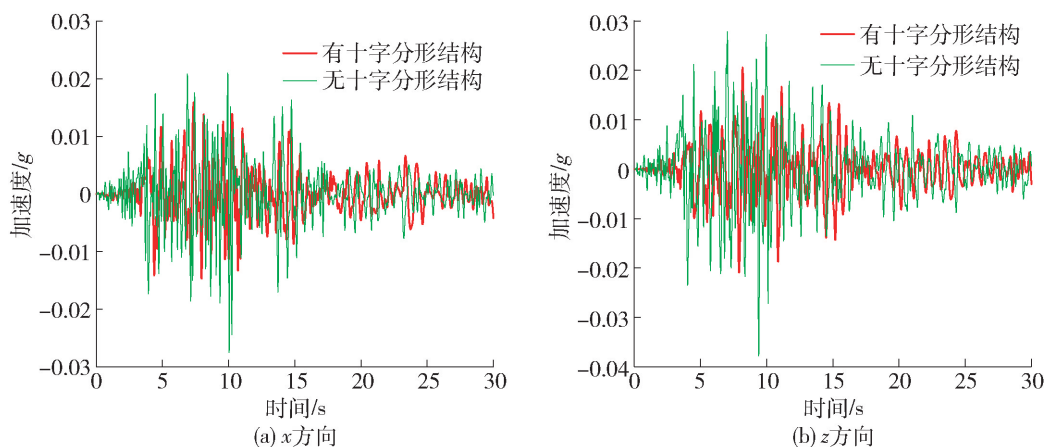


图10 Taft地震波时域加速度响应

Fig. 10 Taft seismic waves time-domain acceleration responses

为进一步分析上述差异的原因,以上述2种地震波的 z 方向加速度响应为例,通过傅里叶变换,分

析结构对不同频率地震表面波的隔震性能.图11为2种地震表面波加速度响应对应的傅里叶谱,灰

色阴影区代表三阶十字分形地震超材料的2个带隙频率范围.如图11(a)所示,El Centro地震波的主频范围与十字分形结构的第2条带隙范围基本重合,因此,加速度最大幅值降低54.92%.相反,如图11(b)所示,Taft地震波的主频范围在带隙之

外,因此其加速度最大幅值基本没有降低.但在灰色阴影区所示的带隙频率范围内2种地震波的加速度幅值均降低50%以上,再次说明三阶十字分形结构对带隙频率范围内的地震表面波具有良好的隔震效果.

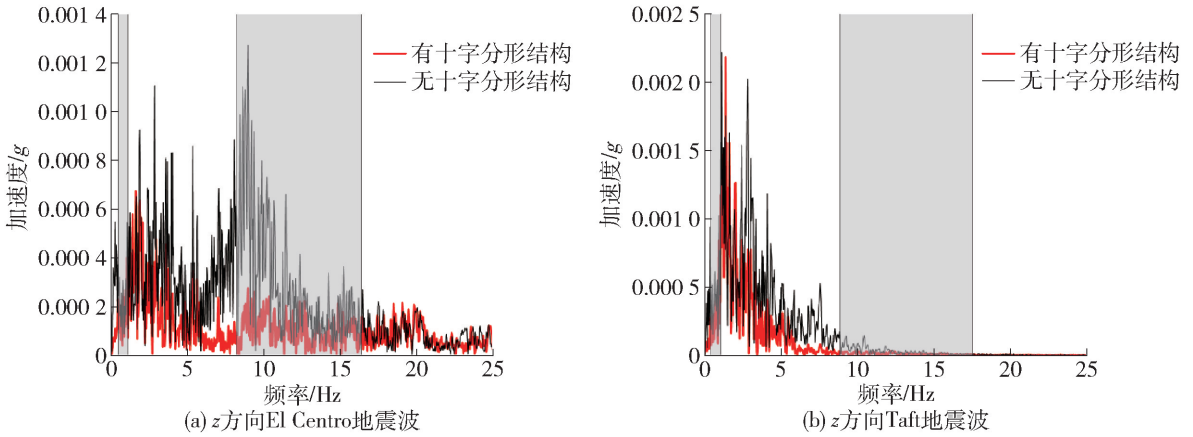


图11 傅里叶谱

Fig. 11 Fourier spectra

3 结论

针对局域共振地震超材料带隙窄的问题,本文提出一种十字分形地震超材料.通过数值模拟,计算了不同阶数十字分形地震超材料的频散曲线,进一步分析了三阶十字分形地震超材料的透射谱和材料参数分析.通过对实际地震波的时域分析,计算了有限排三阶十字分形结构的隔震性能.通过分析,可以得出以下结论:

1) 设计的十字分形地震超材料的相对带隙宽度高达60%.随着结构阶数的不断增大,相对带隙宽度逐渐增大,三阶十字分形地震超材料的相对带隙宽度将达到60%.同时,以三阶十字分形地震超材料为例,透射谱计算结果与频散曲线计算结果基本吻合.

2) 土壤弹性模量的变化对十字分形结构的带隙宽度和中心频率位置影响最大.通过材料参数分析,具体计算了钢的密度、弹性模量和土壤的密度、弹性模量等材料参数的变化对三阶十字分形结构带隙宽度的影响.其中,土壤弹性模量对十字分形结构的带隙宽度和中心频率位置的影响最大.随着土壤弹性模量的增加,第1带隙上下边界增长缓慢,第2、第3带隙的上下边界增长快速,带隙的总宽度在逐渐增加.这表明可以通过改变建筑场地的土壤环境,以调整目标带隙的宽度和位置.

3) 隔震性能良好.通过瞬态动力学分析发现,

设置三阶十字分形地震超材料后,主频位于带隙范围内的El Centro地震表面波加速度最大值和幅值均降低50%以上,而Taft地震表面波的加速度幅值基本未降低,但在带隙频率范围内2种地震波的加速度幅值均降低50%以上.这再次说明三阶十字分形结构对带隙频率范围内的地震表面波有良好的屏蔽效果.

参考文献:

- [1] MINIACI M, KRUSHYNSKA A, BOSIA F, et al. Large scale mechanical metamaterials as seismic shields[J/OL]. *New Journal of Physics*, 2016; 083041 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1088/13672630/18/8/083041>.
- [2] ACHAUI Y, UNGUREANU B, ENOCH S, et al. Seismic waves damping with arrays of inertial resonators [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2016, 8: 30-37.
- [3] CHOPRA A. *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering* [M]. Englewood Cliffs, New Jersey, America: Prentice-Hall, 1995: 6-38.
- [4] ZENG Y, PENG P, DU Q J, et al. Subwavelength seismic metamaterial with an ultra-low frequency bandgap[J/OL]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128 (1): 014901 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1063/1.5144177>.
- [5] MESEGUER F, HOLGADO M, CABALLERO D, et al. Rayleigh-wave attenuation by a semi-infinite two-dimensional elastic-band-gap crystal[J]. *Physical Review B*, 1999, 59(19): 12169-12172.

- [6] LAUDE V, WILM M, BENCHABANE S, et al. Full band gap for surface acoustic waves in a piezoelectric phononic crystal [J/OL]. *Physical Review E*, 2005, 71 (3): 036607 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.036607>.
- [7] 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/OL]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97 (9): 094916 [2021-11-22]. <https://www.researchgate.net/publication/228352048>. DOI:10.1063/1.1893209.
- [8] KHELIF A, AOUBIZA B, MOHAMMADI S, et al. Complete band gaps in two-dimensional phononic crystal slabs [J/OL]. *Physical Review E*, 2006, 74(4): 046610 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.74.046610>.
- [9] BRÛLÉ S, JAVELAUD E, ENOCH S, et al. Experiments on seismic metamaterials: molding surface waves [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(133901): 1-5.
- [10] MUHAMMAND, LIM C W. From photonic crystals to seismic metamaterials; a review via phononic crystals and acoustic metamaterials [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021 (29): 1137-1198.
- [11] BRÛLÉ S, ENOCH S, GUENNEAU S. Emergence of seismic metamaterials: current state and future perspectives [J/OL]. *Physics Letters A*, 2020, 384 (1): 126034 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2019.126034>.
- [12] MU D, SHU H S, ZHAO L, et al. A review of research on seismic metamaterials [J/OL]. *Advanced Engineering Materials*, 2020(22): 1901148 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1002/adem.201901148>.
- [13] 石南南, 亢志宽, 邵伟昂, 等. 地震超材料的应用与研究进展 [J]. *功能材料*, 2019, 50(9): 9019-9026. SHI N N, KANG Z K, SHAO W A, et al. Application and research progress of seismic metamaterials [J]. *Functional Materials*, 2019, 50 (9): 9019-9026. (in Chinese)
- [14] 陈振宇, 林志华, 施帆. 地震超材料: 从自然结构到新型人工结构 [J]. *科学通报*, 2022, 67(12): 1264-1278. CHEN Z Y, LIM C W, SHI F. A review on seismic metamaterials: from natural to artificial structures [J]. *Chin Sci Bull*, 2022, 67 (12): 1264-1278. (in Chinese)
- [15] CHENG Z B, SHI Z F. Vibration attenuation properties of periodic rubber concrete panels [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50: 257-265.
- [16] DU Q J, ZENG Y, HUANG G L, et al. Elastic metamaterial-based seismic shield for both Lamb and surface waves [J/OL]. *AIP Advances*, 2017, 7 (7): 075015 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1063/1.4996716>.
- [17] ZHANG K, LUO J, HONG F, et al. Seismic metamaterials with cross-like and square steel sections for low-frequency wide band gaps [J/OL]. *Engineering Structures*, 2021, 232: 111870 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111870>.
- [18] KRÖDEL S, THOMÉ N, DARAIO C. Wide band-gap seismic metastructures [J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2015, 4: 111-117.
- [19] COLOMBI A, COLOQUITT D, ROUX P, et al. A seismic metamaterial: the resonant metawedge [J/OL]. *Scientific Reports*, 2016, 6, 27717 [2021-11-22]. <https://www.nature.com/articles/srep27717>. DOI: 10.1038/srep27717.
- [20] WU X, WEN Z, JIN Y, et al. Broadband rayleigh wave attenuation by gradient metamaterials [J/OL]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 205 (6): 106592 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106592>.
- [21] DU Q J, ZENG Y, XU Y, et al. H-fractal seismic metamaterial with broadband low-frequency bandgaps [J/OL]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51: 15104 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aaaac0>.
- [22] ZENG Y, XU Y, YANG H, et al. A Matryoshka-like seismic metamaterial with wide band-gap characteristics [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2020, 185/186: 334-341.
- [23] XU R, MUZAMIL M, FAN L, et al. Broadband seismic metamaterial with an improved cylinder by introducing plus-shaped structure [J/OL]. *Europhysics Letters*, 2021, 133(3): 37001 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1209/02955075/133/37001>.
- [24] ZENG Y, XU Y, DENG K, et al. Low-frequency broadband seismic metamaterial using I-shaped pillars in a half-space [J/OL]. *Journal of Applied Physics*, 2018: 214901 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1063/1.5021299>.
- [25] MUHAMMAND, LIM C W, REEDY J N. Built-up structural steel sections as seismic metamaterials for surface wave attenuation with low frequency wide bandgap in layered soil medium [J]. *Engineering Structures*, 2019, 188: 440-451.
- [26] HAJJAJ M M, TU J. A seismic metamaterial concept

- with very short resonators using depleted uranium [J/OL]. *Archive of Applied Mechanics*, 2021 (2): 1-22 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-01883-8>.
- [27] HUANG T T, XIN R, ZENG Y, et al. Based on auxetic foam; a novel type of seismic metamaterial for Lamb waves [J/OL]. *Engineering Structures*, 2021: 112976 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112976>.
- [28] COLOMBI A, ROUX P, GUENNEAU S, et al. Forests as a natural seismic metamaterial; rayleigh wave bandgaps induced by local resonances [J/OL]. *Scientific Reports*, 2016, 6, 19238 [2021-11-22]. <https://www.nature.com/articles/srep19238>. DOI: 10.1038/srep19238.
- [29] 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: 737-745.
- [30] MUHAMMAD, LIM C W. Natural seismic metamaterials; the role of tree branches in the birth of Rayleigh wave bandgap for ground born vibration attenuation [J]. *Trees*, 2021(35): 1299-1315.
- [31] PU X B, SHI Z F. Surface-wave attenuation by periodic pile barriers in layered soils [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 180: 177-187.
- [32] CHEN Y Y, FENG Q, SCARPA F, et al. Harnessing multi-layered soil to design seismic metamaterials with ultralow frequency band gaps [J/OL]. *Materials & Design*, 2019, 175: 107813 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107813>.
- [33] LI T, SU Q, KAEWUNRUEN S. Seismic metamaterial barriers for ground vibration mitigation in railways considering the train-track-soil dynamic interactions [J/OL]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: 119936 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119936>.
- [34] LIU Z, QIN K Q, YU G L. Partially embedded gradient metabarrier; broadband shielding from seismic rayleigh waves at ultralow frequencies [J/OL]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, 146 (5): 04020032 [2021-11-22]. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)em.1943-7889.0001752](https://doi.org/10.1061/(asce)em.1943-7889.0001752).
- [35] 尹首浮. 地震表面波周期性波屏障的设计与性能研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017: 43-45.
YIN S F. Research on design and performance of seismic surface wave periodic wave barrier [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017: 43-45. (in Chinese)
- [36] LI L X, JIA Q, TONG M J, et al. Radial seismic metamaterials with ultra-low frequency broadband characteristics [J/OL]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54 (50): 505104 [2021-11-22]. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac25b3>.
- [37] 秦凯强. 半埋入一维周期/梯度表面波屏障设计与研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018: 73-77.
QIN K Q. Design and research of semi buried one-dimensional periodic/gradient surface wave barrier [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018: 73-77. (in Chinese)
- [38] 曾一. 地震超材料的设计与性能研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2019: 31-39.
ZENG Y. Design and performance study of seismic metamaterials [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019: 31-39. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)