

考虑地层横观各向同性的地铁临近环境减隔振超结构

庄晓莹¹, 蔡润成¹, 金亚斌²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 华东理工大学 机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘要: 基于能带理论的减隔振超结构由于其禁带特性而受到了广泛的关注, 其中局域共振禁带对小尺寸结构实现低频减隔振具有重要意义, 并被应用于地层土体表面波和体波减隔振。然而目前绝大多数研究集中于各向同性土体。考虑地层土体横观各向同性, 研究二维橡胶-混凝土超结构对地铁振动的减隔振特性, 对比分析了混凝土半径、橡胶厚度和土体各向异性对超结构全向禁带的影响。在此基础上建立不同方向透射和全尺寸透射模型, 验证了弹性波在超结构禁带频率内能够有效衰减。探索了土体各向异性对减隔振超结构性能的影响, 能够为地铁临近环境减隔振设计和分析提供参考及指导。

关键词: 横观各向同性; 地铁振动; 减隔振超结构; 能带理论; 透射传输

中图分类号: O326

文献标志码: A

Vibration-Reducing Metastructures in Subway Adjacent Environment Considering Transverse Isotropy of Soil

ZHUANG Xiaoying¹, CAI Runcheng¹, JIN Yabin²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Vibration-reducing metastructures based on the periodic band structure theory have received extensive attention due to their bandgap characteristics. Among them, the locally resonant bandgap is of great significance for small-scale structures to achieve low-frequency vibration reduction and isolation, which has been applied to surface wave and body wave attenuation and isolation of ground soils. However, most of the current research focuses on isotropic soils. In this paper, considering the

transverse isotropy of the ground soil, the vibration reduction and isolation characteristics of the two-dimensional rubber-concrete metastructures for subway vibration are studied. The effects of concrete radius, rubber thickness, and soil anisotropy on the omnidirectional bandgap of metastructures are comparatively discussed, based on which, the different directional transmission and full-scale transmission models are established. It is verified that the elastic waves can be effectively attenuated within the bandgap frequency of the metastructures. This paper explores the influence of soil anisotropy on the performance of vibration-reducing metastructures, which can provide reference and guidance for the design and analysis of vibration reduction and isolation in the vicinity of subways.

Keywords: transverse isotropy; subway vibration; vibration-reducing metastructures; band structure theory; transmission

随着我国城市化进程的推进, 地铁等城市轨道交通总量不断增长, 轨道交通车辆运行中发生的机械振动会产生高强度低频弹性波, 对周边建筑结构、精密仪器设备、电力系统等产生不利影响^[1]。解决地铁临近环境振动问题主要从振源、传播路径和目标建筑物三方面入手, 对于具有特殊功能的敏感建筑物, 比如核电站、古建筑、精密仪器实验楼等, 当其处于地铁列车近场振动(约 30 m)的影响范围内时, 单一的减隔振措施往往难以满足需求, 需要涵盖振源、传播路径、敏感目标的综合减隔振设计^[2]。近年来, 基于能带理论的减隔振超结构, 如周期性排桩、

收稿日期: 2023-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(52278411)、上海市科技创新行动计划(22JC1404100)

第一作者: 庄晓莹, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为计算力学、岩土力学。

E-mail: xiaoyingzhuang@tongji.edu.cn

通信作者: 金亚斌, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为弹性波动力学。E-mail: yabin.jin@ecust.edu.cn



论文
拓展
介绍

周期性屏障等,具有独特的禁带特性,即处于禁带频率范围内的弹性波无法传播通过超结构区域,得到了学者们广泛的关注,并被用于地表、地下减隔振工程中^[3-6]。

地面振源的来源广、危害大,因此在土体减隔振超结构研究中主要以针对瑞利波等表面波为主^[7-11]。相较于地面振源,对于地铁振动等地下振源传播路径的减隔振措施研究相对较少,其中在地铁振动中能量主要以体波(P波和S波)形式传播至敏感建筑物。Pu等^[12]通过在北京地铁1和13号线实测发现地铁运行的振动频率主要位于30~80 Hz频段,并利用周期性的土工泡沫填充桩来进行减隔振。Liu等^[13]利用机器学习算法拓扑优化设计周期混凝土桩,并用于阻隔地铁振动传播。王另的等^[2]通过地铁现场实测,建立了三维动力学有限元模型,系统研究了周期性排桩的各参数对减隔振性能的影响。然而上述研究的周期性超结构只具有一维水平方向的周期性,并不能完全适用于体波传播问题。除此之外,实际地层性质非常复杂,虽然目前也有部分减隔振超结构研究开始考虑地层分层、含水等性质^[14-15],但大多数研究中还是将地层土体简化为各向同性线弹性本构,而天然土体一般具有各向异性^[16-17]。针对横观各向同性本构等更符合实际地层特性的减隔振超结构研究还鲜有报道。Ji等^[18]研究了T形周期性表面波屏障在横观各向同性土体中的减隔振特性,并发现其表面波禁带宽于各向同性土体中的禁带。上述研究充分验证了周期性超结构在地铁振动传播路径中减隔振的有效性,但尚未探索地层的各向异性对减隔振超结构性能的影响,这将会产生不同于各向同性土体中的结果,指导更实际的减隔振超结构设计。

本文考虑地层土体的横观各向同性本构,构建橡胶-混凝土超结构,研究二维减隔振超结构在横观各向同性土体中对地铁振动衰减和阻隔的性能,如图1所示。基于周期性结构能带理论,具体研究了混凝土半径、橡胶厚度和土体各向异性对全向禁带的影响。在此基础上,建立多方向有限结构透射模型,验证超结构在不同方向的减隔振特性,并与能带计算结果对比验证;进一步建立包含地铁运行隧道的全尺寸超结构透射模型,分析了橡胶粘性和超结构区域大小对超结构减隔振性能的影响,验证超结构在实际工程应用中的减隔振性能。最后,对全文进行了总结和讨论。

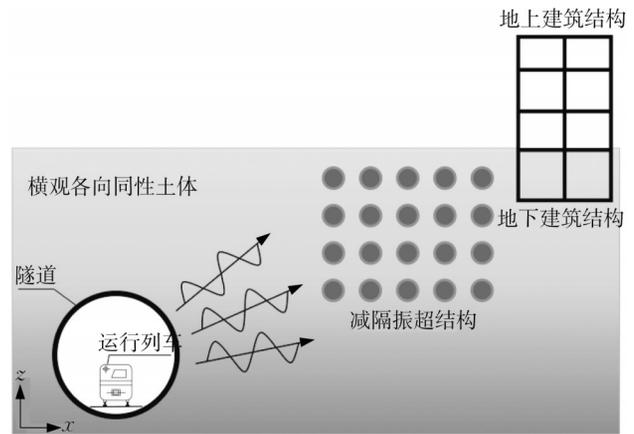


图1 减隔振超结构阻隔地铁轨道列车引起的振动传播

Fig. 1 Vibration-reducing metastructures block vibration propagation caused by subway rail trains

1 超结构模型及能带计算方法

本文通过在地铁振动传播路径中布置橡胶-混凝土减隔振超结构,实现阻隔地铁振动传播,从而保护临近地下/地上建筑物。本文采用的减隔振超结构由圆形混凝土桩(密度 $\rho=2\,500\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,杨氏模量 $E=40\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.25$)和外部的橡胶层(密度 $\rho=1\,300\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,杨氏模量 $E=0.12\text{ MPa}$,泊松比 $\nu=0.47$)组成,如图2a所示,超结构单胞的长度 $a=1\text{ m}$,圆形混凝土桩的半径 $r_1=0.40\text{ m}$,橡胶层的厚度 $r_2-r_1=0.03\text{ m}$ 。

本文考虑地层土体具有沿 z 方向的横观各向同性,在如图1所示的柯西坐标系中,其二维本构可以表达为

$$\sigma_x = c_{11} \frac{\partial u_x}{\partial x} + c_{13} \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (1a)$$

$$\sigma_z = c_{13} \frac{\partial u_x}{\partial x} + c_{33} \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (1b)$$

$$\tau_{xz} = c_{44} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \quad (1c)$$

式中: c_{11} 、 c_{13} 、 c_{33} 为弹性系数,表达式分别为 $c_{11} = \lambda n(1 - n\mu_{vh}^2)$, $c_{13} = \lambda n\mu_{vh}(1 + \mu_h)$, $c_{33} = \lambda(1 - \mu_h^2)$, $c_{44} = G_v$, $\lambda = E_v / [(1 + \mu_h)(1 - \mu_h - 2n\mu_{vh}^2)]$, $n = E_h / E_v$ 。 E_h 为横观各向同性土体的水平向弹性模量,取值为66.6 MPa; E_v 为横观各向同性土体的竖向弹性模量,取值为33.3 MPa; G_v 为横观各向同性土体的竖向剪切模量,取值为10 MPa; μ_h 为水平向应力在水平向引起的侧向收缩系数,取值为0.25; μ_{vh} 为竖向应力在水平向引起的侧向收缩系数,取值

为0.25。

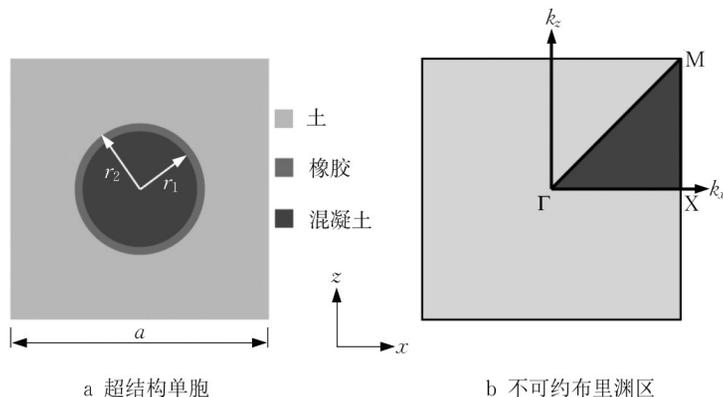


图2 周期性减隔振超结构单胞及布里渊区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of periodic vibration-reducing metastructure unit cell and Brillouin zone

对于不考虑损耗和体积力的弹性介质,其波动控制方程可以表示为

$$\nabla \cdot (C(\mathbf{r}) : \nabla \mathbf{u}(\mathbf{r})) = \rho(\mathbf{r}) \frac{\partial^2 \mathbf{u}(\mathbf{r})}{\partial t^2} \quad (2)$$

式中: $C(\mathbf{r})$ 、 $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ 和 $\rho(\mathbf{r})$ 分别为和位置有关的弹性刚度张量、位移矢量和质量密度。本文计算中假设土体和超结构在界面之间紧密连接。对于理想的无限周期结构,根据布洛赫定理,其单胞位移场满足:

$$\mathbf{u}(\mathbf{r} + \mathbf{a}, t) = \mathbf{u}(\mathbf{r}, t) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{a}} \quad (3)$$

式中: \mathbf{k} 为布里渊区内的波矢,表示为 $\mathbf{k} = [k_x, k_z]$ 。将式(3)代入式(2)可以得到:

$$(\mathbf{K}(\mathbf{k}) - \omega^2 \mathbf{M}) \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

式中: \mathbf{K} 和 \mathbf{M} 分别代表超结构单胞的刚度和质量矩阵;刚度矩阵 \mathbf{K} 是波矢 \mathbf{k} 的函数。由于式(4)是一个隐式函数,通过在第一布里渊区内扫描波矢 \mathbf{k} 得到其特征频率 ω 。借助布里渊区的对称性,以及极值点总是出现在布里渊区的边界处,对于以获取禁带为目标的能带计算,只需扫描不可约布里渊区的边界,如图2b的深色三角形所示,即 Γ -X-M- Γ 。本文采用有限元方法求解上述特征值问题。

2 结构参数及土体性质对能带的影响

超结构单胞参数和土体性质对能带和禁带有较大的影响,从而影响超结构的减隔振效果。本节通过选取不同的混凝土桩半径 r_1 、橡胶厚度 t 和土体各向异性参数 n ,计算不同工况下超结构的能带图,进而明确各参数对超结构全向禁带频率和范围的影响。

固定橡胶厚度为0.03 m,选取混凝土桩半径 r_1

为0.30、0.35、0.40 m,此时混凝土桩占整个单胞的体积分数分别为28.3%、38.5%和50.3%,其能带结果如图3所示。当桩半径为0.30 m时(图3a),其体积分数较小,未能出现全向禁带。增大桩半径至0.35 m,此时在70 Hz附近出现了一条频率极窄的禁带,如图3b中灰色区域所示。继续增大桩半径至0.40 m(图3c),此时在25、63、74 Hz附近出现了三条全向禁带,其中第三条禁带频率范围极窄,几乎无法起到减隔振的作用。第一条和第二条禁带的中心频率除以禁带频率范围的比值分别为10.5%和11.8%,能够在禁带频率范围对全方向的振动传播起到很好的阻隔作用。超结构禁带是由橡胶-混凝土桩体系的局域共振和散射效应共同作用产生的,较大半径的混凝土桩会导致更强的散射作用和更低的共振频率,从而有利于打开和拓宽低频禁带,但较大的混凝土桩会提高成本,因此需要结合实际情况选取合适的桩半径。

固定混凝土桩半径为0.40 m,选取橡胶厚度 t 为0.02、0.03、0.04 m,其能带计算结果如图4所示。对于橡胶厚度为0.02 m的超结构,在30 Hz和70 Hz附近出现了两条全向禁带(图4a中灰色区域);随着橡胶厚度增大到0.03 m,两条禁带向低频移动,并且第一条禁带的频率范围稍微有所增大(图4b中灰色区域);随着橡胶厚度进一步增大到0.04 m,两条禁带进一步向低频移动,但是第二条禁带的频率范围有所减小(图4c中灰色区域)。因此橡胶厚度对超结构的禁带频率有影响,若把橡胶-混凝土桩体系简化为弹簧-振子体系,较厚的橡胶会提供更小的弹簧系数,从而使得橡胶-混凝土桩体系的共振频率降低,进而使得禁带的中心频率降低,但是也会相应减小

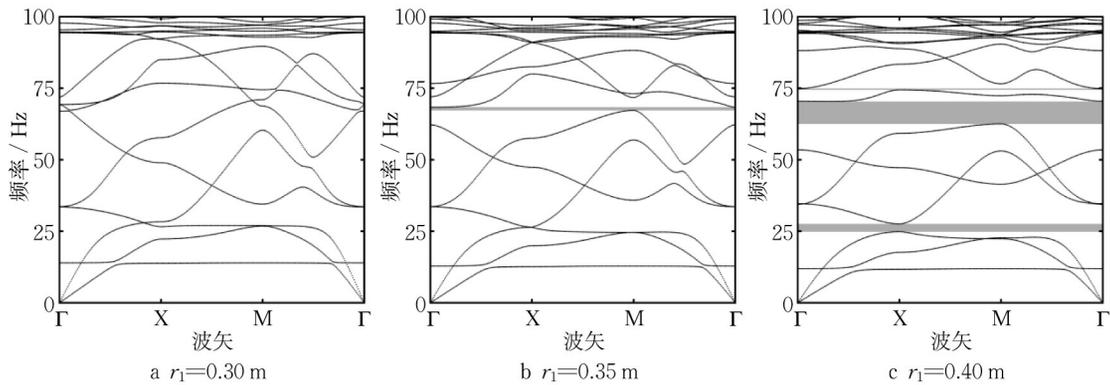


图 3 混凝土桩半径对超结构能带的影响

Fig. 3 Influence of concrete pile radius on band structures of metastructures

禁带频率范围,因此在实际工程中,需要对减隔振频率和范围进行权衡取舍,结合具体情况选取合适的橡胶厚度,从而在目标频率范围内实现禁带。

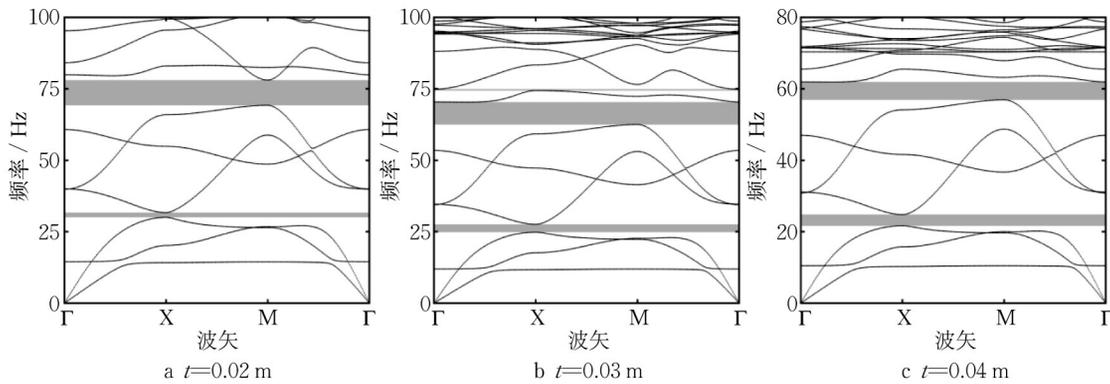


图 4 橡胶厚度对超结构能带的影响

Fig. 4 Influence of rubber thickness on band structures of metastructures

选取混凝土桩半径 0.40 m, 橡胶厚度 0.03 m, 作为超结构单胞的基本参数, 研究土体的各向异性对超结构能带的影响。首先令 $c_{44} = (c_{11} - c_{13})/2$, $n = 1$, 此时土体横观各向同性本构退化为各向同性本构, 其能带结构如图 5a 所示, 其中存在两条禁带, 第二条禁带频率范围达到了 18.4 Hz; 对于横观各向同性土体, $n = E_h/E_v$ 是表征土体各向异性的一个重要参数, n 越大代表土体各向异性特征越明显, 对于常见的横观各向同性土体 n 位于 0.5 和 3.0 之间。当 $n = 1$ 时, 超结构能带图 (图 5b) 和各向同性 (图 5a) 的结果差别不大, 除了一些高频能带稍微有些不同。随着 n 增大到 2 (图 5c), 第一条禁带基本无变化, 但是第二条全向禁带的频率范围明显减小, 这主要是由于第二条禁带的下边界向高频移动, 而上边界基本无变化。随着 n 增大到 3 (图 5d), 第二条全向禁带的频率范围进一步减小, 其下边界也进一步向高频移动, 同时第一条禁带几乎没有改变。因此土

体各向异性特征主要影响超结构的第二条禁带, 较大的各向异性特征会导致其下边界向高频移动, 从而减小禁带范围, 降低减隔振效果。实际上, n 越大, 代表横观各向同性土体的水平向弹性模量越大, 而第二条禁带的下边界模态是橡胶-混凝土桩周围土体的水平向剪切模态, 较大的水平向弹性模量 (即较大的各向异性参数 n) 会使得这一模态向高频扩展, 即超结构第二禁带的下边界向高频移动, 而第二禁带的上边界为橡胶共振模态, 其频率无明显变化, 从而使得第二禁带频率范围减小。此外, 第一禁带的下边界和上边界模态分别为混凝土桩的共振模态和土体的竖向剪切模态, 这两模态和水平向弹性模量无关, 因此第一禁带频率范围并无明显变化。

选取混凝土桩半径 0.40 m, 橡胶层厚度 0.03 m, 土体各向异性参数 $n = 2$, 作为基本工况, 其对应的能带结构为图 5c。此外超结构能带表征的是理想无限周期结构的波动特征, 而实际应用的结构是有

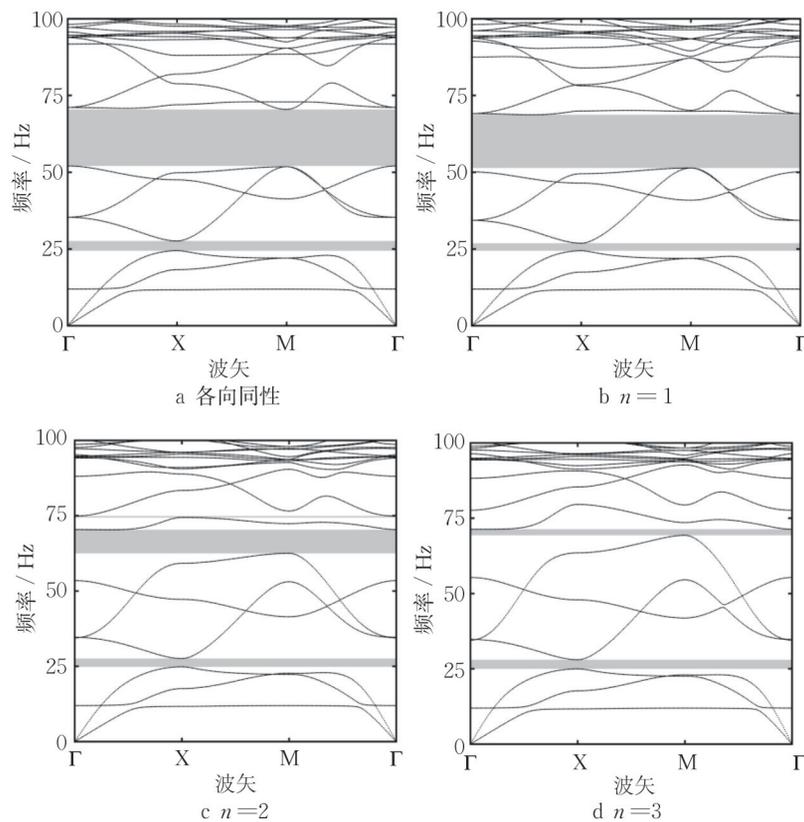


图5 土体各向异性对超结构能带的影响

Fig. 5 Influence of soil anisotropy on band structures of metastructures

限的,因此需要进一步在频域中计算有限周期超结构的透射谱来辅助表征超结构的波动传输和阻隔特性。

3 超结构透射计算

3.1 沿 ΓX 和 ΓM 方向的透射

超结构对于不同方向的入射波具有不同的频率响应,本节计算了超结构沿 ΓX 和 ΓM 方向的透射,分别对应弹性波正入射和45度斜入射超结构。

在透射计算中,通常沿某一方向选取有限个数的超结构单胞,并在单胞两侧施加周期性边界条件以模拟单胞在垂直入射方向的周期性。对于沿 ΓX 方向的透射,其透射计算模型如图6a所示,选取10个超结构单胞排列于土体中,在其左侧同时施加沿 x 和 z 方向的线力激励,以同时激发S波和P波,并在模型左右两侧边界施加低反射边界条件以消除边界的影响。为了表征超结构对入射弹性波的衰减特性,定义透射衰减系数为 $20 \lg \frac{\Omega_1}{\Omega_2}$,其中 Ω_1 和 Ω_2 分别表示在有和无超结构时图6中黑色区域S的总位移积分。透射衰减系数小于0表明超结构能够起到阻

隔弹性波传播的作用,且透射衰减系数越小,超结构的阻隔作用越好。

沿 ΓM 方向的透射计算模型和沿 ΓX 方向的稍有不同,主要区别是超结构单胞的排布方式不同,如图6b黑色方框所示,单胞按照45度斜对角排布,此时模型的宽度变为 $\sqrt{2}a$ 。和各向同性介质不同,横观各向同性介质中弹性波的传播特性和模型建模方向有很大关系,此时整体模型也需要和水平方向保持45度的夹角,如图6b中坐标轴方向所示。

在第2节中比较的是超结构的全向禁带,即弹性波无论在哪个方向入射都无法通过超结构区域。当弹性波在不同的方向入射时,具有不同的能带结构和禁带范围,且方向禁带的频率范围一般要宽于全向禁带。对于 ΓX 方向入射的弹性波,其能带结构和透射谱如图7a和图7b所示。此时超结构具有大小5个禁带,其中第二禁带的频率范围较宽,达到了11.0 Hz,第一和第四禁带频率范围稍窄,而第三和第五禁带频率范围不足1 Hz,在实际中很难表现出禁带特征。透射衰减系数在5个禁带内都有明显的减小,第二禁带尤为明显,衰减系数在大部分频率范围内小于-80,表明弹性波几乎无法透过超结构继

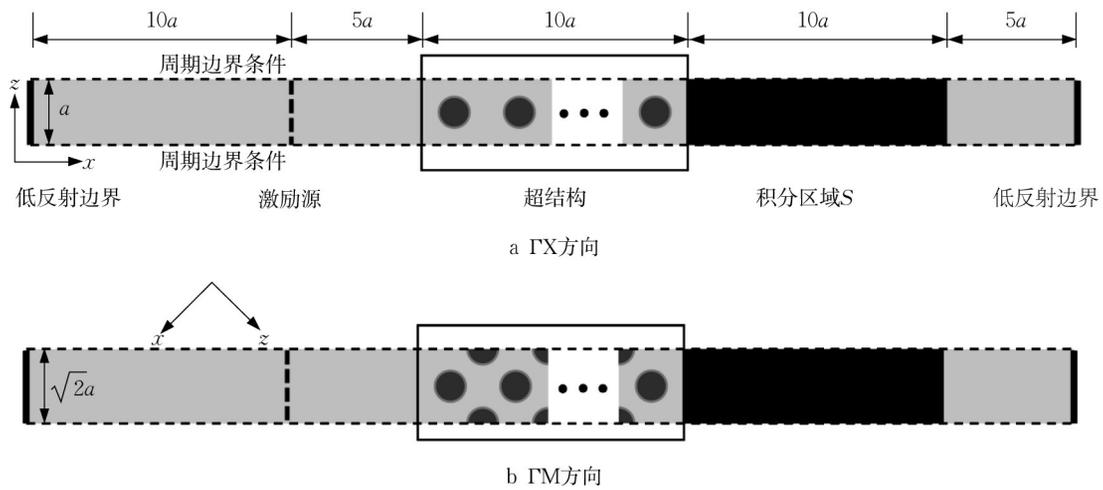


图 6 超结构透射计算模型

Fig. 6 Transmission calculation model of metastructures

续传播。第一和第四禁带内大部分衰减系数也小于 -40,而第三和第五禁带内的衰减系数虽然也出现

了减小,但频率范围极窄,并不能起到很好的弹性波阻隔作用。

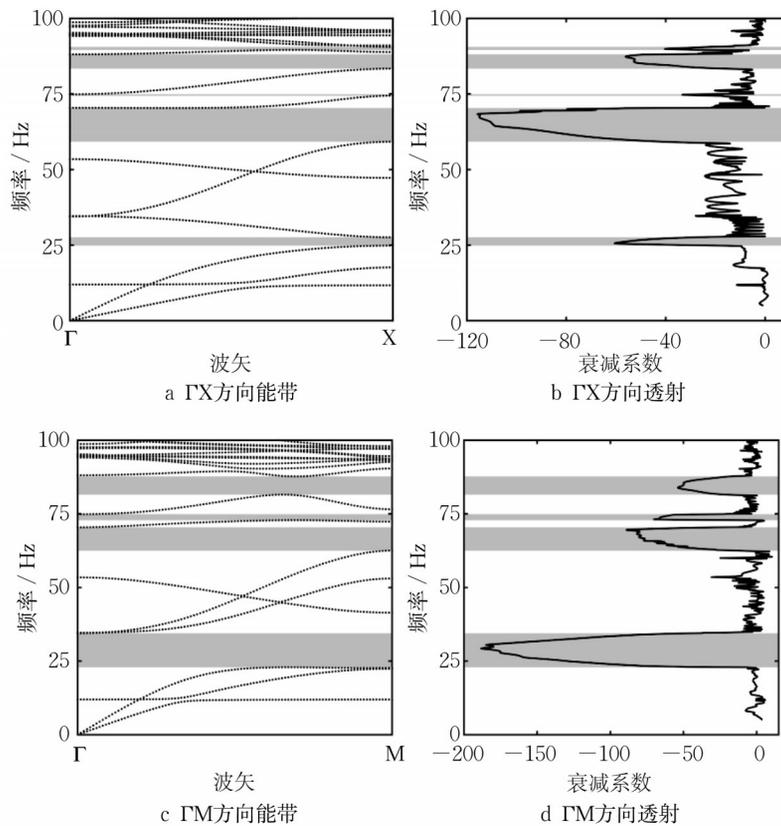


图 7 超结构能带图和透射谱对比

Fig. 7 Comparison of band structures and transmission spectra of metastructures

对于ΓM方向入射的弹性波,其能带结构和透射谱如图7c、图7d所示。此时超结构具有4个禁带,其中第一禁带的频率范围较宽,且频率较低,相对带宽达到了40.1%,非常有利于低宽频减隔振。第二和第四禁带频率范围稍窄,分别为7.9 Hz和6.2

Hz,而第三禁带的频率范围较窄,只有约2.1 Hz。透射衰减系数在整个第一禁带频率范围内非常小,最小值接近-200,表明超结构对弹性波的阻隔衰减作用非常强烈。另外三个禁带频率范围内透射衰减系数也有明显的减小,且绝大部分小于-20,说明在

此三个禁带范围内超结构也具有较好的减隔振效果。因此对于横观各向同性土体中的超结构,相比正入射的弹性波,其对斜入射的弹性波具有更好的阻隔和衰减作用。

3.2 全尺寸模型透射

进一步建立包含隧道的二维全尺寸超结构透射计算模型,验证超结构在实际工程中的地铁临近环境减隔振效果。如图8所示,隧道直径为6 m,埋深为12 m,通过在隧道底部施加线力激励模拟地铁列车行驶时产生的振动,在左右两侧和底部施加低反射边界条件以消除边界的影响。在地铁振动传播路径中布置超结构,并选取超结构后部分区域进行位移积分来获取透射衰减系数,以表征超结构对地铁振动的阻隔衰减效果。

由于橡胶通常具有粘弹性特征,首先对比研究了具有弹性橡胶和粘弹性橡胶的超结构对地铁振动的阻隔效果,结果如图9a所示。对于粘弹性橡胶,使用Kelvin-Voigt模型来表征其粘弹性特性^[5],其剪切模量与频率相关,可以表示为

$$G(\omega) = (1 - i\omega\xi)G_0 \quad (5)$$

式中: G_0 表示弹性剪切模量; ω 为角频率; ξ 为粘性系

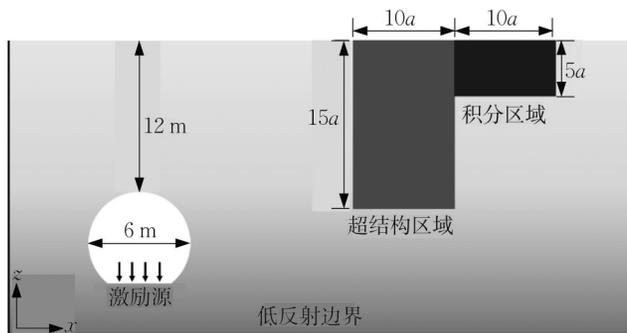


图8 全尺寸超结构透射计算模型

Fig. 8 Full-scale transmission calculation model of metastructures

数,在本文中取 10^{-3} 。对于弹性橡胶,透射衰减系数在全向禁带频率范围内有很明显的减小,第二禁带内尤为明显。当考虑橡胶具有一定粘性的时候,对低于70 Hz的低频范围内的衰减系数无明显影响,但当频率高于70 Hz时,衰减系数相比弹性橡胶出现了很明显的下降,尤其在90 Hz附近已接近-20。这种高频衰减现象可以通过式(5)来解释,频率越高,橡胶剪切模量的虚部越大,从而更有利于弹性波的衰减。

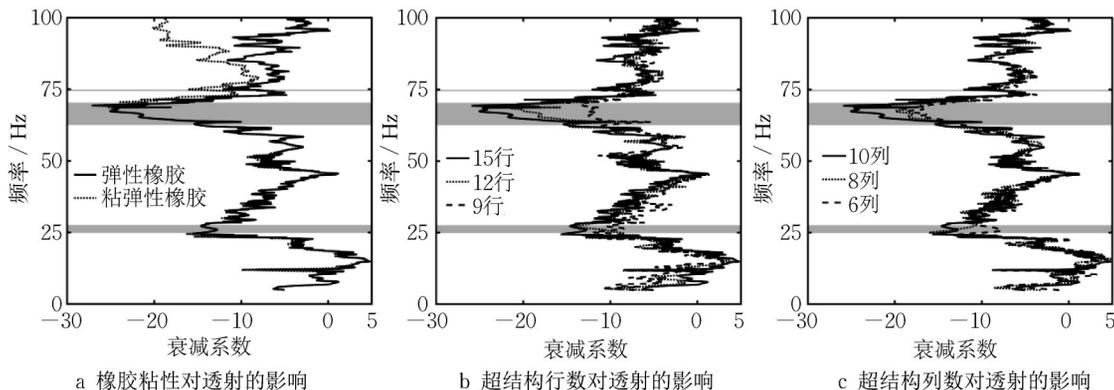


图9 橡胶粘性及超结构区域大小对超结构减隔振性能的影响

Fig. 9 Influence of rubber viscosity and metastructure region size on metastructure vibration-reducing performance

接下来考虑超结构区域具有不同的行数和列数,研究超结构区域大小对减隔振性能的影响,其结果如图9b、图9c所示。当超结构行数从15行减小到12行时,透射曲线几乎没有发生变化,除了第二禁带内的衰减系数略微增大。进一步减小到9行时,禁带内的衰减系数明显增大,尤其是第二禁带,表明此时超结构对弹性波的阻隔作用减弱,而处于通带内的透射曲线则无明显变化。当超结构列数从10列逐渐减小到6列时,整体透射曲线变化不大,只有禁

带内的衰减系数略微增大,但还是具有较好的阻隔效果。因此对于地铁列车行驶等地下振动源,超结构区域沿深度分布的行数会对衰减效果起到更重要的作用,而沿水平方向分布的列数可以适当减小以控制成本。

4 结语

本文研究了橡胶-混凝土超结构对横观各向同

性土中地铁振动的阻隔和衰减作用。首先分析了混凝土桩半径、橡胶厚度和土体各向异性对超结构全向禁带的影响,结果表明较大的桩半径和较小的各向异性更有利于打开和拓宽禁带,而橡胶厚度和禁带的中心频率有关。进一步计算了弹性波正入射和45度斜入射超结构时的透射曲线,并与能带结构进行了对比验证,结果表明超结构对不同方向的入射波具有不同的频率响应特性,斜入射时更有利于低宽频减隔振。最后建立了包含地铁隧道的全尺寸超结构透射计算模型,分析了橡胶粘性和超结构区域大小对减隔振效果的影响,结果表明橡胶粘性有利于较高频率的振动衰减,超结构沿深度分布的行数对地下振动阻隔更为重要。本研究考虑更符合实际的横观各向同性土,拓宽了传统减隔振超结构的研究思路,并为周期性超结构在地铁临近环境减隔振应用提供了参考和指导。

作者贡献声明:

庄晓莹:研究指导,机理分析,论文修改。

蔡润成:理论推导,数值计算,论文撰写。

金亚斌:研究方法,学术指导,论文修改。

参考文献:

- [1] 魏龙. 地铁列车运行诱发的振动对环境的影响研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
WEI Long. A study on the effect on environment of vibration induced by subway train [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016
- [2] 王另的. 地铁近场建筑物周期性排桩隔振性能研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2016.
WANG Lingdi. The study on vibration isolation performance of periodic row piles in subway near field buildings [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2016
- [3] PU X, SHI Z. Periodic pile barriers for Rayleigh wave isolation in a poroelastic half-space [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 121: 75.
- [4] BRÛLÉ S, JAVELAUD E, ENOCH S, *et al.* Experiments on seismic metamaterials: Molding surface waves [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(13): 133901.
- [5] MENG L, CHENG Z, SHI Z. Vibration mitigation in saturated soil by periodic in-filled pipe pile barriers [J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 124: 103633.
- [6] COLOMBI A, ZACCHERINI R, AGUZZI G, *et al.* Mitigation of seismic waves: Metabarriers and metafoundations bench tested [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 485: 115537.
- [7] WU X, WEN Z, JIN Y, *et al.* Broadband Rayleigh wave attenuation by gradient metamaterials [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 205: 106592.
- [8] CAI R, JIN Y, RABCZUK T, *et al.* Propagation and attenuation of Rayleigh and pseudo surface waves in viscoelastic metamaterials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(12): 124903.
- [9] LIM C, ŽUR K K. Wide Rayleigh waves bandgap engineered metabarriers for ground born vibration attenuation [J]. *Engineering Structures*, 2021, 246: 113019.
- [10] CAI C, GAO L, HE X, *et al.* The surface wave attenuation zone of periodic composite in-filled trenches and its isolation performance in train-induced ground vibration isolation [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 139: 104421.
- [11] 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.
CHEN Zhenyu, LIN Zhihua, SHI Fan. A review on seismic metamaterials: From natural to artificial structures [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(12): 1264.
- [12] PU X, SHI Z. Broadband surface wave attenuation in periodic trench barriers [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 468: 115130.
- [13] LIU C, YU G. Deep learning-based topology design of periodic barrier for full-mode waves [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 314: 125579.
- [14] CHEN Y, QIAN F, SCARPA F, *et al.* Harnessing multi-layered soil to design seismic metamaterials with ultralow frequency band gaps [J]. *Materials & Design*, 2019, 175: 107813.
- [15] PU X, PALERMO A, CHENG Z, *et al.* Seismic metasurfaces on porous layered media: Surface resonators and fluid-solid interaction effects on the propagation of Rayleigh waves [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2020, 154: 103347.
- [16] AI Z, REN G. Dynamic analysis of a transversely isotropic multilayered half-plane subjected to a moving load [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, 83: 162.
- [17] AI Z, YANG J, LI H. General solutions of transversely isotropic multilayered media subjected to rectangular time-harmonic or moving loads [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 75: 865.
- [18] JI D, YU G. Shielding performance of T-shaped periodic barrier for surface waves in transversely isotropic soil [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2022, 236(11): 2242.