

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0727

周期性四组元局域共振桩带隙特征及隔振性能研究

陈晓斌^{1,2}, 王业顺¹, 唐孟雄³, 谢 康¹, 唐 豪¹, 吕 金¹

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中南大学 重载铁路工程结构教育部重点实验室, 湖南 长沙 410075;
3. 广州市建筑科学研究院有限公司, 广东 广州 510440)

摘 要: 基于既有的三组元局域共振结构, 考虑到岩土材料流塑性及弹塑性特征, 提出一种由管桩、软体层、桩芯和基体组成的四组元局域共振桩结构, 并基于周期性理论, 利用频散曲线分析了管桩密度、弹性模量、厚度对四组元结构带隙特征影响。研究发现: 相比于无管桩的三组元结构, 带管桩的四组元结构更加容易出现完全带隙, 且管桩只对带隙上边界产生影响; 相比于管桩密度, 管桩弹性模量可对四组元结构带隙产生质变影响, 影响程度更大; 通过四组元结构带隙边界点模态分析, 确立了四组元结构带隙计算公式。通过时域分析发现, 相比于三组元结构, 四组元结构在带隙内振动衰减效果可提升近 30%, 其内在原因是四组元结构中管桩提高了基体整体刚度, 从而有效地预防了基体“击穿”带及泄露波的出现。相关研究可为新型局域共振结构设计及隔振效果改善提供新思路。

关 键 词: 隔震减振; 周期结构; 四组元; 局域共振; 排桩隔振

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 01-0110-10

Study on band gap characteristics and vibration isolation of local resonance pile with periodic four component

CHEN Xiao-bin^{1,2}, WANG Ye-shun¹, TANG Meng-xiong³, XIE Kang¹, TANG Hao¹, LÜ Jin¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 2. MOE Key Laboratory of Engineering Structures of Heavy Haul Railway, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 3. Guangzhou Institute of Building Science Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510440, China)

Abstract: Based on the existing three component local resonance structure, a four component local resonance pile structure composed of pipe pile, soft layer, pile core and matrix was proposed considering the flow plastic and elastic-plastic characteristics of geotechnical materials. By introducing the periodic theory, the effects of pipe pile density, elastic modulus and thickness on the band gap characteristics of four component structure were analyzed by using the dispersion curve. Compared with the three component structure without pipe pile, the four component structure with pipe pile is more prone to complete band gap, and the pipe pile only affects the upper boundary of band gap. The modulus of pipe pile has a qualitative and even greater effect on the band gap of quaternary structure comparing with the density of pipe pile. By modal analysis, the calculation formula of the band gap boundary for the quaternary structure was established. Through time domain analysis, it is found that compared with the three component structure, the vibration attenuation effect of the four component structure in the band gap can be improved by nearly 30%. The reason is that the pipe pile in the four component structure improves the overall stiffness of the matrix, so as to effectively prevent the occurrence of "breakdown" band and leakage wave of the matrix. This study provides a new insight into the design of new local resonance structure and the improvement of vibration isolation effect.

Keywords: seismic isolation, vibration reduction; periodic structure; quaternary structure; local resonance; pile barriers

1 引 言

当今, 轨道交通已经广泛穿梭于各大城市。轨

道交通在给人们带来便利的同时, 其引起的环境振动问题也日趋严重^[1-3]。如图 1(a)所示, 在众多隔振手段中, 周期性排桩作为非连续隔振屏障因施工方

收稿日期: 2021-05-13

修回日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51978674)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51978674).

第一作者简介: 陈晓斌, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 主要从事交通岩土工程领域的教学研究工作。E-mail: chen_xiaobin@csu.edu.cn

通讯作者: 王业顺, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事周期结构隔振方面的研究工作。E-mail: wang_yeshun@csu.edu.cn

便, 成本较低, 适应性强, 具有较好的应用前景^[4]。

针对周期性排桩隔振问题, 国内外学者已经开展了大量的研究。从结构上分类: 在一组元“排桩”方面, Richart 等^[5]首次提出用单排或多排薄壁衬砌圆孔进行隔振。Meseguer 等^[6]通过在大理石中钻周期性圆柱孔, 测试表面波在周期圆柱孔阵中散射, 结果发现表面波衰减谱中存在绝对带隙, 指出周期理论在地震波隔振中潜在应用。Brule 等^[7]开展了大尺度现场试验研究, 测试了布有周期性圆孔的地表振动速度传播特征, 指出周期性材料在土壤隔振中的适用性。在二组元排桩方面, 孙立强等^[8]开展了周期性混凝土排桩模型试验, 发现排桩具有较好的减振效果, 且排桩间距越小, 隔振效果越好。Cai 等^[9-11]开展了一系列单排桩基隔振研究, 发现桩间距对隔振效果影响最明显。Huang 等^[12]通过数值模拟研究排桩隔振效果, 发现排桩在软土和高密度土中更容易产生低频带隙, 且排桩相对于土体的填充率越高, 带隙宽度越大。孟庆娟等^[13]运用有限元法计算了二维和三维周期空心排桩的衰减域, 并通过实测环境振动在时域内对计算结果进行了验证。Pu 等^[14]通过数值模拟和试验测试手段研究了周期性空心 PVC 管桩对表面波隔振效果, 发现当管桩数量超过 4 排时, 中低频振动衰减值达 40 dB, 但在低频隔振上仍然具有挑战。陈洪运^[15]、孙成龙^[16]、Zhang^[17]等都对周期性排桩进行现场隔振测试, 验证了周期排桩的隔振效果。在三组元排桩方面, Huang 等^[18]模拟了不同填充材料下周期性水泥管桩隔振效果, 研究发现填充软体材料时排桩隔振效果更好, 且扩大桩径可以获得较低频带隙。姜博龙等^[19]设计了一种内填混凝土的铸铁桩基, 分别模拟其在覆土、粉质黏土、卵石砂砾中的隔振效果, 研究发现该桩基在覆土和粉质黏土中隔振效果更好, 可以产生 20~80 Hz 的中低频带隙。刘维宁等^[20]对周期性空心桩和填土桩进行隔振试验, 发现实测振动衰减达 50%~98%, 其中水平衰减优于竖向衰减, 且填土桩对振动波衰减作用更好。

当前研究大多数从试验或数值模拟角度肯定了周期性排桩的隔振效果, 并取得了较多的研究成果。然而, 当前关于周期性排桩的研究较多基于 Bragg 散射机制, 其第一带隙中心频率对应波长为晶格常数 2 倍。因此, 如果想隔断波长较大的低频振动, 需要较大的晶格常数, 这不利于有限场地的隔振减震, 在一定程度上限制了该类排桩的应用范围。有幸的是, Liu 等^[21]在《Science》期刊上提出了局域共振结构, 该结构可以实现小尺寸控制大波长, 在

隔震减振领域具有较好的发展前景。Liu 等^[21]提出的局域共振结构是主要由基体、软体层、硬核构成的三组元结构, 且假设各组成构件均为弹性体, 这一思想沿用到后续众多领域^[22]。其中, 土木工程领域中也有相关研究^[23-26]。然而, 岩土材料具有流塑性和弹塑性特征, 在雨水冲刷或外界振动作用下, 三组元结构在岩土中很难保持稳定。因此, 现实意义下的局域共振桩必须外加保护装置。基于此, 本文提出一种由管桩、软体层、桩芯、基体(土)构成的四组元局域共振桩, 如图 1(b)所示, 并通过频散分析和时域分析研究该四组元结构的带隙特征及隔振性能。

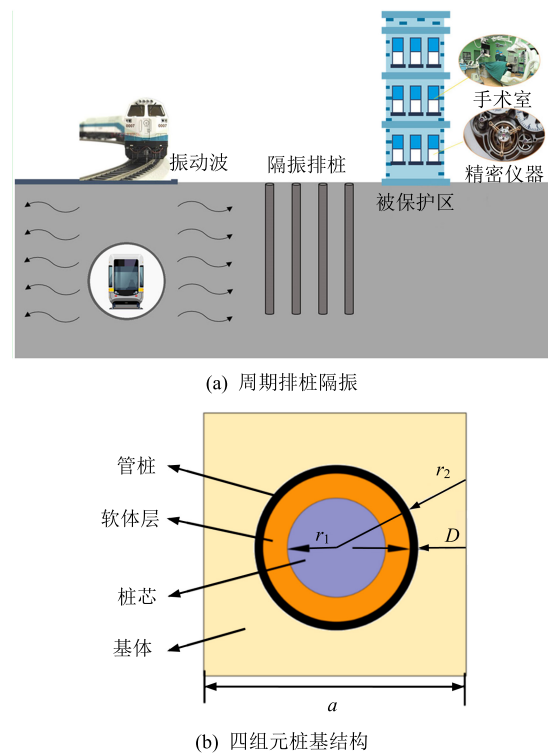


图 1 周期排桩隔振和四组元桩基结构

Fig.1 Vibration isolation of periodic row piles and four component pile foundation structure

2 研究方法内容

2.1 研究方法

假设土体为弹性体, 在不考虑体积力影响下, 弹性单元振动形式可以表示为

$$\nabla \left\{ [\lambda(\mathbf{r}) + 2\mu(\mathbf{r})](\nabla \cdot \mathbf{u}) \right\} - \nabla \times [\mu(\mathbf{r})\nabla \times \mathbf{u}] = \rho(\mathbf{r}) \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{u}=(u_x, u_y, u_z)^T$, 为位移矢量; $\rho(\mathbf{r})$ 为材料密度; $\lambda(\mathbf{r})$ 和 $\mu(\mathbf{r})$ 均为拉梅常数; ∇ 为哈密顿算子; $\mathbf{r}=(x, y, z)$ 为位置矢量。

假设圆频率为 ω 的平面波在弹性介质中传播, 单元体位移 $\mathbf{u}(\mathbf{r}, t)$ 可以表示为

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = e^{i\omega t} \mathbf{u}(\mathbf{r}) \quad (2)$$

式中: $i = \sqrt{-1}$; $\mathbf{u}(\mathbf{r})$ 为振幅; t 为时间。

将式 (2) 代入式 (1) 中, 化简得

$$\nabla \{ [\lambda(\mathbf{r}) + 2\mu(\mathbf{r})](\nabla \cdot \mathbf{u}(\mathbf{r})) \} - \nabla \times [\mu(\mathbf{r}) \nabla \times \mathbf{u}(\mathbf{r})] = -\rho(\mathbf{r})\omega^2 \mathbf{u}(\mathbf{r}) \quad (3)$$

在周期结构中, 根据 Bloch 理论, 有

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}) = \mathbf{u}_k(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{k}$ 为波矢; $\mathbf{u}_k(\mathbf{r})$ 为调幅函数。

在周期晶格常数矢量为 $\mathbf{R}$ 的周期结构中, 调幅函数为周期函数, 即

$$\mathbf{u}_k(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = \mathbf{u}_k(\mathbf{r}) \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (4) 中, 可得周期性结构中单胞边界条件:

$$\mathbf{u}(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = \mathbf{u}_k(\mathbf{r}) e^{i\mathbf{k} \cdot (\mathbf{r} + \mathbf{R})} \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (3), 可得到单胞内关于变量 $\mathbf{k}$ 、 ω 和 $\mathbf{u}_k(\mathbf{r})$ 的方程组。在给定波矢 $\mathbf{k}$ 的情况下, 可求解特征频率 ω , 从而获得 ω 与 $\mathbf{k}$ 之间的频散关系, 称为 $\omega(\mathbf{k})$ 法。通常情况, 波矢 $\mathbf{k}$ 只需要扫描不可约 Brillouin 区边界即可。如图 2 所示, 以晶格常数为 a 的正方形晶格为例, 不可约 Brillouin 区为以 Γ 、 X 、 M 为顶点的三角形区域。

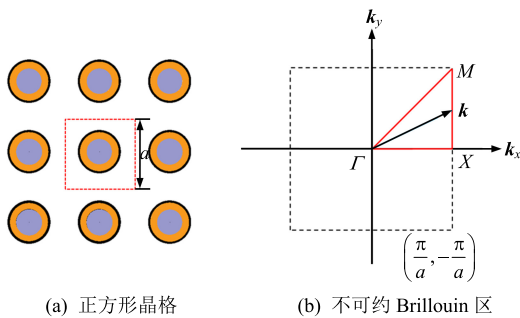


图 2 正方形晶格及不可约 Brillouin 区

Fig.2 Square lattice and irreducible Brillouin zone

本文利用 COMSOL Multiphysics 5.4 有限元软件求解特征方程, 并求得 ω 与 $\mathbf{k}$ 之间的频散关系。

2.2 计算方法验证

为验证计算方法的正确性, 本文选择文献[26]作为参照。选择由混凝土、橡胶、钢铁组成的三组元局域共振结构, 计算该结构的频散曲线图, 并将本文计算结果与文献[26]计算结果进行对比分析。计算时, 晶格常数为 2 m, 桩芯半径为 0.7 m, 橡胶层厚为 0.2 m, 材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/Pa	泊松比 ν
混凝土	2 500	3.00×10^{10}	0.200
橡胶	1 300	1.37×10^5	0.463
钢铁	7 890	2.09×10^{11}	0.275

图 3 为本文计算的频散曲线及与文献[26]计算结果对比图。如图 3 所示, 本文计算结果与文献[26]计算结果吻合较好, 验证了本文计算方法的正确性。其次, 从图 3 可知, 由混凝土、橡胶、钢铁组成的三组元局域共振结构频散曲线中出现了 4.16~8.17 Hz 的完全带隙, 说明该三组元局域共振结构具有一定的隔振效果。

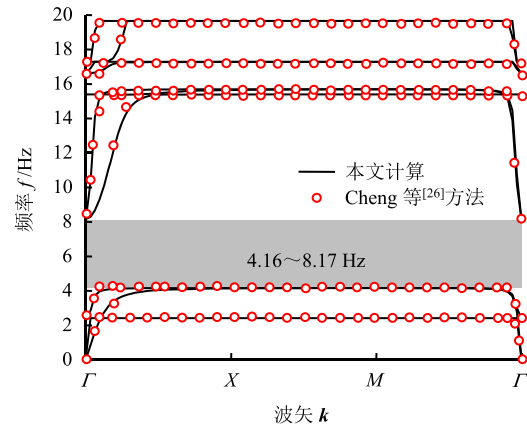


图 3 频散曲线对比

Fig.3 Comparison of dispersion curves

2.3 研究内容

如图 1(b)所示, 四组元局域共振桩由管桩、软体层、桩芯、基体四部分构成, 其晶格常数为 a , 管桩外径为 r_2 , 管桩厚度为 D , 桩芯半径为 r_1 , 软体层厚度 d 为 $(r_2 - D - r_1)$ 。相比于三组元局域共振结构, 四组元结构只增加了“管桩”, 因此, 本文只研究管桩密度、弹性模量和厚度对四组元结构带隙特征及隔振性能的影响。

本次研究中管桩以钢铁材料为基准, 软体层为橡胶材料, 桩芯为混凝土材料, 基体为土体。材料力学参数取自表 1。土体密度取 $1\,800\text{ kg/m}^3$ 、弹性模量取 20 MPa 、泊松比取 0.3 [25]。本次研究晶格常数 a 取 2 m, 桩芯半径 r_1 取 0.65 m, 软体层厚度 d 取 0.09 m, 管桩初始厚度 D_0 取 0.06 m。采用控制变量法开展研究, 其中管桩密度 ρ 分别为 $0.2\rho_{\text{st}}$ 、 $0.4\rho_{\text{st}}$ 、 $0.6\rho_{\text{st}}$ 、 $0.8\rho_{\text{st}}$ 和 ρ_{st} , ρ_{st} 为钢材密度。管桩弹性模量 E 分别为 $10^{-4}E_{\text{st}}$ 、 $10^{-3}E_{\text{st}}$ 、 $10^{-2}E_{\text{st}}$ 、 $10^{-1}E_{\text{st}}$ 、 E_{st} , E_{st} 为钢材弹性模量。管桩厚度 D 分别为 0、0.002、0.010、0.020、0.040、0.060 m。

3 结果与分析

本文仅考虑平面内 (x - y) 振动模态, 平面外模态可做类似的分析。为更好地分析结果, 在图 2 (b) 不可约 Brillouin 区中定义: 在“ M - Γ - X - M ”方向均出现的带隙称为“完全带隙”(complete band gap, 简称 CBG); 只出现在“ M - Γ ”或“ Γ - X ”单方向的带隙称为“方向带隙”(directional band gap, 简称 DBG); 同时定义带隙的 3 个特征参量, 即带隙上边界频率 (upper bound frequency, 简称 UBF), 带隙下边界频率 (lower bound frequency, 简称 LBF) 和带隙宽度 (width of band gap, 简称 WBG) [13]。

3.1 管桩密度 ρ 影响

图 4 为不同管桩密度下周期性四组元局域共振桩频散曲线图, 图 5 为带隙边界频率及宽度随管桩密度的变化曲线图。如图 4 所示, 带隙下边界出现了较长的平直段, 因此该带隙为典型局域共振带隙[21]。其次, 不同管桩密度下计算的频散曲线外观形状基本一致, 且与三组元结构计算结果相似 (见图 3), 说明管桩密度对带隙没有产生质的影响。如图 5 所示, 带隙上边界频率及宽度均随管桩密度增加而略有减小: 具体当管桩密度增加 5 倍时, 带隙上边界频率仅降低 14.5%, 带隙宽度仅减小 22.3% ;

带隙下边界频率随管桩密度增加基本不变。说明管桩密度主要是通过影响带隙上边界频率来影响结构带隙, 且这种影响相对较小, 没有改变整体的带隙形式, 此时可以将四组元局域共振结构简化为三组元局域共振结构, 且第一带隙边界频率可以表示为[27-28]

$$\text{UBF} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\bar{k}}{m_1 + m_2} + \frac{\bar{k}}{m_3}} \quad (7)$$

$$\text{LBF} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\bar{k}}{m_3}} \quad (8)$$

$$m_2 = \rho V_p \quad (9)$$

式中: $\bar{k}$ 为软土层刚度; m_1 为土质量; m_2 为管桩质量; m_3 为桩芯质量; V_p 为管桩体积。

从式 (7)、(8) 可知, 管桩质量 m_2 只对带隙上边界产生影响。其可控的范围为

$$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\bar{k}}{m_3}} < \text{UBF} < \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\bar{k}}{m_1} + \frac{\bar{k}}{m_3}} \quad (10)$$

进一步, 从带隙下边界频率计算式 (8) 可知, 若想获得较低的隔振频率, 则需选择较大的桩芯质量 m_3 , 通常情况下 $m_3 \gg m_1$ 。因此, 带隙上边界频率 UBF 可变化的范围非常有限, 综合式 (9) 可知, 在管桩体积 V_p 恒定的情况下, 管桩密度 ρ 对带隙的影响较小。

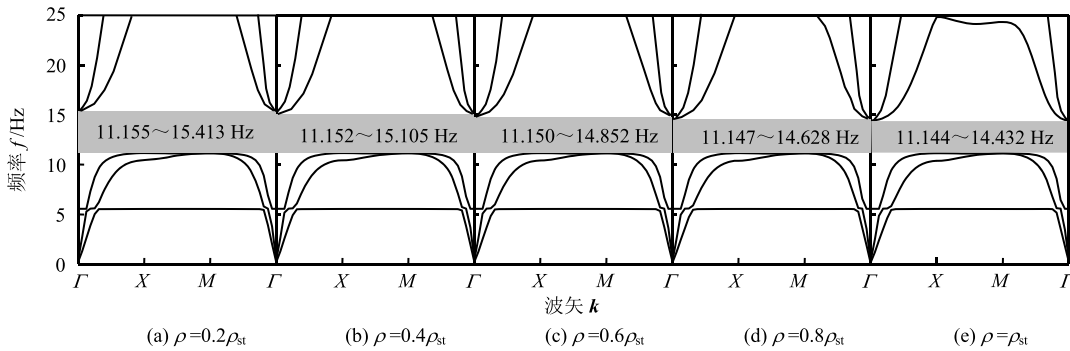


图 4 不同管桩密度频散曲线图
Fig.4 Dispersion curves for different pipe pile densities

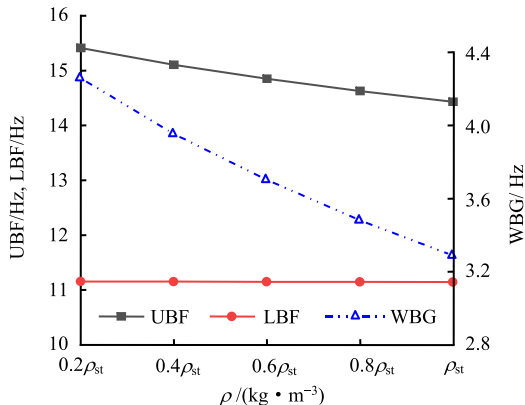


图 5 带隙边界频率及宽度随管桩密度变化曲线图
Fig.5 Curves of band gap boundary frequency and width with pipe pile density

3.2 管桩弹性模量 E 影响

图 6 为管桩不同弹性模量下周期性四组元局域共振桩频散曲线图。图 7 为带隙边界频率及宽度随管桩弹性模量变化曲线图。如图 6 所示, 当 $E \leq 10^{-4} E_{st}$ 时, 结构只有方向带隙, 而没有完全带隙; 当 $E > 10^{-4} E_{st}$ 时, 结构产生完全带隙, 且随着管桩弹性模量增加, 带隙上边界点由 P_1 和 P_2 转向 Q_3 和 Q_4 。其次, 从图 7 可知, 随着管桩弹性模量增加, 带隙下边界频率基本不变, 带隙上边界频率及宽度均先快速上升、再缓慢上升、最后趋于平稳。说明管桩弹性模量同样主要对带隙上边界产生影响, 但影响形式与管桩密度不同。

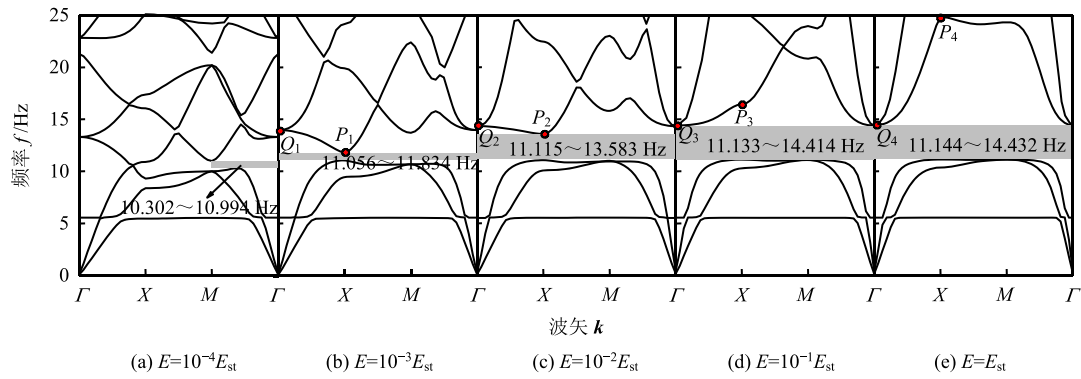


图6 不同管桩弹性模量频散曲线图

Fig.6 Dispersion curves of elastic modulus of different pipe piles

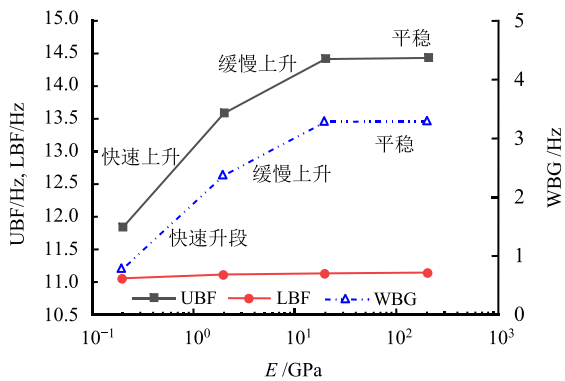


图7 带隙边界频率及宽度随管桩弹性模量变化曲线图

Fig.7 Curves of band gap boundary frequency and width with pipe pile elasticity modulus

为进一步探索管桩弹性模量对带隙结构的影响机制,分别调取完全带隙的上边界频率点 P_1 、 P_2 、 Q_3 、 Q_4 对应的模式图(图8)。如图8(a)、8(b)所示,当 $10^{-4} E_{st} < E \leq 10^{-2} E_{st}$ 时,对应带隙上边界点 P_1 和 P_2 的模式相似,主要表现为土-管桩左右两端朝相反方向振动,而软体层-桩芯不动。主要原因是,当管桩弹性模量相对较小时,土-管桩综合刚度较小。此时,土-管桩左右两端振动时的自振频率低于土-管桩-软体层-桩芯共同振动频率。因此,随着外界激振频率增加,土-管桩混合体率先发生共振,但此时的激振频率不足以激发软体层-桩芯振动,故而不。如图8(c)、8(d)所示,当 $E \geq 10^{-1} E_{st}$ 时,对应带隙上边界点 Q_3 和 Q_4 模式亦相似,主要表现为土-管桩-软体层-桩芯的共同振动,且桩芯与土体振动形式相反。其原因是,当管桩弹性模量增大到一定程度后,土-管桩混合体刚度较大,此时土-管桩混合体自振频率高于土-管桩-软体层-桩芯共同振动频率。随着外界激振频率增加,软体层-桩芯发挥作用,形成土-管桩-软体层-桩芯共同振动形式。相反,当管桩弹性模量低于某一限值时,例如当 $E \leq 10^{-4} E_{st}$ 时,土-管桩混合体刚度非常小,

其自振频率与带隙下边界频率相当或更低,如图6(a)所示,此时结构只有方向带隙,而没有完全带隙。总而言之,管桩弹性模量主要是通过改变土-管桩混合体刚度来改变其自振频率,而其自振频率与带隙下边界频率和土-管桩-软体层-桩芯的共同振动频率的相对大小,决定其有无完全带隙及完全带隙上边界频率。

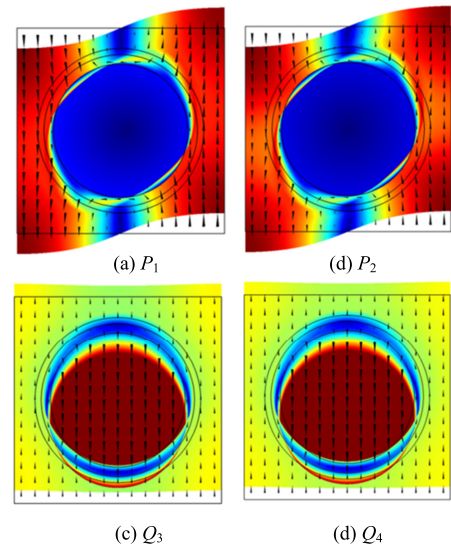


图8 带隙上边界点模式图

Fig.8 Modal diagram of boundary point on band gap

根据图7,随着管桩弹性模量增加,带隙宽度最终趋于平稳,因此管桩内存在一个相对较小的弹性模量 E' ,使得带隙宽度趋于最大。综合图6不难发现,当点 P_2 与点 Q_3 纵坐标(频率)相等时,对应的弹性模量值即为该较小的弹性模量 E' 。将振动模式假设为弹簧振子模型^[27],可知:当带隙上边界在 P_1 和 P_2 点时,带隙上边界频率可表示为

$$UBF = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{K}{m_1 + m_2}} \quad (11)$$

式中： K 为土-管桩综合刚度。

当带隙上边界在点 Q_3 和 Q_4 时，带隙上边界频率等同于式 (7)。令式 (7) 等于式 (11)，求得

$$K = \left(\frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_3} \right) \bar{k} \quad (12)$$

根据结构几何尺寸及土-管桩综合刚度 K ，即可求出较小的弹性模量 E' 具体值（本文不再拓展）。

综合式 (7)、(8)、(11)、(12)，可知四组元局域共振结构带隙计算公式的最后表达形式为

$$\left. \begin{aligned} \text{UBF} &= \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{K}{m_1 + m_2}}, K \leq \left(\frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_3} \right) \bar{k} \\ \text{UBF} &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\bar{k}}{m_1 + m_2} + \frac{\bar{k}}{m_3}}, K > \left(\frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_3} \right) \bar{k} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\text{LBF} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\bar{k}}{m_3}} \quad (14)$$

3.3 管桩厚度 D 影响

当管桩给定材质时，只有管桩厚度能同时调节土-管桩综合密度和综合刚度。图 9 为钢铁材质管桩，在不同管桩厚度下的频散曲线图。图 10 为对应

的带隙边界频率及宽度随管桩厚度变化曲线图。

从图 9 可知，当 $D=0$ m 时，结构只有方向带隙；当 $D \neq 0$ m 时，结构具有完全带隙。当 $D \neq 0$ m 时，从图 10 可知， D 从 0.002 m 增加至 0.060 m 时，带隙下边界频率基本保持不变，带隙上边界频率及宽度先上升再下降，在 $D=0.020$ m 时取得极大值。结合前文研究可知，管桩密度和弹性模量只对带隙上边界频率产生影响，因此改变管桩厚度 D ，不影响带隙下边界频率。比较图 9(c) 和图 9(d) 可知，当 D 从 0.010 m 增加至 0.020 m 时，带隙上边界点位置发生改变。结合 3.1 和 3.2 小节的研究可知，当 $D \leq 0.010$ m 时，管桩弹性模量起主导作用；当 $D \geq 0.020$ m 时，管桩密度起主导作用。在 0.010~0.020 m 区间，存在一个最佳管桩厚度，使得带隙宽度最大。值得注意的是，相比于晶格常数，当把管桩厚度设置为相当小 (0.002 m) 时，结构仍出现了较大的完全带隙，主要原因是钢铁的刚度远远大于土的刚度，因此即便管桩厚度很小也可对土-管桩综合刚度有较好的改善。这也预示着，如果选用其他材质管桩，在管桩刚度不够时，可以在管桩外壁再附上薄的钢铁环或直接进行加筋处理。

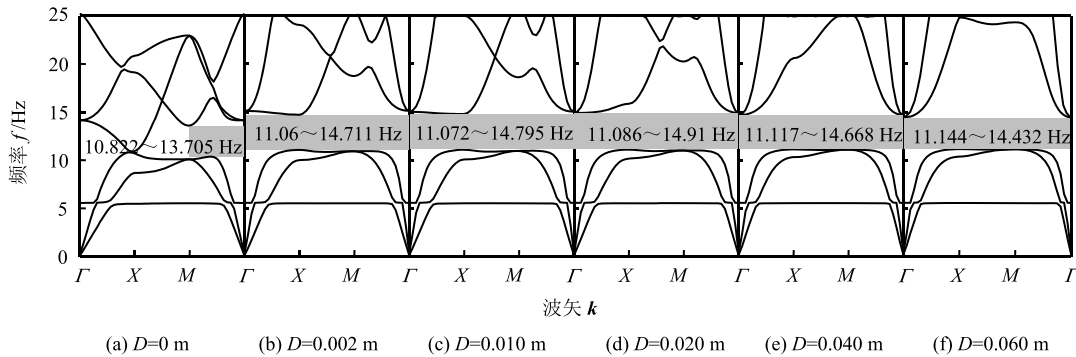


图 9 不同管桩厚度频散曲线图

Fig.9 Dispersion curves for different pile thickness of pipe

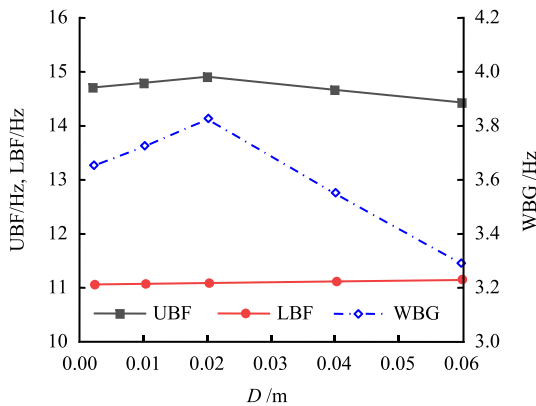


图 10 带隙边界及宽度随管桩厚度变化曲线图

Fig.10 Curves of band gap boundary frequency and width with pipe pile thickness

4 时域分析

如图 11 所示，建立 6×6 有限数量排桩振动响应模型，其中模型上下表面采用周期边界，模型右表面采用黏弹性边界。在模型左侧设立正弦波位移激振区，在模型右侧设立位移监测区。此次计算： $a=2$ m， $r_1=0.65$ m， $r_2=0.76$ m， $D=0.020$ m，其频散关系图如图 9(d) 所示，计算参数见表 1。为对比带隙内外振动波衰减效果，激振频率分别取 8 Hz 和 12 Hz，其中 8 Hz 属于带隙频率之外，12 Hz 属于带隙频率内，激振振幅取 1 mm，同时以无排桩和三组元排桩 ($D=0$ m) 工况作对比研究。

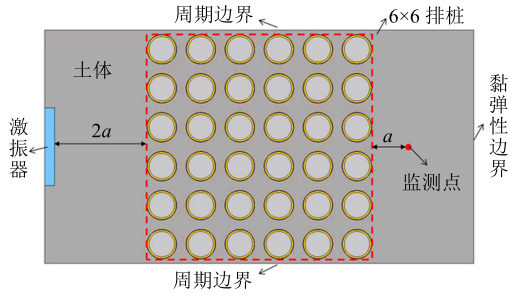


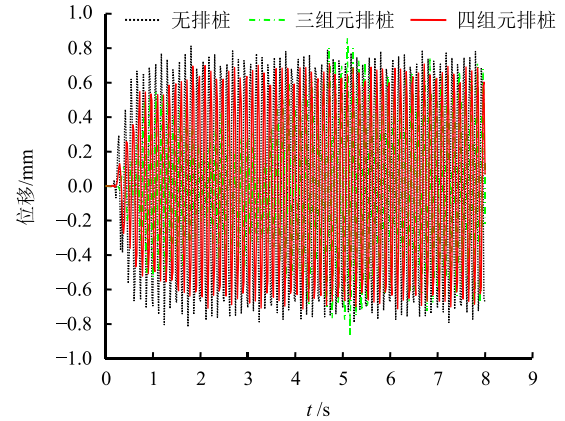
图 11 有限排桩频率响应计算模型图

Fig.11 Numerical model used for frequency response analysis of pile barriers with finite rows

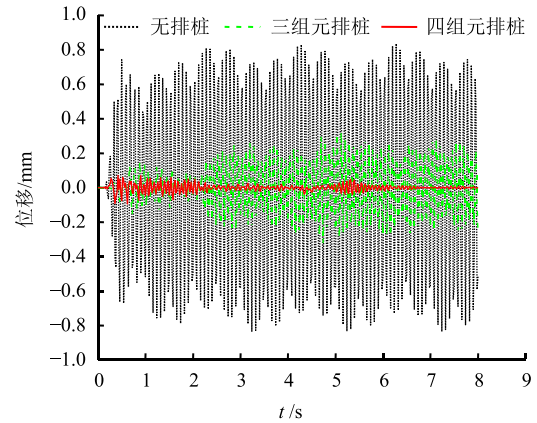
从图 12(a)可知,当激振频率取 8 Hz,在振动稳定时 ($t > 2$ s),无排桩、三组元排桩和四组元排桩监测点振幅基本相同,均约为 0.7 mm,说明排桩对带隙外振动几乎没有衰减作用。从图 12(b)可知,当激振频率取 12 Hz,在振动稳定时 ($t > 2.5$ s),无排桩工况监测区位移幅值约为 0.7 mm;三组元排桩工况监测区位移幅值约为 0.25 mm,振动减小 64%;四组元排桩工况监测区位移幅值约为 0.05 mm,振动减小 93%。说明排桩对带隙内振动具有衰减作用,且相比于三组元排桩,四组元排桩振动衰减效果改善近 30%,减振效果更好。主要原因是,如图 9(a)和图 9(d)所示,12 Hz 的激振频率分别处于三组元排桩方向带隙和四组元排桩的完全带隙内,而全带隙内振动比方向带隙衰减更好^[29]。由此可知,如果利用现有的三组元局域共振结构计算方法来近似计算四组元结构,其计算结果偏保守。

为进一步对比三组元排桩和四组元排桩隔振时振动波在排桩内部的传播特征,取激振频率为 12 Hz,调取不同时刻下振动传播位移云图。如图 13(a)所

示。无排桩时,在振动传播方向,振动波均匀地往外辐射,在 $t \geq 1$ s 后,振动形式就基本稳定。如图 13(b)所示,随着时间推移,在振动传播方向,三组元排桩区域逐渐出现“击穿”带(红色虚线区域),



(a) 激振频率为 8 Hz



(b) 激振频率为 12 Hz

图 12 不同激振频率下竖向位移响应

Fig.12 Vertical displacement response at different excitation frequencies

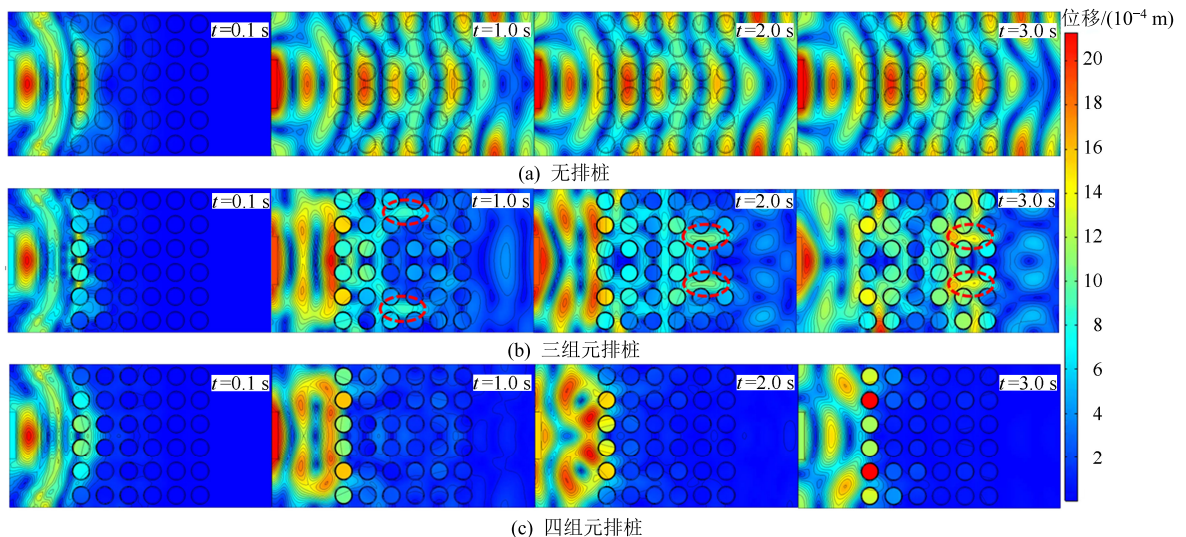


图 13 不同结构不同时刻下位移云图

Fig.13 Displacement nephograms of different structure at different times

且现象越来越明显,同时被保护区位移等值线越来越密集,说明有振动波朝着“击穿”带“泄露”出来。如图 13(c)所示,四组元排桩隔振时,振动波基本限制在前几排桩基内,其中第一排桩基对振动波阻隔效率最高,这也体现了局域共振材料振动随排数成指数衰减的特征^[30-31]。

相比于四组元排桩,三组元排桩“击穿”带可近似为波的“衍射”现象:由于土体本身刚度较小,加之排桩为正方形排布,因此在相邻桩基中间存在小刚度区,当振动波在排桩内部复杂振动时,小刚度区极有可能被“击穿”,使得振动波通过“衍射”泄露出去。相反,四组元排桩通过人为方式提高土体整体刚度,所以只要管桩刚度和厚度足够大,即可克服“击穿”带的出现。这是造成三组元排桩和四组元排桩隔振效果差异的内在原因。同时,针对三组元排桩“击穿”带现象,可以启发我们朝着土体改良或优化桩基排布方式等方面做进一步研究。

5 讨 论

从结构角度讲,相比于三组元局域共振结构,四组元局域共振结构一方面可以提高基体整体刚度,激发出完全带隙,获得更大的带隙宽度,提升隔振效果。例如,可将四组元局域共振结构周期性嵌于软体支座或橡胶板内部,做成复合隔振材料,达到双重隔振目的。另一方面,四组元局域共振结构可以适用于散体或液体基体材料隔振,如岩土材料和油罐车隔振^[32],其中在岩土中,可作为隔振桩基或减振器,用于轨道交通邻近的居民区、核电站、医院及其他敏感建筑物隔振减振。

从桩基角度讲,四组元局域共振桩基中,在管桩保护下,软体层可设置成带孔型或离散状,如图 14 所示,此类设计,一方面可以进一步降低软体层刚度,可突破软体层材料类型和模型几何尺寸限制,

获得更低频带隙;另一方面,通过调整软体层在桩基轴向位置,可能有助于引导振动波定向传播,这可成为后续研究方向。

然而,当前本文只在二维上做了四组元局域共振结构浅显研究,尚未开展三维四组元局域共振结构及震源位置对四组元局域共振结构隔振性能的影响研究。

6 结 论

本文通过频散分析和时域分析,研究了周期性四组元局域共振桩基带隙特征及隔振性能,并与既有的三组元局域共振结构做对比,得到以下结论:

(1) 相比于三组元局域共振结构,四组元局域共振结构更容易出现完全带隙,且带隙宽度更大,带隙内振动衰减效果可提升近 30%。

(2) 在四组元局域共振桩中,管桩主要对带隙上边界产生影响,其中管桩密度与带隙上边界成负相关,管桩弹性模量与带隙上边界成正相关。相比于管桩密度,管桩弹性模量可对带隙产生质的影响,影响程度更大。对于指定材质的管桩,存在一个最佳的厚度,使得带隙宽度最大。

(3) 通过带隙上边界点的模态分析,并基于三组元局域共振结构带隙计算公式,确立了四组元局域共振结构带隙计算公式。

(4) 当基体较软时,三组元局域共振桩没有完全带隙且隔振性能较差,其内在原因是基体中存在“击穿”带,进而产生了泄露波,而在四组元局域共振桩中,管桩提升了土体的整体刚度,可预防“击穿”带的出现,改善隔振效果。

参 考 文 献

- [1] MELKE J, KRAMER S. Diagnostic methods in the control of railway noise and vibration[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1983, 87(2): 377-386.
- [2] HECKL M, HAUCK G, WETTSCHURECK R. Structure-borne sound and vibration from rail traffic[J]. *Journal of Sound & Vibration*, 1996, 193(1): 175-184.
- [3] 李小珍, 刘全民, 张迅. 高架轨道交通附近自由地表振动试验研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(16): 56-61.
LI Xiao-zhen, LIU Quan-min, ZHANG Xun. Ground vibration induced by inter-city express train[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(16): 56-61.
- [4] 巴振宁, 刘世朋, 吴孟桃. 周期分布桩体对平面 SH 波隔振效应的解析求解[J]. *岩土力学*, 2020, 41(9): 2861-2868.

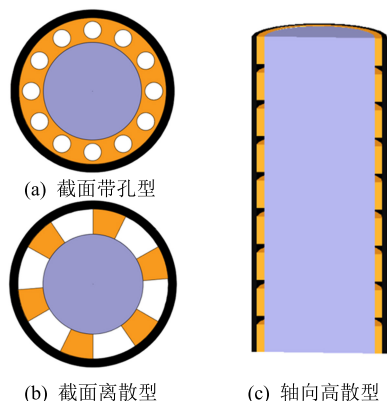


图 14 局域共振桩软体层设计

Fig.14 Soft layer design of local resonance pile

- BA Zhen-ning, LIU Shi-peng, WU Meng-tao. Analytical solution for isolation effect of periodically distributed pile-group barriers against plane elastic wave[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(9): 2861-2868.
- [5] RICHART F E, WOODS R D, HALL J R. Vibrations of soils and foundations[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1970: 137.
- [6] 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.
- [7] BRULE S, JAVELAUD E, ENOCH S. Experiments on seismic metamaterials: molding surface waves[J]. **Physical Review Letters**, 2013, 112(13): 133901.
- [8] 孙立强, 李嘉, 刘彬. 空沟、碎石填充沟和排桩隔振效果试验研究[J]. 地震工程学报, 2015, 37(2): 342-348.
- SUN Li-qiang, LI Jia, LIU Bin. Experimental study on vibration-isolation effects of open trench, gravel-filled trench, and piles in a row[J]. **China Earthquake Engineering Journal**, 2015, 37(2): 342-348.
- [9] CAI Y Q, DING G Y, XU C J. Screening of plane S waves by an array of rigid piles in poroelastic soil[J]. **Journal of Zhejiang University (Science A)**, 2008, 9(5): 589-599.
- [10] CAI Y Q, DING G Y, XU C J. Amplitude reduction of elastic waves by a row of piles in poroelastic soil[J]. **Computers & Geotechnics**, 2009, 36(3): 463-473.
- [11] 蔡袁强, 丁光亚, 徐长节. 饱和土中单排弹性桩对平面 S 波的屏蔽[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 964-969.
- CAI Yuan-qiang, DING Guang-ya, XU Chang-jie. Screening of plane S waves by a row of elastic piles in saturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(7): 964-969.
- [12] HUANG J K, SHI Z F. Attenuation zones of periodic pile barriers and its application in vibration reduction for plane waves[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2013, 332(19): 4423-4439.
- [13] 孟庆娟, 石志飞. 基于周期理论和 COMSOL PDE 的排桩减振特性研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4251-4260.
- MENG Qing-juan, SHI Zhi-fei. Ambient vibration attenuation by periodic pile barriers using periodic theory and COMSOL PDE method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(11): 4251-4260.
- [14] PU X B, MENG Q J, SHI Z F. Experimental studies on surface-wave isolation by periodic wave barriers[J]. **Soil Dynamics & Earthquake Engineering**, 2020, 130: 106000.
- [15] 陈洪运. 轨道交通路基段减隔振屏障的模型试验研究[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(6): 177-181.
- CHEN Hong-yun. Model test investigation on vibration isolation barriers applied to subgrade of rail transit[J]. **Chinese Railway Standard Design**, 2016, 60(6): 177-181.
- [16] 孙成龙, 高亮. 铁路排桩隔振效果实测分析[J]. 铁道建筑, 2016(3): 163-167.
- SUN Cheng-long, GAO Liang. Field measurement and analysis on vibration isolation effects of multi-rows of piles for railway engineering[J]. **Chinese Railway Construction**, 2016(3): 163-167.
- [17] ZHANG S L, WANG W B, WU Z Z, et al. Effect of periodic pile row in subway vibration isolation[J]. **Procedia Engineering**, 2017, 199: 302-309.
- [18] HUANG J K, SHI Z F. Vibration reduction of plane waves using periodic in-filled pile barriers[J]. **Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering**, 2015, 141(6): 04015018.
- [19] 姜博龙, 刘维宁, 马蒙. 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.
- JIANG Bo-long, LIU Wei-ning, MA Meng. Application of periodic pile in vibration isolation of rail transit based on bloch-floquet theory[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2018, 40(3): 146-152.
- [20] 刘维宁, 姜博龙, 马蒙, 等. 周期性排桩设计频段隔振原理性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4138-4148.
- LIU Wei-ning, JIANG Bo-long, MA Meng, et al. Elementary experimental investigation of the periodic piles for vibration isolation of design frequency range[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(11): 4138-4148.
- [21] LIU Z Y, ZHANG X X, MAO Y W, et al. Locally resonant sonic materials[J]. **Science**, 2000, 289(5485): 1734-1736.
- [22] 温激鸿. 声学超材料基础理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- WENG Ji-hong. Basic theory and application of acousticmetamaterials[M]. Beijing: Science Press, 2019.