中国科学: 技术科学 2024 年 第 54 卷 第 9 期: 1821 ~ 1836
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

论 文

拟声子晶体超材料混凝土的低频带隙特性与工程应用

肖鹏, 缪林昌*, 郑海忠, 雷利剑

东南大学交通学院岩土工程研究所, 南京 211189
* 联系人, E-mail: Lc.miao@seu.edu.cn

收稿日期: 2023-10-24; 接受日期: 2024-03-06; 网络版发表日期: 2024-09-05
国家自然科学基金项目(批准号: 52173248, 51578147)资助

摘要 超材料混凝土是具有弹性波带隙特性的新型复合材料, 但因较高的带隙频率和较窄的带隙宽度使其在以低频振动控制为主的工程应用上受到很大限制. 首先, 本文基于局域共振理论, 提出了一种新型三组元水泥基拟声子晶体模型, 据此研发出拟声子晶体超材料混凝土. 其次, 计算和分析了拟声子晶体超材料混凝土的能带结构、带隙机理和频率响应函数, 并开展了拟声子晶体超材料混凝土的室内试验. 最后, 用研发出的拟声子晶体超材料混凝土制备了拟声子晶体超材料混凝土地铁道床, 并应用到实际地铁工程中以解决地铁运营过程中产生的低频振动问题. 结果表明, 拟声子晶体超材料混凝土在200 Hz频段内打开了6个低频带隙, 在带隙频率范围内, 衰减值大多都在10 dB以上, 衰减效果较好; 拟声子晶体超材料混凝土地铁道床在200 Hz频段内具有显著的低频减振效果, 隧道壁三分之一倍频程插入损失的最大值为13.22 dB, 隧道壁铅垂向最大Z振级差值为5.052 dB, 隧道壁铅垂向最大分频振级差值为5.926 dB,4~200 Hz频段内铅垂向分频振级差值平均值为5.74 dB, 低频减振效果明显. 本文的相关研究成果为地铁工程和其他工程建设中解决低频振动难题提供了新的技术途径, 突破了土木工程结构的传统减振控制技术.

关键词 拟声子晶体模型, 拟声子晶体超材料混凝土, 局域共振理论, 低频带隙, 地铁道床, 减振性能

1 引言

混凝土作为土木工程材料中最常见的一种, 在诸多工程领域均被广泛使用, 但其较差的阻尼性能使得在结构中发挥的减振效果甚微[1], 故在需要控制振动的工程领域上应用受到很大约束. 近年来, 随着声子晶体复合材料的发展和局域共振理论的提出[2], 一种具有弹性波带隙特性的超材料混凝土引起了国内外学者们的重视, 并开展了广泛的研究[3~7]. 超材料混凝土作为特殊的新型复合材料, 是由柔性材料(包裹层)包裹的金属球(散射体)嵌入到水泥砂浆(基体)中形成, 所表现出的弹性波带隙特性使其在消能减震、爆炸屏蔽、冲击抗振和减振隔振的应用上具有巨大前景. 但超材料混凝土具有的带隙范围通常较高, 一般在几百

引用格式: 肖鹏, 缪林昌, 郑海忠, 等. 拟声子晶体超材料混凝土的低频带隙特性与工程应用. 中国科学: 技术科学, 2024, 54: 1821–1836
Xiao P, Miao L C, Zheng H Z, et al. Low frequency bandgap characteristics and engineering application of phononic-like crystal metamaterial concrete (in Chinese). Sci Sin Tech, 2024, 54: 1821–1836, doi: 10.1360/SST-2023-0335

© 2024 《中国科学》杂志社

到几千赫兹, 甚至上万赫兹[8], 且带隙宽度较窄, 故在低频振动控制领域(例如, 地铁产生的低频振动控制)的工程应用上具有很大局限性.

Mitchell等人[9]最早提出将重金属球用软的橡胶包裹代替传统粗骨料, 即用低密度的橡胶包裹高密度散射体, 并限制在水泥砂浆基体中, 形成超材料混凝土, 结果表明超材料混凝土能够把低频声波局域在散射体中, 但并没有出现明显的低频带隙, 只是减小了振动力的传递. Kettenbeil和Ravichandran[10]对超材料混凝土开展了冲击试验, 结果表明超材料混凝土具有减轻结构动态损伤的潜力. Jin等人[11]对超材料混凝土在爆炸荷载作用下的衰减机理进行了探讨与分析. Chen等人[12]基于局域共振理论提出了一种超材料混凝土结构模型, 并采用有限元方法分析了散射体材料参数对超材料混凝土结构模型的带隙影响. Xu等人[13]研究了具有三种类型骨料的超材料混凝土的动态性能, 获得了不同应变速率下超材料混凝土的破坏过程、破坏模式、动态抗压强度和能量吸收能力.

水泥基声子晶体带隙的数量和宽度决定了超材料混凝土对弹性波的抑制范围和能力, 传统的水泥基声子晶体有且仅有一条带隙, 故由其构成的超材料混凝土也就只有一条衰减带且带隙频率较高, 在实际工程应用上具有较大局限性. 为了拓宽超材料混凝土对弹性波的衰减范围和数量, 本文基于局域共振理论提出了一种新型三组元水泥基拟声子晶体模型, 据此研发了拟声子晶体超材料混凝土, 并用研发出的拟声子晶体超材料混凝土制备了拟声子晶体超材料混凝土地铁道床应用到实际地铁工程中. 本文采用有限元方法计算和分析了拟声子晶体超材料混凝土的能带结构、带隙机理和衰减特性, 并开展了拟声子晶体超材料混凝土的室内试验以分析其强度和工作性能, 最后分析了拟声子晶体超材料混凝土地铁道床在地铁实际运营过程中的减振性能.

2 局域共振型声子晶体

2.1 三组元局域共振原胞模型

根据构成局域共振型声子晶体的材料组分特点, 一般可将局域共振结构划分为二组元、三组元和多组元结构. 其中二组元结构一般只能获得布拉格带隙, 带隙位置的频率较高, 不便于实际工程应用. 但是, 通过合理选择散射体和基体的材料组合形式, 二组元结构同样可得到局域共振带隙. 但二组元局域共振结构对材料组合要求较为苛刻, 只能在特定的材料和结构组合条件下实现, 依靠参数配置来进行局域共振带隙调控的操作空间较窄. 三组元局域共振结构是伴随着局域共振理论而提出, 刘正猷教授[2]将铅球散射体用黏弹性软材料包裹后以简单立方排列形式置于环氧树脂基体中, 获得了波长远大于结构尺寸的低频带隙, 首次证明了局域共振带隙的存在, 并探讨了局域共振带隙的产生机理. 三组元局域共振原胞模型结构如图1所示, 研究[14,15]表明, 只要合理设置材料参数的组合形式, 尤其是弹性模量较小的包裹层材料的选取, 即可实现三组元局域共振结构, 获得频率较低的局域共振带隙. 进一步, 对材料参数和结构参数进行组合优化, 可实现局域共振带隙的调控和拓宽. 多组元结构是通过增加多种组分来实现局域共振带隙的多样化, 可以在目标频率范围产生更丰富的带隙, 有利于带隙的调控和拓宽, 但其带隙机理与三组元结构一致, 本质上是在三组元结构的基础上增加多个谐振单元.

综上可知, 三组元局域共振结构形式较为简单, 容易得到低频带隙, 便于快速构造和工程应用, 更利于实际工程的制备和施工, 在低频振动控制领域具有较大的发展潜力, 是较为典型的局域共振结构模型, 有利于新型超材料混凝土的研发.

典型三组元局域共振结构一般由散射体、包裹层和基体三部分组成, 较软的包裹层材料围绕密度较大的散射体, 周期性地嵌入基体材料中形成局域共振结构, 并具有显著的低频带隙特性. 但要获得优质的局域共振带隙, 散射体的密度要尽可能大, 而包裹层弹性模量和基体密度则需要尽可能小. 传统局域共振结

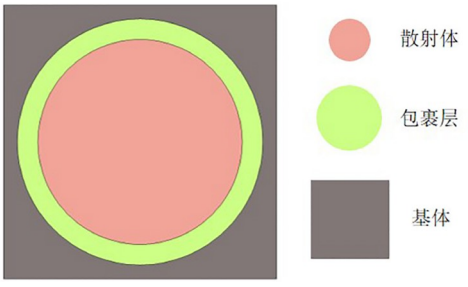


图 1 (网络版彩图)三组元局域共振原胞模型

Figure 1 (Color online) Three-component local resonance primitive cell model.

构的构建一般是以金、铅、钨等密度较大的贵金属作为散射体, 以橡胶等弹性模量较小的材料作为包裹层, 其构造和制备成本很高, 不便于大规模工程应用, 对于土木工程领域并不现实. 现有局域共振结构得到的带隙频率仍然较高, 而地铁振动的主频一般较低, 现有局域共振结构对于地铁振动主频的覆盖仍存在难度. 因此, 选择易于获得且成本较低的工程材料来构造局域共振结构, 对于地铁低频振动的控制更具有意义.

基于三组元局域共振模型的构造特征和材料特性, 对现有工程建筑材料进行广泛的调研比选, 并充分考虑到土木工程材料制备和应用的可行性, 课题组研究[16~18]提出可用于低频减振的高分子混凝土材料, 其主要由玄武岩骨料、高分子颗粒和水泥砂浆三种组分构成. 高分子混凝土各组分材料的弹性常数差异显著, 其中玄武岩骨料密度较大, 而高分子颗粒的弹性模量和密度均较小, 水泥砂浆具有较好的胶结性能, 可作为基体来构造具有较高强度的局域共振结构. 在高分子混凝土制备过程中, 发泡高分子颗粒可悬浮在玄武岩骨料散射体周围形成包裹层, 嵌入水泥砂浆基体中形成三组元局域共振结构, 满足局域共振理论模型的基本特征. 此外, 高分子混凝土在实际制备时, 骨料散射体和高分子颗粒的分布并非遵循严格的周期性, 而是呈现一定的拟周期性, 且骨料散射体具有一定级配, 即存在不同粒径的骨料, 可形成具有多重散射体的局域共振声子晶体结构.

2.2　新型水泥基拟声子晶体原胞模型

综上所述, 本文基于局域共振理论与高分子混凝土的材料特性和结构特征, 提出一种新型三组元水泥基拟声子晶体原胞模型, 其为多个原胞随机排列于水泥砂浆基体中构成的复合结构, 如图2所示. 其内部由5个单独的散射体及包裹层组成, 外部为水泥砂浆基体. 为了便于后续研究与分析, 将散射体编号为1、2、3、4、5, 基体指代为M. 其中, 散射体为玄武岩骨料, 包裹层为聚苯乙烯泡沫颗粒, 基体为水泥砂浆. 模型的结构参数和材料参数如表1和2所示.

2.3　计算方法

常用的能带结构求解方法主要有平面波展开法、传递矩阵法、集中质量法和有限元法等, 其中有限元法(Finite element method, FEM)具有较强的适用性、

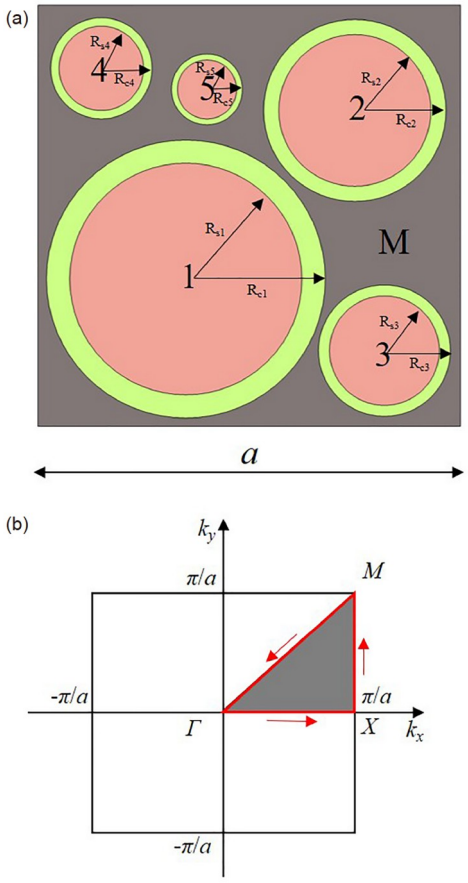


图 2　(网络版彩图)新型三组元水泥基拟声子晶体原胞模型及第一布里渊区. (a) 新型三组元水泥基拟声子晶体原胞模型; (b) 第一布里渊区

Figure 2　(Color online) Novel three-component cement-based phononic-like crystal primitive cell model and the first Brillouin region. (a) Novel three-component cement-based phononic-like crystal primitive cell model; (b) the first Brillouin region.

较好的收敛性和较高的计算精度等优势, 在计算具有复杂结构的声子晶体的能带结构时具有显著的优越性, 因此被广泛用于声子晶体的带隙计算. 故本文采用有限元法来计算提出的新型三组元水泥基拟声子晶体结构的带隙.

弹性波在各向均匀同性介质中传播的控制方程可表示为

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

式中, $\mathbf{u}$为位移向量, $\mathbf{f}$为体力矢量, ρ为质量密度, λ和μ为拉梅常数, ∇为哈密顿微分算子, $\cdot$为点积.

由于本文提出的新型三组元水泥基拟声子晶体在x和y方向上是无限周期结构, 根据Bloch-Floquet定

表 1 结构参数

Table 1 Structure parameters

散射体i	散射体内径R_{si} (m)	包裹层外径R_{ci} (m)	晶格常数a (m)
1	0.0275	0.033	
2	0.018	0.0216	
3	0.013	0.0156	0.1
4	0.01	0.012	
5	0.007	0.0084	

表 2 材料参数

Table 2 Material parameters

组分	密度ρ (kg/m^3)	弹性模量E (Pa)	剪切模量G (Pa)
散射体	3300	1.2×10^{11}	4.8×10^{10}
包裹层	12	1.34×10^{5}	5.93×10^{4}
基体	2000	3.45×10^{10}	1.44×10^{10}

理[19]，相关计算可在单个原胞内进行. 原胞周期边界条件上的所有节点位移均应满足:

$$\mathbf{u}(\mathbf{r},t)=\mathrm{e}^{\mathrm{i}(\mathbf{kr}-\omega t)}\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}), \tag{2}$$

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}+\mathbf{R})=\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})e^{\mathrm{i}\mathbf{k}\cdot\mathbf{R}}, \tag{3}$$

式中, $\mathbf{k}$为波矢, $\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$为波振幅, $\mathbf{R}$为格矢, ω为波动角频率.

在控制方程中应用周期边界条件，典型局域共振原胞的特征值方程可写为

$$(\mathbf{K}-\omega^2\mathbf{M})\mathbf{U}=0, \tag{4}$$

式中, $\mathbf{K}$为典型单元的刚度矩阵, $\mathbf{M}$为质量矩阵, $\mathbf{U}$为所有节点的位移矩阵.

沿着图2(b)阴影部分所示的不可约布里渊区边界(M–Γ–X–M)扫描波矢$\mathbf{k}$, 即可得到能带结构. 在计算中设定了x和y方向的Bloch周期边界条件$\mathbf{k}_x$和$\mathbf{k}_y$. 本文采用商业多物理场仿真软件COMSOL固体力学模块特征频率求解器计算新型三组元水泥基拟声子晶体的能带结构. 由于提出的新型三组元水泥基拟声子晶体结构规则、应力分布均匀且单元尺寸较小，故采用常规自由三角形单元进行有限元网格划分，如图3所示.

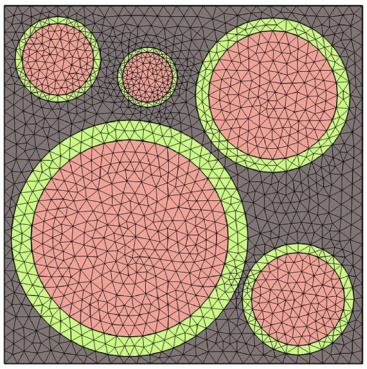


图 3 (网络版彩图)能带结构计算中的网格划分

Figure 3 (Color online) Grid division in band structure calculation.

3 拟声子晶体超材料混凝土减振特性

3.1 能带结构

基于有限元法计算了拟声子晶体超材料混凝土的完整能带结构, 在模型四周施加周期性边界条件, 并在模型底部施加弹性约束以模拟拟声子晶体超材料混凝土道床应用于实际地铁工程时受到的基础约束作用, 计算结果如图4所示. 从图中可看出拟声子晶体超材料混凝土在200 Hz频段内打开了6个低频带隙, 带隙区间分别为0.5~29.87, 47.98~55.55, 61.83~69.59, 74.52~82.27, 86.26~99.42, 104.75~124.09 Hz, 带隙总宽度为84.95 Hz.

3.2 带隙机理

为了更全面地理解拟声子晶体超材料混凝土的带隙特性，提取各带隙边界处的振动模态和位移场进行分析，进而分析其带隙机理. 位移场和振动模态云图的颜色梯度与位移归一化幅值呈现正相关，从蓝色到红色位移幅值逐渐增大，更直观地表达了原胞的相对振动幅值分布，箭头方向表示结构内该点位移矢量的振动方向. 振动模态可表征特定频率下拟声子晶体超材料混凝土的振动形式特征，位移场分布可表示带隙边界的原胞位移分布和主导特征. 综合分析振动模态和位移场，可揭示拟声子晶体超材料混凝土的带隙机理.

对于图4中的P点, 即第一带隙截止频率, 其振动模态和位移场见图5所示. 图5(a)的振动模态表明此时基体和各原胞作为一个整体表现出平移振动，图5(b)的

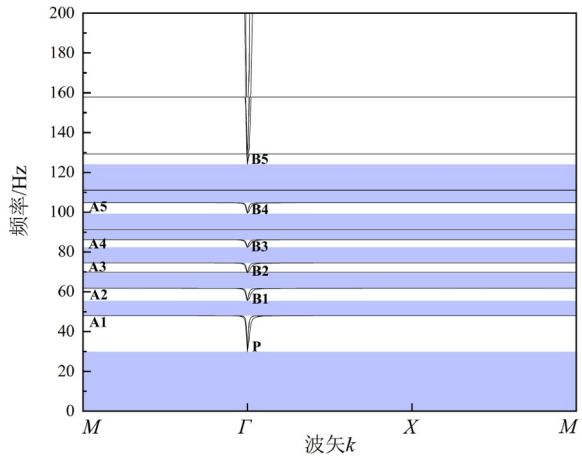


图 4　(网络版彩图)拟声子晶体超材料混凝土模型能带结构

Figure 4　(Color online) Band structure of phononic-like crystal metamaterial concrete model.

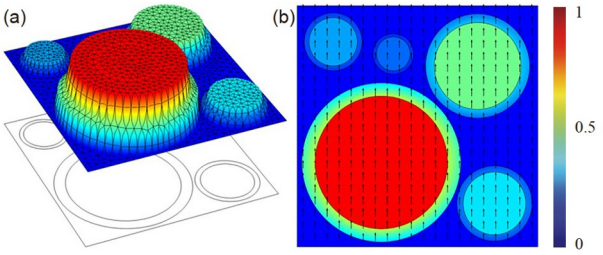


图 5　(网络版彩图)第一带隙截止频率振动模态和位移场. (a) 振动模态; (b) 位移场

Figure 5　(Color online) Vibration mode and displacement field of the first bandgap cutoff frequency. (a) Vibration mode; (b) displacement field.

位移场也可看出基体和各原胞的振动方向一致, 这表明第一带隙是由于基础约束作用引起的拟声子晶体超材料混凝土整体振动所导致.

图4中的A1点对应拟声子晶体超材料混凝土的第二带隙起始频率, 其振动模态如图6(a)所示, 可以看出此时水泥砂浆基体保持静止, 原胞1的平移运动引起了强烈的耦合效应, 导致了第二带隙的打开. 对于第二带隙截止频率, 即图4中的B1点, 图6(b)的振动模态表明此时主要振动集中在原胞2中, 而水泥砂浆基体与其他原胞也保持一定的振动, 但幅值较小. 从图7的位移场分布可以看出, 在第二带隙截止频率处, 原胞1与其他区域反向运动, 为了便于指代分析, 将导致第二带隙打开的原胞1定义为控制原胞, 截止频率处与原胞1反向运动的基体和其余原胞则定义为广义基体. 容易发现,

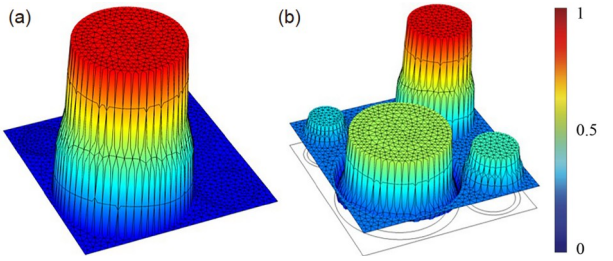


图 6　(网络版彩图)第二带隙振动模态. (a) 第二带隙起始频率; (b) 第二带隙截止频率

Figure 6　(Color online) Vibration mode of the second bandgap. (a) Second bandgap starting frequency; (b) second bandgap cutoff frequency.

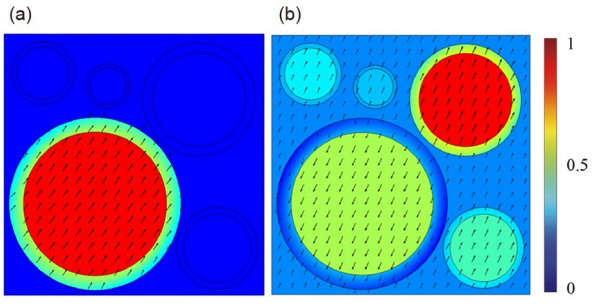


图 7　(网络版彩图)第二带隙位移场. (a) 第二带隙起始频率; (b) 第二带隙截止频率

Figure 7　(Color online) Displacement field of the second bandgap. (a) Second bandgap starting frequency; (b) second bandgap cutoff frequency.

控制原胞1与广义基体(2+3+4+5+M)的相对运动使得耦合效应减弱, 这导致了第二带隙的闭合.

图4中的A2和B2点分别对应第三带隙的起始频率和截止频率, 其振动模态如图8所示, 第三带隙起始频率处表现为原胞2主导的平移振动, 此时结构中原胞2与基体表现出强烈的耦合效应, 原胞的局域共振作用导致原有的频散曲线被切断, 从而引起第三带隙的打开. 对于第三带隙截止频率, 主要振动集中在散射体3中, 散射体2的振动次之, 基体和其他原胞仍保持一定幅值的振动. 图9的位移场表明, 在第三带隙截止频率处, 区域(1+2)与广义基体(3+4+5+M)表现出相对运动, 结构的耦合效应减弱, 导致第三带隙的闭合.

图4中的A3和B3点分别对应第四带隙的起始频率和截止频率, 其振动模态如图10所示, 可以看出起始频率处结构中以原胞3的平移振动为主, 其余原胞和基体相对静止, 在第四带隙截止频率处, 图11(b)的位移场表明区域(1+2+3)与广义基体(4+5+M)表现出相对运动, 结构耦合效应减弱, 导致第四带隙的闭合.

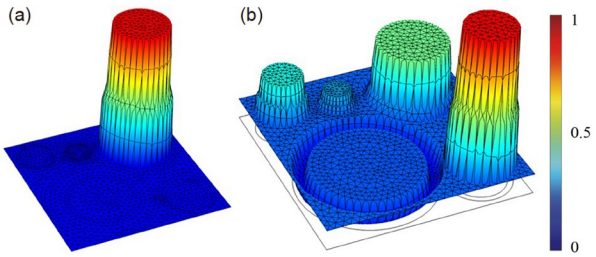


图 8 (网络版彩图)第三带隙振动模态. (a) 第三带隙起始频率; (b) 第三带隙截止频率

Figure 8 (Color online) Vibration mode of the third bandgap. (a) Third bandgap starting frequency; (b) third bandgap cutoff frequency.

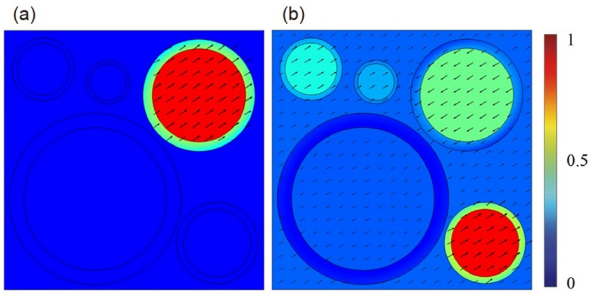


图 9 (网络版彩图)第三带隙位移场. (a) 第三带隙起始频率; (b) 第三带隙截止频率

Figure 9 (Color online) Displacement field of the third bandgap. (a) Third bandgap starting frequency; (b) third bandgap cutoff frequency.

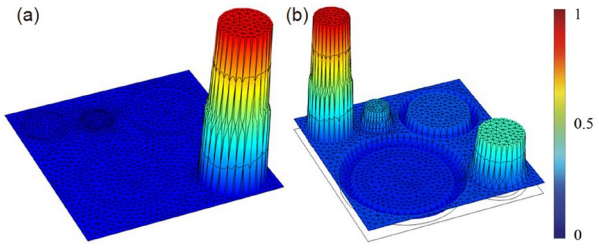


图 10 (网络版彩图)第四带隙振动模态. (a) 第四带隙起始频率; (b) 第四带隙截止频率

Figure 10 (Color online) Vibration mode of the fourth bandgap. (a) Fourth bandgap starting frequency; (b) fourth bandgap cutoff frequency.

图4中的A4和B4点分别对应第五带隙的起始频率和截止频率, 其振动模态和位移场分别如图12和13所示. 在第五带隙起始频率处, 振动模态和位移场均表明结构中以原胞4的平移振动为主, 其余原胞和基体相对静止. 而在第五带隙截止频率处, 图13(b)表明区域(1+2+3+4)与广义基体(5+M)表现出相对运动, 结构耦合效应减弱, 导致带隙的闭合. 结合第一至第五带

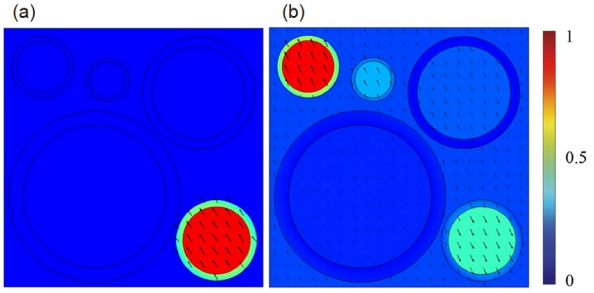


图 11 (网络版彩图)第四带隙位移场. (a) 第四带隙起始频率; (b) 第四带隙截止频率

Figure 11 (Color online) Displacement field of the fourth bandgap. (a) Fourth bandgap starting frequency; (b) fourth bandgap cutoff frequency.

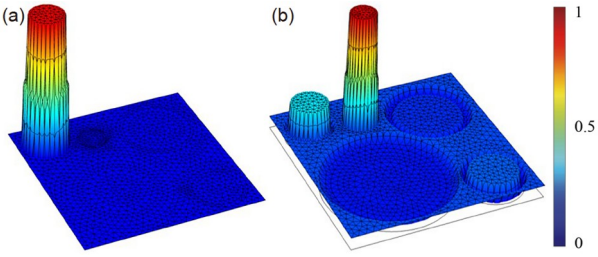


图 12 (网络版彩图)第五带隙振动模态. (a) 第五带隙起始频率; (b) 第五带隙截止频率

Figure 12 (Color online) Vibration mode of the fifth bandgap. (a) Fifth bandgap starting frequency; (b) fifth bandgap cutoff frequency.

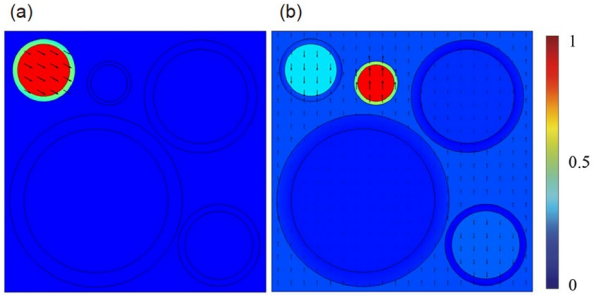


图 13 (网络版彩图)第五带隙位移场. (a) 第五带隙起始频率; (b) 第五带隙截止频率

Figure 13 (Color online) Displacement field of the fifth bandgap. (a) Fifth bandgap starting frequency; (b) fifth bandgap cutoff frequency.

隙的位移场分布规律可以看出, 随着带隙的位置逐渐自低频向高频移动, 在截止频率处与广义基体做相对振动的区域逐渐增大.

图4中的A5和B5点分别对应第六带隙的起始频率和截止频率, 其振动模态和位移场分别如图14和15所

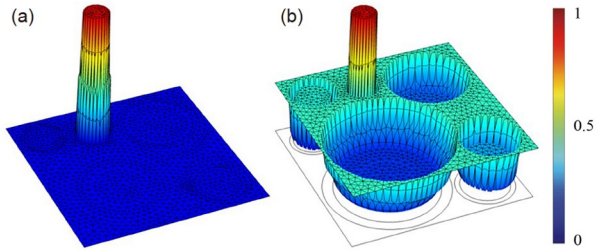


图 14　(网络版彩图)第六带隙振动模态. (a) 第六带隙起始频率; (b) 第六带隙截止频率

Figure 14　(Color online) Vibration mode of the sixth bandgap. (a) Sixth bandgap starting frequency; (b) sixth bandgap cutoff frequency.

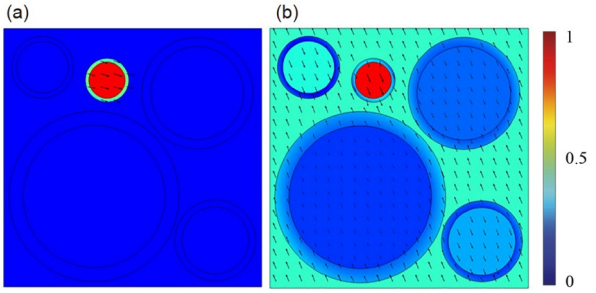


图 15　(网络版彩图)第六带隙位移场. (a) 第六带隙起始频率; (b) 第六带隙截止频率

Figure 15　(Color online) Displacement field of the sixth bandgap. (a) Sixth bandgap starting frequency; (b) sixth bandgap cutoff frequency.

示, 可看出第六带隙的打开是由最小的原胞5的平移振动引起. 不同于前五条带隙, 在第六带隙截止频率处, 位移主要集中于水泥砂浆基体, 表现为基体和所有原胞的相对错动, 原胞与基体的耦合作用减弱导致了带隙的关闭.

综上可知, 拟声子晶体超材料混凝土低频带隙的打开, 与各原胞的振动特征呈现出对应关系, 因特定原胞的平移振动触发, 由特定原胞与基体的耦合作用的强度所控制. 在带隙起始频率处, 这种耦合作用强度最大, 能带结构上原有的频散曲线因振子的局域共振作用被切断, 低频带隙被打开. 当该原胞与基体的耦合作用减弱时, 带隙被关闭.

3.3　频率响应函数

对于有限周期的声子晶体结构需要通过频率响应函数计算来评价其衰减效果, 为了分析本文所研发的拟声子晶体超材料混凝土的整体衰减特性, 建立了1×8阵列的拟声子晶体超材料混凝土模型来计算其频率响应函数, 如图16所示. 在拟声子晶体超材料混凝土模型的左侧激励端施加x和y方向的谐波加速度载荷V_0, 在模型右侧接收端拾取相应的加速度幅值响应V. 频率响应函数定义为

$$T = 20\log\frac{V}{V_0}, \tag{5}$$

式中, T为频率响应函数, 单位: dB; V和V_0分别为模型接收端和激励端的加速度幅值.

计算参数与能带结构求解所用参数相同, 激励频率以0.01 Hz的频率步长从0 Hz到200 Hz进行线性扫描, 以确保足够的分析精度, 计算结果如图17所示. 从图中可看出, 能带结构(图4)得到的带隙范围和频率响应函数得到的衰减频率范围基本一致, 这也证实了本文提出的新型三组元水泥基拟声子晶体带隙范围的准确性. 此外, 可以看出, 拟声子晶体超材料混凝土的频率响应函数曲线呈现明显的非对称特征, 即衰减曲线在带隙起始频率处迅速下降, 随着频率的增加而逐渐上升, 这是Fano共振[20,21]引起的局域共振带隙的典型特征. 在带隙频率范围内, 拟声子晶体超材料混凝土的衰减值大多都在10 dB以上, 衰减效果较好.

4　拟声子晶体超材料混凝土室内试验

4.1　试验材料及制备方法

4.1.1　试验材料

拟声子晶体超材料混凝土制备选用的胶凝材料主要有水泥、粉煤灰和矿粉. 粗骨料采用密度较大的玄武岩碎石骨料, 碎石粒径为两种级配, 粒径分别为15~25和5~15 mm, 两种级配碎石按质量比7:3混合使用, 细骨料为南京本地产江砂. 选用的高分子颗粒骨

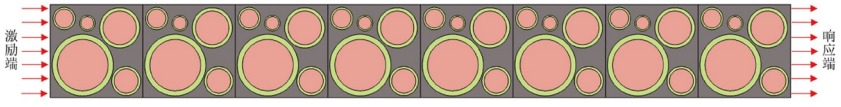


图 16　(网络版彩图)拟声子晶体超材料混凝土的频率响应函数计算模型

Figure 16　(Color online) Frequency response function calculation model of phononic-like crystal metamaterial concrete.

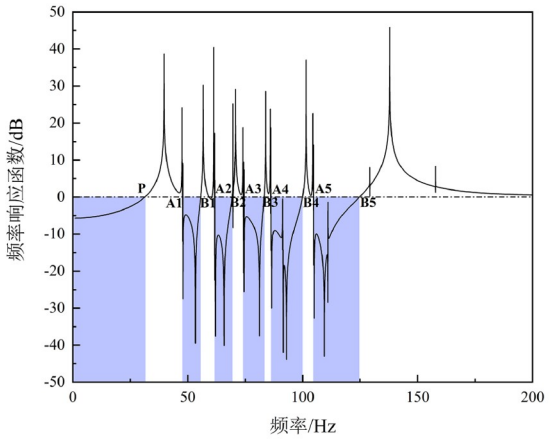


图 17 (网络版彩图)拟声子晶体超材料混凝土的频率响应函数

Figure 17 (Color online) Frequency response function of phononic-like crystal metamaterial concrete.

料为阻燃型发泡聚苯乙烯(Expanded polystyrene bead)颗粒，是由聚苯乙烯树脂经发泡形成的具有闭孔结构的轻质高分子聚合物. 现有减水剂主要分为普通减水剂、高效减水剂和高性能减水剂三类，其中普通和高效减水剂的减水率不超过14%，而以聚羧酸系减水剂为代表的高性能减水剂的减水率可达到25%以上. 因此，为了制备具有较好工作性能的高分子混凝土，减水剂采用江苏苏博特新材料股份有限公司生产的PCA-1型高性能聚羧酸减水剂，其固含量为22%，减水率为30%，随掺量增加减水率可达到50%以上.

基于三组元局域共振结构的构建和带隙拓宽的考虑，拟声子晶体超材料混凝土选用了密度较大的玄武岩骨料和密度较小的高分子颗粒，而刚性骨料和柔性颗粒的混合，容易造成混凝土离析，引起材料性质的不均匀，因此需要添加剂来调节拟声子晶体超材料混凝土的均匀性和强度稳定性. 添加剂A为高分子聚合材料，密度为1200 kg/m^3，固含量为55%，pH值8~9.5，黏度2000 m Pa s，可对聚苯乙烯颗粒进行表面改性，将高分子颗粒表面的憎水特性改善为亲水特性. 添加剂B为新型功能高分子材料，表观密度500 kg/m^3，比重为1.3，其水溶液的表面张力大于40 dyn/cm，具有较好的分散性和黏结性，可改善拟声子晶体超材料混凝土的黏聚性. 合理调整添加剂A和添加剂B的掺量，可控制高分子颗粒的离析上浮和团聚，保证拟声子晶体超材料混凝土强度的均匀性.

4.1.2 制备方法

拟声子晶体超材料混凝土详细制备流程见图18所示，首先将高分子颗粒与添加剂A混合搅拌30 s以改善颗粒表面的憎水性，随后加入粗骨料和细骨料搅拌30 s，之后加入水泥、粉煤灰和矿粉等胶凝材料以及添加剂B搅拌30 s，最后将已添加聚羧酸高性能减水剂的拌合用水加入拌合物并充分搅拌5 min，得到均匀拌合的拟声子晶体超材料混凝土. 此外，拟声子晶体超材料混凝土搅拌完成后要及时清洗搅拌机，防止下次试验中混凝土积料吸水导致的试验结果不稳定现象. 在拟声子晶体超材料混凝土搅拌均匀后，立即进行坍落度试验并记录，以避免因静置时间过长造成拟声子晶体超材料混凝土的和易性损失. 坍落度测试完成后，将拌合物装入100 mm×100 mm×100 mm的模具中进行试样制备，由于引入添加剂提高了混凝土的黏聚性，仅靠自重和插捣无法获得较好的密实性，因此将拌合物置于振动台来进行振动密实. 振动期间要注意颗粒上浮，振动密实后用抹刀进行表面抹平处理，在试样表面覆盖塑料薄膜防止水分蒸发引起表面开裂. 静置一天后拆模并进行标准养护，待试样达到28 d龄期后，开展抗压强度测试.

4.2 试验方案及结果

4.2.1 试验方案

通过调节高分子颗粒掺量和优化配合比，可制备出工作性能和强度性能均满足地铁工程要求的C35、C40和C50强度等级的拟声子晶体超材料混凝土. 由于篇幅的限制，本文只给出C40强度等级拟声子晶体超材料混凝土的试验方案，见表3所示，后续论文将给出不同强度等级拟声子晶体超材料混凝土的试验方案及结果.

4.2.2 试验结果

C40强度等级拟声子晶体超材料混凝土试验的坍落度和抗压强度结果见表4所示，图19为C40强度等级拟声子晶体超材料混凝土坍落度. 可以看出，拌合物坍落度随着水胶比的降低而减小，在水胶比0.25~0.28之间，拌合物都能保持较大的坍落度，当水胶比降低至0.24时，拌合物流动性显著下降，此时坍落度仅为170 mm.

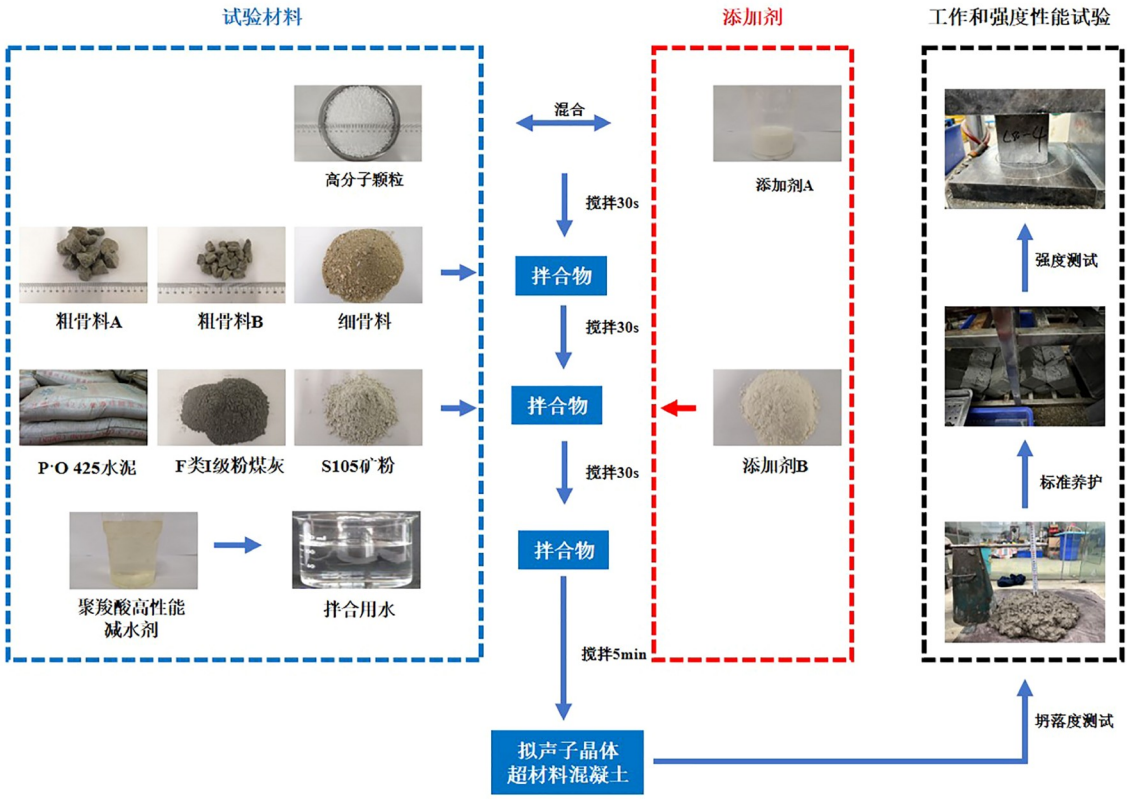


图 18　(网络版彩图)拟声子晶体超材料混凝土制备及测试流程

Figure 18　(Color online) Preparation and testing process of phononic-like crystal metamaterial concrete.

表 3　C40强度等级拟声子晶体超材料混凝土试验方案(1 m^3)

Table 3　Test scheme of C40 strength grade phononic-like crystal metamaterial concrete (1 m^3)

配比编号	水泥 (kg)	粉煤灰 (kg)	矿粉 (kg)	砂 (kg)	骨料A (kg)	骨料B (kg)	水 (kg)	减水剂 (kg)	添加剂A (kg)	添加剂B (kg)	高分子颗粒(m^3)
G1	514	30	60	607	556	238	169.1	14.50	6.04	0.48	0.18
G2	514	30	60	607	556	238	163.1	14.50	6.04	0.48	0.18
G3	514	30	60	607	556	238	157.0	14.50	6.04	0.48	0.18
G4	514	30	60	607	556	238	151.0	14.50	6.04	0.48	0.18
G5	514	30	60	607	556	238	145.0	14.50	6.04	0.48	0.18

对比拟声子晶体超材料混凝土的工作性能和强度性能可知, 当拌合物坍落度过小时, 拟声子晶体超材料混凝土的密实度较差, 内部孔隙较为密集, 抗压强度较小; 而当拌合物坍落度过大时, 拟声子晶体超材料混凝土容易发生离析, 造成高分子颗粒上浮, 抗压强度波动较为明显. 由于增加了胶凝材料和添加剂的掺量, 不可避免地引起拟声子晶体超材料混凝土拌合物的黏度提高, 坍落度试验也表明, 与普通混凝土不同, 拟声子晶体超材料混凝土因黏性较大而坍落缓慢, 但最终坍落度数值较大, 因此不能借鉴普通混凝土的坍落度指标, 应制定符合拟声子晶体超材料混凝土工作性能要求的坍落度控制标准, 为了同时保持较好的工作性能和较稳定的抗压强度, 拟声子晶体超材料混凝土的坍落度宜控制在180~230 mm.

C40强度等级拟声子晶体超材料混凝土抗压强度见图20所示, 随着水胶比的减小, 抗压强度先增大后减

表 4 C40强度等级拟声子晶体超材料混凝土和易性及抗压强度

Table 4 Workability and compressive strength of C40 strength grade phononic-like crystal metamaterial concrete

配比编号	水胶比	坍落度 (mm)	密度 (kg/m^3)	28 d抗压强度 (MPa)
G1	0.28	230	2223	42.6
G2	0.27	225	2197	44.3
G3	0.26	225	2253	45.5
G4	0.25	220	2251	48.7
G5	0.24	170	2242	43.3

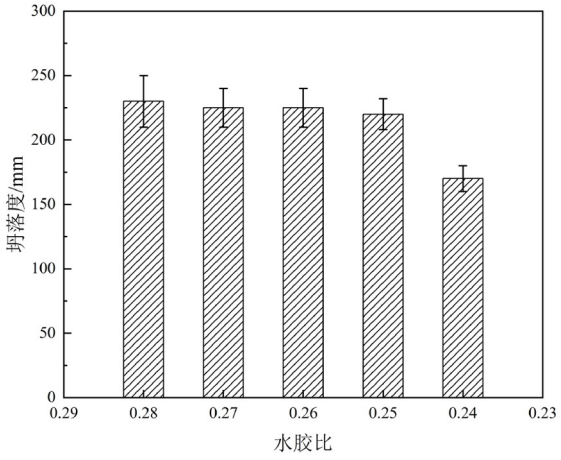


图 19 C40强度等级拟声子晶体超材料混凝土坍落度

Figure 19 Slump of C40 strength grade phononic-like crystal metamaterial concrete.

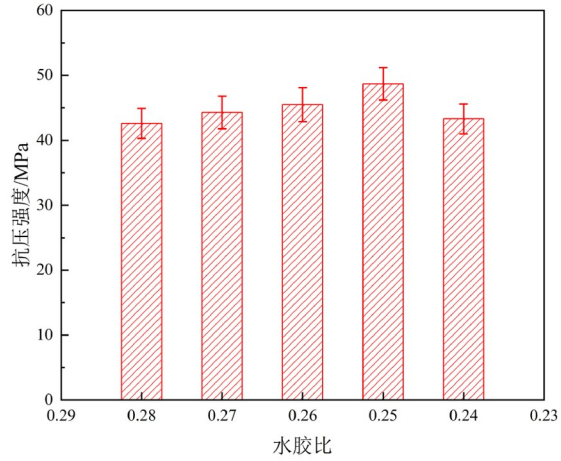


图 20 (网络版彩图)C40强度等级拟声子晶体超材料混凝土抗压强度

Figure 20 (Color online) Compressive strength of C40 strength grade phononic-like crystal metamaterial concrete.

小, 在水胶比0.25时抗压强度达到最大值48.7 MPa. 当水胶比大于0.25时, 水胶比每降低0.01, 抗压强度增加2.7%~7.0%. 综合对比坍落度和抗压强度规律, 在降低水胶比的同时适当增加减水剂掺量, 可以得到和易性较好且强度较高的拟声子晶体超材料混凝土, 对于C40强度等级拟声子晶体超材料混凝土优选水胶比为0.25的配合比.

C40强度等级拟声子晶体超材料混凝土的微观形貌如图21所示, 放大1000倍的微观形貌图显示, 相比于C35强度等级拟声子晶体超材料混凝土, 水泥和粉煤灰的水化程度相对更加充分, 水泥砂浆基体更为致密, 微裂缝和孔洞明显减少, 5000倍电镜照片表明骨料与水泥浆体的界面过渡区具有较为良好的胶结, 未见明显的界面裂缝产生.

5 实际地铁工程应用

用研发的拟声子晶体超材料混凝土现场浇筑了C40强度等级的拟声子晶体超材料混凝土地铁道床应用于南京地铁1号线北延工程的晓庄站到吉祥庵站之间, 浇筑长度96 m. 南京地铁1号线北延工程起自迈皋桥站, 北至二桥公园站, 线路全长6.54 km, 包括晓庄站、吉祥庵站、燕子矶站、笆斗山站、二桥公园站, 全线共设车站5座, 全部为地下线路, 采用市域A型车, 6辆编组, 地下段最高运行速度80 km/h.

5.1 振动测试

南京地铁1号线应用的拟声子晶体超材料混凝土地铁道床强度等级为C40, 监测设备布置于拟声子晶体超材料混凝土地铁道床板段中心位置. 为了对照拟声子晶体超材料混凝土地铁道床板的减振效果, 选取

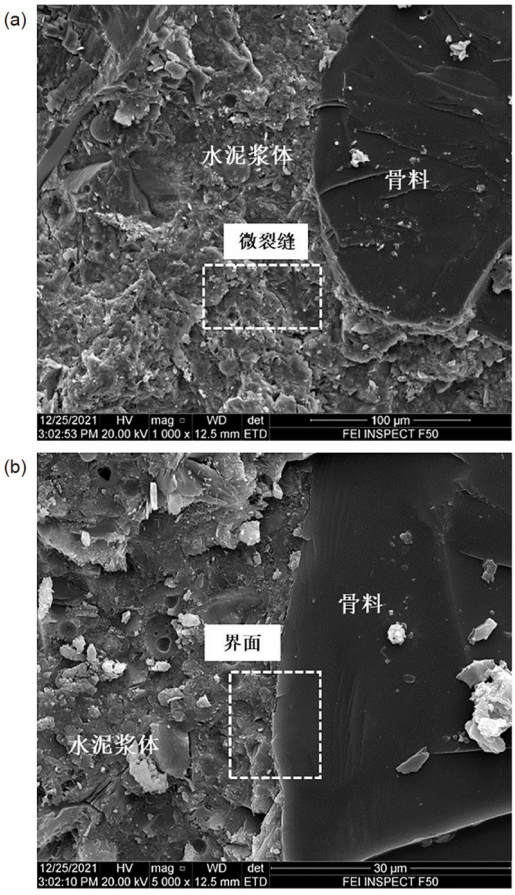


图 21　C40强度等级拟声子晶体超材料混凝土微观结构. (a) ×1000; (b) ×5000

Figure 21　Microstructure of C40 strength grade phononic-like crystal metamaterial concrete. (a) ×1000; (b) ×5000.

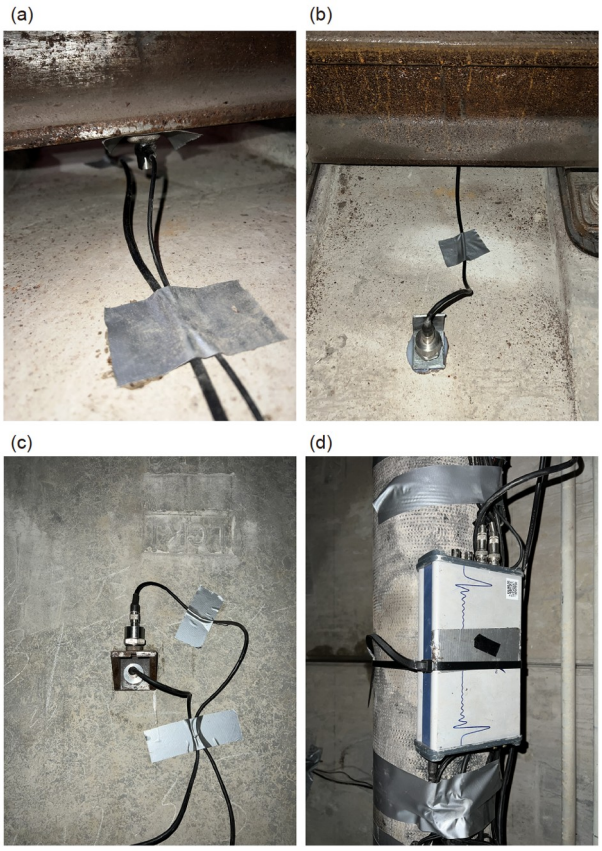


图 22　(网络版彩图)加速度传感器和振动监测采集仪. (a) 钢轨加速度传感器; (b) 道床加速度传感器; (c) 隧道壁加速度传感器; (d) 采集仪

Figure 22　(Color online) Layout of acceleration sensor and vibration monitoring and acquisition instrument. (a) Steel rail acceleration sensor; (b) track bed acceleration sensor; (c) tunnel wall acceleration sensor; (d) acquisition instrument.

与其相邻的普通混凝土道床的中部布置监测断面，普通混凝土道床和拟声子晶体超材料混凝土地铁道床测试断面均位于隧道直线段. 图22为现场监测设备安装的情况.

5.2　振动测试结果

图23为普通混凝土道床和拟声子晶体超材料混凝土道床在钢轨、道床和隧道侧壁监测到的振动信号时域曲线. 可以看出, 地铁列车振动自轨道、道床传递至隧道壁, 随传播距离增大加速度幅值迅速减小, 并且相比于普通混凝土道床，应用拟声子晶体超材料混凝土道床后钢轨、道床和隧道壁处的振动幅值均有较为明显的减小，这表明拟声子晶体超材料混凝土道床对于地铁振动具有较为显著的衰减效果.

图24为普通混凝土道床和拟声子晶体超材料混凝土道床在钢轨、道床和隧道侧壁监测到的振动信号频域曲线. 可以更直观看出拟声子晶体超材料混凝土道床对于地铁振动具有显著的减振效果.

为了进一步分析拟声子晶体超材料混凝土道床的减振性能，计算了普通混凝土道床和拟声子晶体超材料混凝土道床在隧道壁1.2 m处的三分之一倍频程及插入损失，如图25所示. 可以看出，振动衰减区间为4~250 Hz, 最大插入损失为13.22 dB, 表明拟声子晶体超材料混凝土道床具有较好的低频减振效果.

同时，计算了普通混凝土道床和拟声子晶体超材料混凝土道床在隧道壁处的铅垂向Z振级(1~80 Hz), 如图26所示. 普通混凝土道床隧道壁铅垂向最大Z振

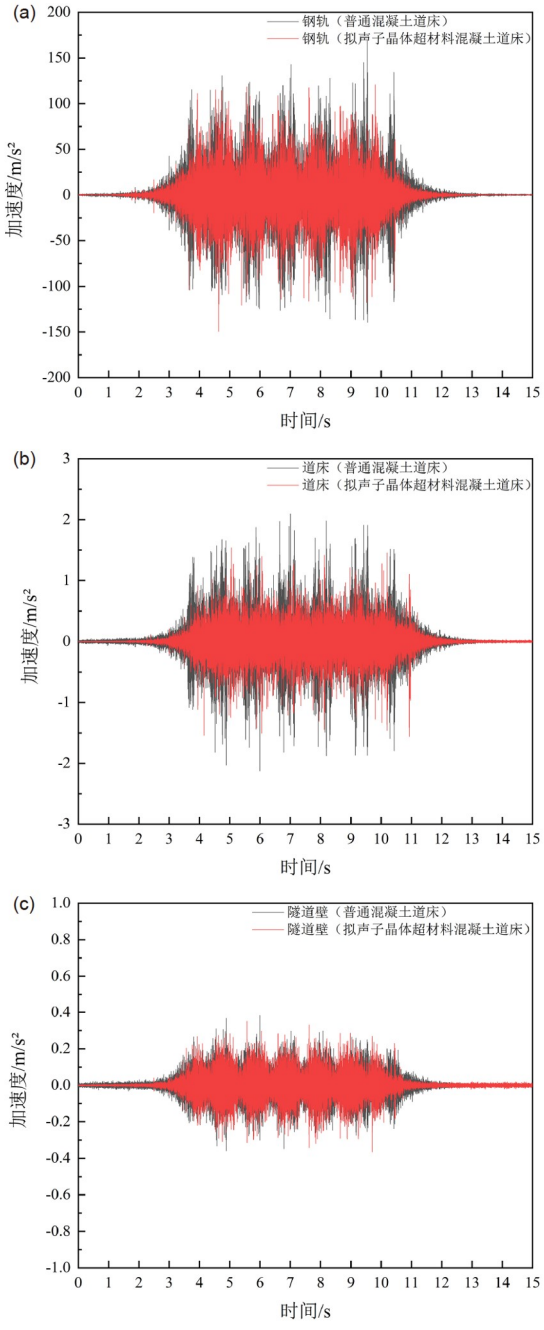


图 23 (网络版彩图)时域曲线. (a) 钢轨; (b) 道床; (c) 隧道壁

Figure 23 (Color online) Time domain curves. (a) Steel rail; (b) track bed; (c) tunnel wall.

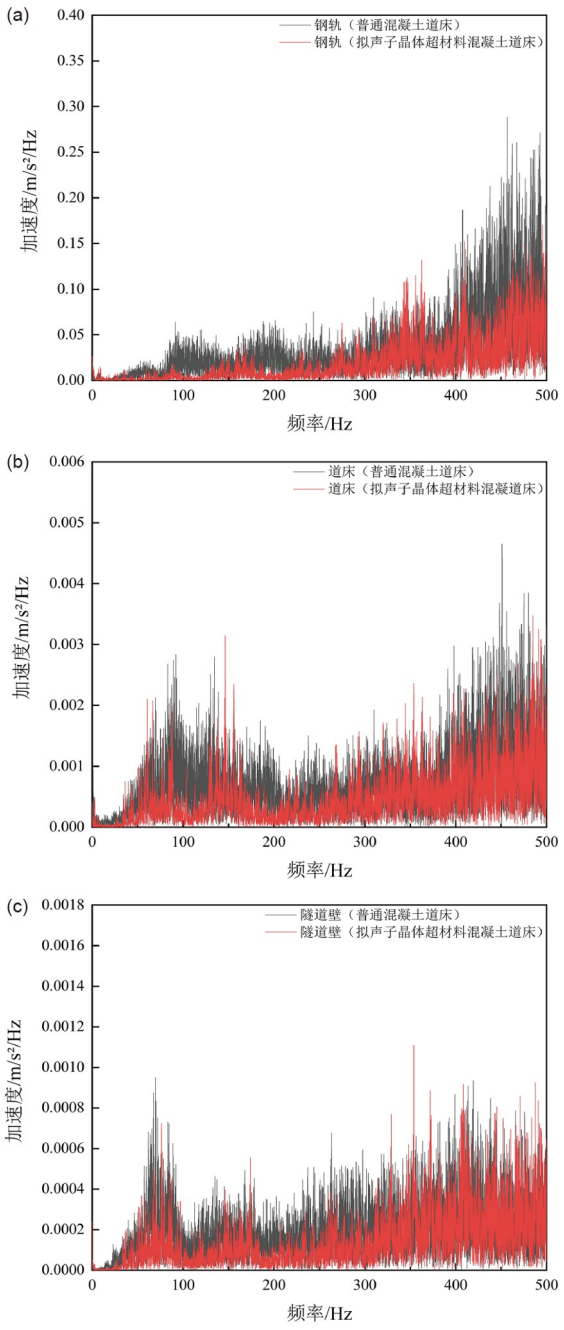


图 24 (网络版彩图)频域曲线. (a) 钢轨; (b) 道床; (c) 隧道壁

Figure 24 (Color online) Frequency domain curves. (a) Steel rail; (b) track bed; (c) tunnel wall.

级为71.534 dB, 拟声子晶体超材料混凝土道床隧道壁铅垂向最大Z振级为66.482 dB, 差值为5.052 dB, 低频减振效果显著.

此外, 计算了普通混凝土道床和拟声子晶体超材料混凝土道床在隧道壁处的铅垂向分频振级(4~200 Hz)及其差值, 如图27和表5所示. 可以看出, 普通混凝土道床隧道壁铅垂向分频振级最大值为59.951 dB, 拟声子晶体超材料混凝土道床隧道壁铅垂

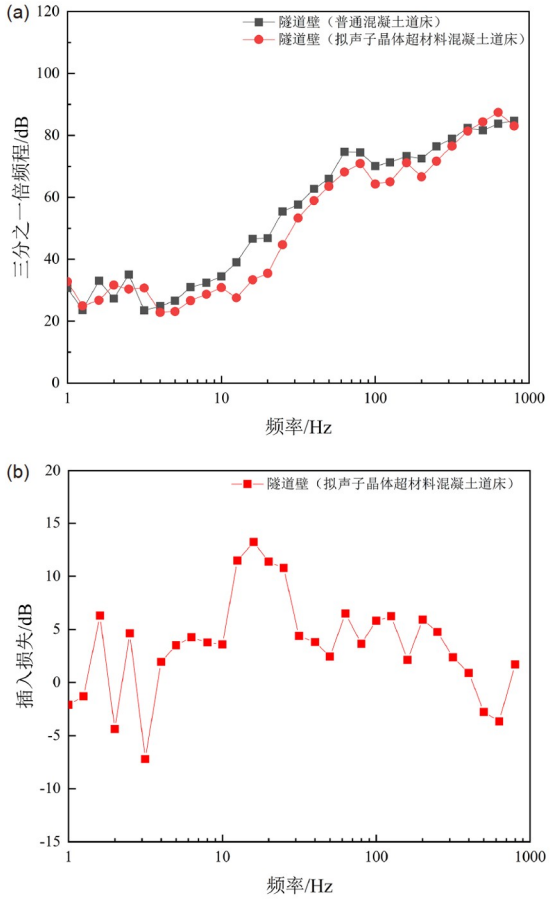


图 25　(网络版彩图)普通混凝土道床和拟声子晶体超材料混凝土道床隧道壁的三分之一倍频程及插入损失. (a) 三分之一倍频程; (b) 插入损失

Figure 25　(Color online) One-third octave and insertion loss of the tunnel wall of ordinary concrete track bed and phononic-like crystal metamaterial concrete track bed. (a) One-third octave; (b) insertion loss.

向分频振级最大值为54.025 dB，差值为5.926 dB; 4~200 Hz频段内铅垂向分频振级差值最大值为13.87 dB，平均值为5.74 dB，在低频具有明显的减振效果.

6　结论

本文基于局域共振理论与高分子混凝土的材料特性和结构特征，提出一种新型三组元水泥基拟声子晶体模型，并据此研发出拟声子晶体超材料混凝土. 用研发出的拟声子晶体超材料混凝土现场浇筑了拟声子晶体超材料混凝土地铁道床，并应用到实际地铁工程

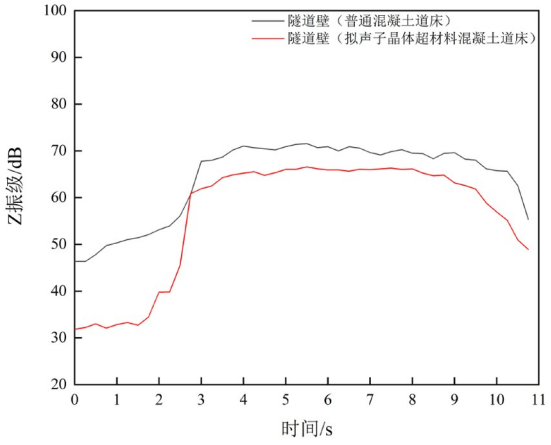


图 26　(网络版彩图)普通混凝土道床和拟声子晶体超材料混凝土道床隧道壁铅垂向Z振级

Figure 26　(Color online) Vertical Z-vibration levels of tunnel wall of ordinary concrete track bed and phononic-like crystal metamaterial concrete track bed.

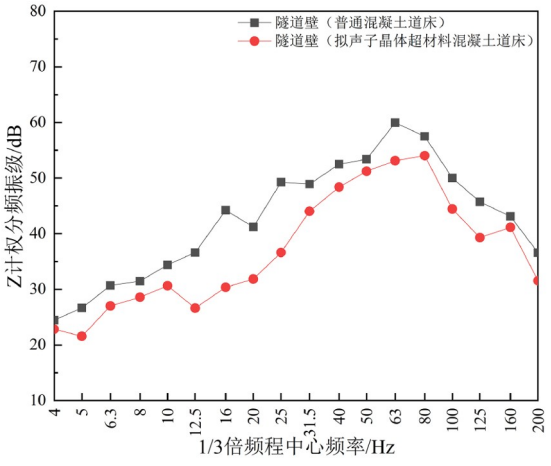


图 27　(网络版彩图)普通混凝土道床和拟声子晶体超材料混凝土道床隧道壁铅垂向分频振级

Figure 27　(Color online) Vertical frequency division vibration levels of tunnel wall of ordinary concrete track bed and phononic-like crystal metamaterial concrete track bed.

中以解决地铁运营过程中产生的低频振动问题. 取得的主要结论如下:

(1) 拟声子晶体超材料混凝土在0~200 Hz频段内打开了6个低频带隙，拟声子晶体超材料混凝土低频带隙的打开，与各原胞的振动特征呈现出对应关系，因特定原胞的平移振动触发，由特定原胞与基体的耦合作用的强度所控制. 在带隙频率范围内，拟声子晶体超材料混凝土的衰减值大多都在10 dB以上，且存在

表 5 普通混凝土道床和拟声子晶体超材料混凝土道床隧道壁铅垂向分频振级及其分频差值

Table 5 Vertical frequency division vibration levels and frequency differences of tunnel wall of ordinary concrete track bed and phononic-like crystal metamaterial concrete track bed

中心频率 (Hz)	4	5	6.3	8	10	12.5
普通混凝土道床 (dB)	24.48	26.65	30.70	31.46	34.39	36.60
拟声子晶体超材料混凝土道床 (dB)	22.83	21.57	27.02	28.59	30.63	26.62
差值△$VL_z(i)$ (dB)	1.65	5.09	3.68	2.87	3.76	9.98
差值百分比 (%)	6.74	19.10	11.99	9.12	10.93	27.27
中心频率 (Hz)	16	20	25	31.5	40	50
普通混凝土道床 (dB)	44.23	41.21	49.26	48.93	52.50	53.39
拟声子晶体超材料混凝土道床 (dB)	30.36	31.85	36.63	44.04	48.39	51.22
差值△$VL_z(i)$ (dB)	13.87	9.36	12.63	4.89	4.10	2.18
差值百分比 (%)	31.36	22.71	25.64	9.99	7.81	4.08
中心频率 (Hz)	63	80	100	125	160	200
普通混凝土道床 (dB)	59.95	57.53	50.01	45.71	43.11	36.59
拟声子晶体超材料混凝土道床 (dB)	53.12	54.02	44.44	39.29	41.16	31.56
差值△$VL_z(i)$ (dB)	6.83	3.50	5.57	6.42	1.96	5.03
差值百分比 (%)	11.39	6.08	11.14	14.05	4.55	13.75

多个共振峰, 衰减效果较好.

(2) 通过优化调节拟声子晶体超材料混凝土的配合比, 制备出了工作性能和强度性能均满足地铁工程要求的C40 强度等级的拟声子晶体超材料混凝土. 此外, 由于篇幅的限制, 不同强度等级的拟声子晶体超材料混凝土的试验方案及结果将在后续论文给出.

(3) 现场监测结果表明拟声子晶体超材料混凝土地铁道床在1~200 Hz频段内具有良好的低频减振效果, 最大插入损失为13.22 dB, 隧道壁铅垂向Z振级差值为5.052 dB, 隧道壁铅垂向分频振级差值为5.926 dB, 4~200 Hz频段内铅垂向分频振级差值最大值为13.87 dB, 平均值为5.74 dB.

参考文献

1 Chen J H, Zeng X H, Xie Y J, et al. Research on band gaps characteristics of multiple resonant cement-based phononic crystals (in Chinese). Mater Report, 2024, 38: 22080126-9 [陈俊豪, 曾晓辉, 谢友均, 等. 多重谐振水泥基声子晶体带隙特性研究, 2024, 38: 22080126-9]

2 Liu Z Y, Zhang X X, Mao Y W, et al. Locally resonant sonic materials. Science, 2000, 289: 1734–1736

3 Jin H X, Chen W S, Hao H, et al. Numerical study on impact resistance of metaconcrete (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2020, 50: 78–89 [靳贺欣, 陈文苏, 郝洪, 等. 超材料混凝土抗冲击效应数值研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 78–89]

4 Xu C, Chen W S, Hao H, et al. Damping properties and dynamic responses of metaconcrete beam structures subjected to transverse loading. Construction Building Mater, 2021, 311: 125273

5 Zhang E, Lu G Y, Yang H W, et al. Band gap features of metaconcrete and shock wave attenuation in it (in Chinese). Explos Shock Waves, 2020, 40: 69–77 [张恩, 路国运, 杨会伟, 等. 超材料混凝土的带隙特征及对冲击波的衰减效应. 爆炸与冲击, 2020, 40: 69–77]

6 Miranda E J P, Angelin A F, Silva F M, et al. Passive vibration control using a metaconcrete thin plate. Cerâmica, 2019, 65: 27–33

7 Liu Y, An X Y, Chen H L, et al. Vibration attenuation of finite-size metaconcrete: Mechanism, prediction and verification. Compos Part A-Appl Sci Manuf, 2021, 143: 106294

8 Xiong J R, Ren F M, Tian S Y, et al. Status and prospects of research on vibration reduction performance of metaconcrete (in Chinese). Acta Mater Composit Sin, 2024, 41: 656–671 [熊剑荣, 任凤鸣, 田时雨, 等. 超材料混凝土减振性能研究现状与展望. 复合材料学报, 2024, 41: 656–671]

9 Mitchell S J, Pandolfi A, Ortiz M. Metaconcrete: Designed aggregates to enhance dynamic performance. J Mech Phys Solids, 2014, 65: 69–81

10 Kettenbeil C, Ravichandran G. Experimental investigation of the dynamic behavior of metaconcrete. Int J Impact Eng, 2018, 111: 199–207

11 Jin H X, Hao H, Hao Y F, et al. Predicting the response of locally resonant concrete structure under blast load. Construction Building Mater, 2020, 252: 118920

12 Chen J H, Zeng X H, Xie Y J, et al. Band gap properties of metaconcrete with vibration reduction function (in Chinese). J Chin Ceram Soc, 2023, 51: 1272–1282 [陈俊豪, 曾晓辉, 谢友均, 等. 具有减振功能的混凝土超材料的带隙特性. 硅酸盐学报, 2023, 51: 1272–1282]

13 Xu C, Chen W S, Hao H, et al. Dynamic compressive properties of metaconcrete material. Constr Build Mater, 2022, 351: 128974

14 Chen M, Meng D, Zhang H, et al. Resonance-coupling effect on broad band gap formation in locally resonant sonic metamaterials. Wave Motion, 2016, 63: 111–119

15 Yuan B, Humphrey V F, Wen J H, et al. On the coupling of resonance and Bragg scattering effects in three-dimensional locally resonant sonic materials. Ultrasonics, 2013, 53: 1332–1343

16 Miao L C, Li C, Lei L J, et al. Vibration attenuation and application of composition materials of periodic structures (in Chinese). Chin J Geotech Eng, 2020, 42: 1139–1144 [缪林昌, 厉超, 雷利剑, 等. 周期性结构复合材料减振性状与工程应用前景. 岩土工程学报, 2020, 42: 1139–1144]

17 Miao L C, Li C, Lei L J, et al. A new periodic structure composite material with quasi-phononic crystals. Phys Lett A, 2020, 384: 126594

18 You Q. Study on the material performance and vibration attenuation characteristics of lightweight concrete (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Nanjing: Southeast University, 2019 [尤佺. 轻质混凝土材料性能及减振特性研究. 硕士学位论文. 南京: 东南大学, 2019]

19 Wen X S. Theory and Technology of Photonic/Phononic Crystals (in Chinese). Beijing: Science Press, 2006 [温熙森. 光子/声子晶体理论与技术. 北京: 科学出版社, 2006]

20 Goffaux C, Sánchez-Dehesa J, Yeyati A L, et al. Evidence of Fano-like interference phenomena in locally resonant materials. Phys Rev Lett, 2002, 88: 225502

21 Goffaux C, Sánchez-Dehesa J, Lambin P. Comparison of the sound attenuation efficiency of locally resonant materials and elastic band-gap structures. Phys Rev B, 2004, 70: 3352–3359

Low frequency bandgap characteristics and engineering application of phononic-like crystal metamaterial concrete

XIAO Peng, MIAO LinChang, ZHENG HaiZhong & LEI LiJian

Institute of Geotechnical Enginering, School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China

Metamaterial concrete is a new type of composite material with elastic wave bandgap characteristics, but its high bandgap frequency and narrow bandgap width limit its application in engineering mainly focused on low-frequency vibration control. Firstly, based on the theory of local resonance, this paper proposes a novel three-component cement-based phononic-like crystal model, and develops a phononic-like crystal metamaterial concrete based on this model. Secondly, the band structure, bandgap mechanism, and frequency response function of phononic-like crystal metamaterial concrete are calculated and analyzed, and indoor tests of phononic-like crystal metamaterial concrete are conducted. Finally, a phononic-like crystal metamaterial concrete subway track bed is prepared using the developed phononic-like crystal metamaterial concrete, and applied to practical subway engineering to solve the low-frequency vibration problem generated during subway operation. The results show that the phononic-like crystal metamaterial concrete opens 6 low-frequency bandgaps in the 200 Hz frequency band, and within the bandgap frequency range, the attenuation values are mostly above 10 dB, indicating a good attenuation effect. The phononic-like crystal metamaterial concrete subway track bed has a significant low-frequency vibration reduction effect in the 200 Hz frequency band. The maximum value of one-third octave insertion loss of the tunnel wall is 13.22 dB, the maximum vertical Z-vibration level difference of the tunnel wall is 5.052 dB, the maximum vertical frequency division vibration level difference of the tunnel wall is 5.926 dB, and the average vertical frequency division vibration level difference of the 4–200 Hz frequency band is 5.74 dB. The low-frequency vibration reduction effect is obvious. The relevant research results of this paper provide a new technical approach to solving the problem of low-frequency vibration in subway engineering and other engineering construction, breaking through the traditional vibration reduction control technology of civil engineering structures.

phononic-like crystal model, phononic-like crystal metamaterial concrete, locally resonant theory, low frequency bandgap, subway track bed, vibration reduction performance

doi: 10.1360/SST-2023-0335