

超材料混凝土减振性能研究现状与展望

熊剑荣 任凤鸣 田时雨 黎永盛

Status and prospects of research on vibration reduction performance of metaconcrete

XIONG Jianrong, REN Fengming, TIAN Shiyu, LI Yongsheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231007.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

纤维角度对变角度层合板减振性能的影响

Influences of fiber angle on the vibration damping performance of variable angle laminates

复合材料学报. 2021, 38(11): 3693–3703 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210301.001>

吸波超材料研究进展

Research progress in metamaterial absorber

复合材料学报. 2021, 38(1): 25–35 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200921.004>

简支边界条件下超椭圆蜂窝夹芯板的自由振动

Free vibration analysis of simply supported super elliptical honeycomb panels

复合材料学报. 2017, 34(8): 1817–1824 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20161130.001>

基于CT图像的再生混凝土细观破坏裂纹分形特征

Fractal characteristics of meso-failure crack in recycled coarse aggregate concrete based on CT image

复合材料学报. 2020, 37(7): 1774–1784 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190917.002>

再生骨料掺配比再生透水混凝土性能的影响

Influence of recycled aggregate proportion on performance of recycled pervious concrete

复合材料学报. 2018, 35(6): 1590–1598 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180207.003>

混杂纤维增强再生砖骨料混凝土增强机制与抗压性能计算方法

Reinforcing mechanism and calculation method of compressive behavior of hybrid fiber reinforced recycled brick aggregates concrete

复合材料学报. 2018, 35(12): 3441–3449 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180516.003>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

超材料混凝土减振性能研究现状与展望

熊剑荣, 任凤鸣*, 田时雨, 黎永盛

(广州大学 土木工程学院, 广州 510006)



分享本文

摘要: 超材料混凝土作为一种具有振动衰减效应的新型材料, 由包裹弹性软涂层的金属重芯取代天然粗骨料, 与砂浆搅拌而形成。当受动力作用时, 超材料混凝土能够利用人工骨料局部共振产生的带隙, 衰减混凝土的振动响应。近年来, 超材料混凝土因其在高频动力作用下显著的减振性能, 在结构抗爆抗冲击领域受到了高度关注, 通过改变人工骨料的结构, 已经研发出多种形式的超材料混凝土, 并针对其振动衰减性能开展了系统的理论分析、数值模拟和试验研究。为推动超材料混凝土在土木工程领域的研究和应用, 该研究对超材料混凝土减振性能的研究工作进行了系统地归纳总结, 探讨了超材料混凝土在工程性能方面存在的问题和瓶颈, 并对超材料混凝土减振性能的研究方向和应用前景进行了展望。

关键词: 超材料混凝土; 人工骨料; 局部共振; 带隙特征; 振动衰减

中图分类号: T333; TU528.41

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2024)02-0656-16

Status and prospects of research on vibration reduction performance of metaconcrete

XIONG Jianrong, REN Fengming*, TIAN Shiyu, LI Yongsheng

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Metaconcrete, a new type of material with vibration attenuation characteristics, is formed by replacing natural coarse aggregates with a heavy metal core wrapped with an elastic soft coating and mixed with mortar. When subjected to dynamic loads, metaconcrete could attenuate the vibration response of concrete using the bandgap generated by the local resonance of artificial aggregates. Recently, metaconcrete has received great attention in the field of blast and impact resistance due to its remarkable vibration reduction performance under high-frequency dynamic action vibration, and various forms of metaconcrete have been developed by changing the structure and arrangement of aggregates. Systematic theoretical derivation, numerical analysis and experimental studies have been carried out for the vibration attenuation performance of metaconcrete. In order to accelerate the research and application of metaconcrete in the civil engineering, the research work on its vibration reduction performance was systematically summarized, the problems and bottlenecks in the engineering performance were discussed, and the future vibration attenuation research and application prospects of metaconcrete were prospected in this paper.

Keywords: metaconcrete; artificial aggregates; local resonance; bandgap feature; vibration attenuation

建筑结构在服役过程中, 很有可能会遭受环境振动、地震作用, 甚至爆炸冲击等极端情况的威胁, 导致结构损伤甚至失效倒塌。为提高建筑结构对振动的抵御能力, 对于低频的地震作用, 通过提高结构的刚度和强度、或采用减隔震技术

等措施能够改善结构的抗震性能。而面对高频的爆炸冲击, 应对措施却相对有限, 往往是利用结构和构件的刚度“硬抗”, 以结构或构件的损伤为代价来衰减在结构和构件中传播的应力波, 但往往会对结构造成较大破坏^[1]。例如, 在天津港

收稿日期: 2023-07-21; 修回日期: 2023-08-30; 录用日期: 2023-09-22; 网络首发时间: 2023-10-08 14:19:16

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231007.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (52338005; 52178125)

National Natural Science Foundation of China (52338005; 52178125)

通信作者: 任凤鸣, 博士, 教授, 研究方向为组合结构、高性能混凝土及超材料结构 E-mail: rjm@gzhu.edu.cn

引用格式: 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 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 656-671.

XIONG Jianrong, REN Fengming, TIAN Shiyu, et al. Status and prospects of research on vibration reduction performance of metaconcrete[J].

Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(2): 656-671(in Chinese).

爆炸事件中,距离爆炸中心 150 m 内的建筑全被摧毁,两公里内的建筑结构均出现结构裂缝,甚至 2020 年发生在黎巴嫩的 Beirut 爆炸,破坏了当地机场的航站楼。因此,寻求能够保护建筑结构、抵御爆炸冲击的新方法至关重要。

近年来,超材料作为一种利用自身产生的带隙(能够对波的运动产生衰减或阻隔的频率范围)控制振动的人工复合结构材料^[2-4],在电磁学、声学等领域得到了广泛应用^[5-8]。同时,超材料的提出也为建筑结构免受冲击和振动的威胁提供了新的思路。超材料混凝土(Metaconcrete)正是运用这一思路研发出的一种新型混凝土材料^[9],其由包裹软涂层的金属重芯制成的人工骨料替代天然骨料并与砂浆搅拌制成。超材料混凝土的微观材料结构与光子晶体^[9-11]和声子晶体^[7-8]相似,均是人为设计而成,因此也具有阻断或抑制波振动的带隙特性^[12-13]。在动力作用下,超材料混凝土中人工骨料形成的质量谐振器会发生共振效应,在其自振频率附近形成共振带隙,有效衰减混凝土中的应力波传播,表现出不同于普通混凝土的消波减振性能。由于人工骨料的几何尺寸和材料物理属性的不同,超材料混凝土具有的带隙范围通常在几百到几千,甚至上万赫兹,因此超材料混凝土在结构抗爆抗冲击领域具有广阔的应用前景,尤其在军事防御建筑、核电站和海洋平台等工程的冲击防护建设当中^[14]。但目前超材料混凝土在构件和结构层面开展的研究很有限,多是基于对小尺寸超材料混凝土梁构件进行的试验研究,距离将超材料混凝土应用到实际工程当中,还需要开展更深入的研究工作。

为厘清目前超材料混凝土的研究现状和存在问题,本文对过去十年超材料混凝土减振性能的研究内容和成果进行梳理,结合超材料的工作机制对比分析了现有超材料混凝土理论分析模型的优缺点,并基于骨料形状和减振带隙对超材料混凝土进行了分类,汇总了目前超材料混凝土的试验方法,最后对土木工程领域中超材料混凝土研究存在的问题和瓶颈进行了探讨,为后续研究和工程应用提供参考。

1 超材料混凝土的工作机制

1.1 衰减机制

1987 年, Yablonovitch 等^[10]和 John 等^[11]发现了能够对光传播路径进行控制的结构形式,推动

了声子晶体的发展,在此基础上,学者们陆续研制出负折射超材料^[15-16]、空间超透镜^[17-18]、隐身斗篷^[19-22]等许多超材料元器件,使得超材料在控制电磁波的光子晶体和衰减声波的声子晶体领域得到了长足的发展。周期性排列的人工弹性介质构造,使得光子晶体与声子晶体内部产生布拉格带隙(Bragg-type bandgaps)^[23-24],即如图 1(a)所示,当入射波的波长与周期性晶格常数 a 在同一数量级时,组成晶体的不同介质之间能够对入射波进行反射,表现出具有滤波作用的带隙特性,阻止电磁波、声波或弹性波在介质中的传播。但在土木工程中很难形成与输入波波长同等数量级的周期性空间尺寸,因此想要利用布拉格带隙衰减建筑结构受到的振动是很困难的。

为了克服尺寸的限制, Liu 等^[25]设计了一种具有局部共振特性的声学超材料,基本结构单元由外部包裹硅橡胶的铅球嵌入环氧基体中形成。当材料受到接近自振频率的声波激励时,内部铅球会发生强烈的共振现象,从而阻止声音穿过。不同于布拉格散射机制形成的带隙,局部共振机制(Local resonance mechanism)形成的带隙取决于胞元内部的相对运动,如图 1(b)所示,因此局部共振超材料可以在有限尺寸的工程结构内形成共振带隙,对波长与单胞尺寸不在同一个数量级的输入波进行衰减。2003 年, Sheng 等^[26]通过试验成功证实了局部共振超材料对声波的衰减效应。在此基础上,世界各地的学者们相继研发了超材料梁^[27-31]、超材料杆^[32-34]、超材料板^[35-38]等各类局部共振超材料构件,用于衰减和抑制结构对弹性波、声波、冲击应力波等输入的响应。

2014 年, Mitchell 等^[9]进一步将局部共振机制引入土木工程材料,用涂有软涂层(通常采用弹性模量较低的橡胶、尼龙、硅橡胶等材料)的金属重芯球(通常采用钢、铅等质量密度较高的材料)取代普通粗骨料,与水泥、砂和水共同形成超材料混凝土,组成其的基本单元通常称为单胞或胞元,结构及等效结构如图 2 所示。超材料混凝土的单胞结构可以等效为如图 2(c)所示的质量-弹簧-质量系统,当受到接近人工骨料自振频率的激励时,软涂层包裹下的金属重芯发生局部振动,砂浆与金属重芯的运动存在相位差,在一定频率范围内产生带隙,从而对带隙内频率的动力输入进行衰减。

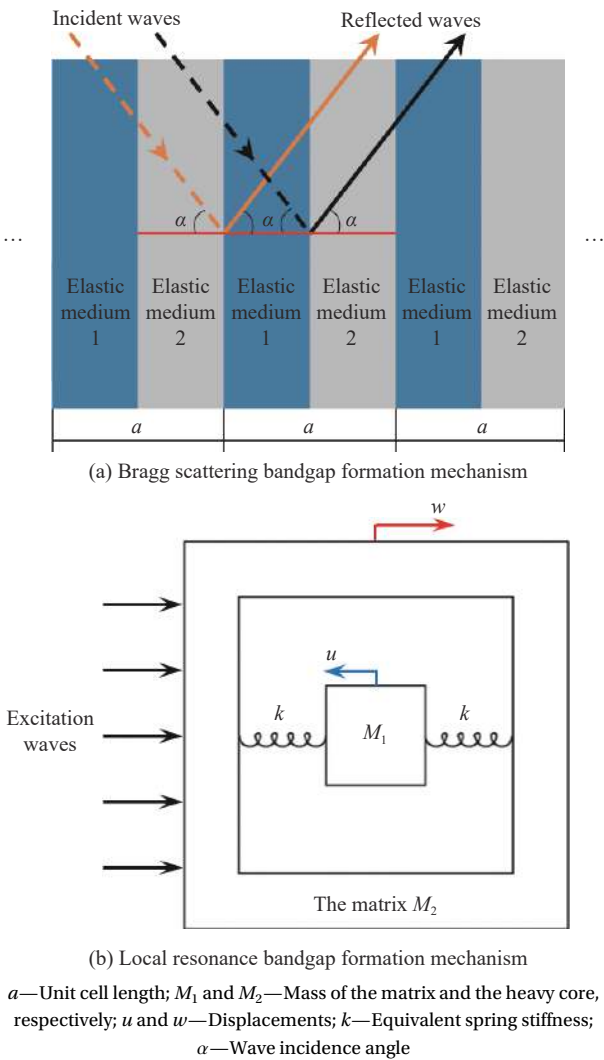


图 1 超材料带隙形成机制
Fig. 1 Mechanism of metamaterial bandgap formation

1.2 理论分析模型

超材料混凝土的减振性能与其产生的带隙频

率范围直接相关，因此针对如何设计超材料混凝土的带隙范围，评估其对振动输入的衰减效应，学者们开展了大量的研究工作，提出了不同的理论分析模型。

Milton 等^[39] 利用牛顿第二定律推导出了在连续框架内部均匀周期布置弹簧质量谐振器的一维振动模型。在其基础上，Mitchell 等^[9] 和 Huang 等^[40-41] 分别提出了能够分析均匀分布人工骨料的超材料混凝土带隙的有效质量预测模型，如图 3(a) 和图 3(b) 所示，超材料混凝土中均匀排布的人工骨料被看作是弹簧质量谐振器，软涂层是具有刚度为 k_2 的弹簧，金属重芯作为质量块 m_2 。Mitchell 等^[9] 将砂浆看作质量为 m_1 的刚体，而 Huang 等^[40-41] 将超材料混凝土均匀划分为 n 个相同的单胞，每个单胞结构内的砂浆看作为质量为 m_1 的质量块，且相邻单胞砂浆的连接等效为刚度 k_1 的弹簧连接。Mitchell 等^[9] 和 Huang 等^[40-41] 所提出的超材料混凝土单胞有效质量 m_{eff} 的表达式分别为

$$m_{\text{eff}} = m_1 + \frac{nm_2}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \tag{1a}$$

$$m_{\text{eff}} = m_{\text{st}} + \frac{m_2(\omega/\omega_0)^2}{1 - (\omega/\omega_0)^2} \tag{1b}$$

式中： $m_{\text{st}}=m_1+m_2$ 表示系统中基体（超材料混凝土中的基体为砂浆）和金属重芯的质量之和； $\omega_0 = \sqrt{k_2/m_2}$ 表示局部谐振器的自振频率； ω 表示外部激励频率。有效质量 m_{eff} 随着激励频率 ω 的变化而变化，如图 4 所示，当有效质量为负时（可见图中的阴影部分），在外力作用下金属重芯做负功，从而形成能够阻隔波传播的带隙。相比之下，

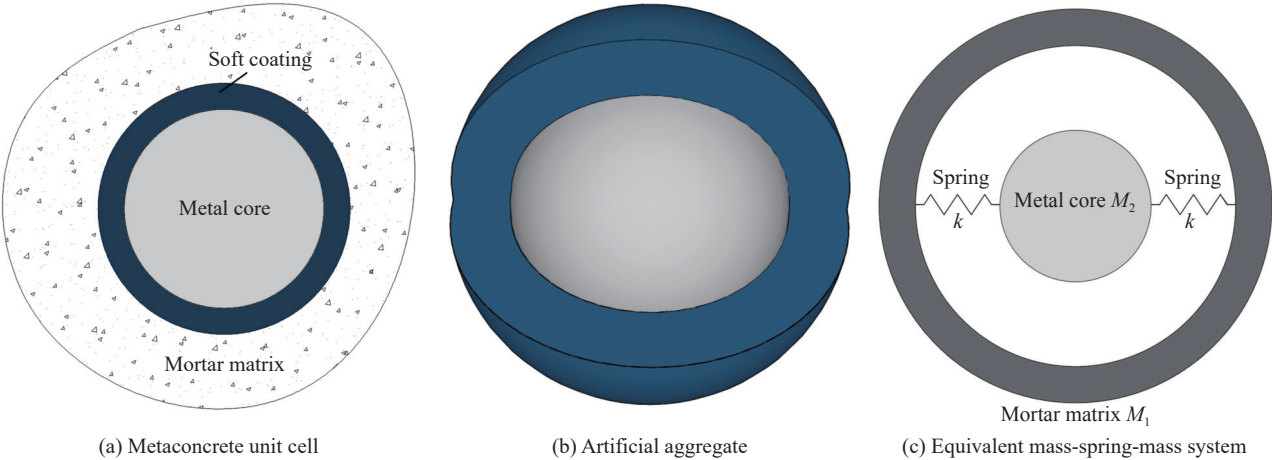


图 2 超材料混凝土单胞示意图
Fig. 2 Schematic diagram of metaconcrete unit cell

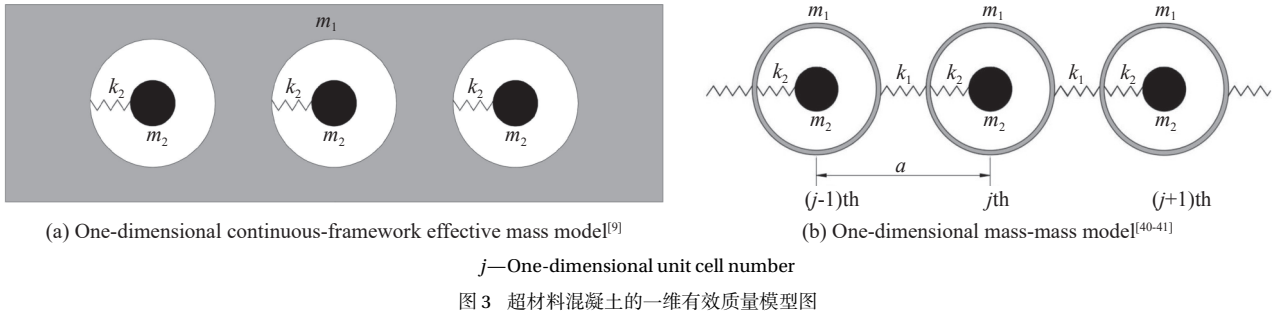
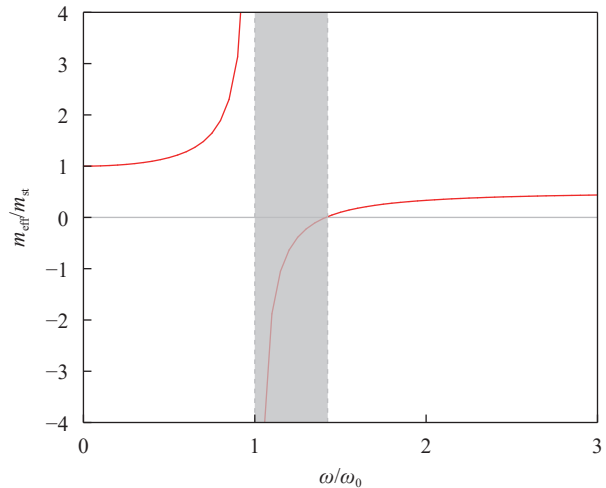


Fig. 3 Diagram of the one-dimensional effective mass model for metaconcrete

Mitchell 等^[9]与 Huang 等^[40-41]提出的模型均可对超材料混凝土的负有效质量做出有效预测，但 Mitchell 等^[9]对基体质量的考虑更加切合实际，而 Huang 等^[40-41]的模型更适用于对人工骨料无限多或足够多的超材料混凝土进行预测。



$m_{\text{eff}}/m_{\text{st}}$ —Ratio of effective mass m_{eff} to the actual total mass m_{st} ;
 ω/ω_0 —Ratio of excitation frequency ω to nature frequency ω_0

图4 超材料混凝土的有效质量与频率函数图

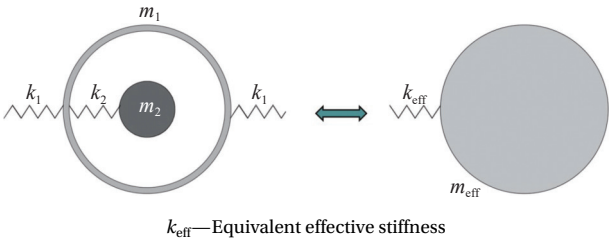
Fig. 4 Effective mass-frequency relationships of metaconcrete

此外，学者 Vo 等^[42]和 Liu 等^[43]利用 mass-mass 模型对超材料混凝土带隙进行分析时发现，当人工骨料发生局部振动时，砂浆和软涂层提供的等效弹簧刚度随激励频率的变化会形成负刚度，从而产生新的带隙范围。Vo 等^[44]基于一维 mass-mass 模型，加入砂浆和软涂层的刚度影响，重新对超材料混凝土的简化模型进行推导，建立了包含有效质量和有效刚度的超材料混凝土带隙预测模型，如图 5 所示，有效质量和有效刚度的表达式分别为

$$m_{\text{eff}} = m_1 + \frac{m_2 \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \tag{2a}$$

$$k_{\text{eff}} = k_1 + \frac{1}{4}k_2 - \frac{1}{4} \left(m_1 \omega^2 + \frac{k_2 \omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \right) \tag{2b}$$

其中：自振频率 $\omega_0 = \sqrt{k_2/m_2}$ 。相比文献 [9, 40] 提出的有效质量模型 (式 (1))，内部骨料的自振频率 ω_0 决定了超材料混凝土的局部共振带隙，且 Vo 等^[44]所提出的理论分析模型对有效质量的预测与文献 [40] 一致，但因考虑了软涂层有效动态刚度的贡献，Vo 等^[44]的理论分析模型还能够准确预测超材料混凝土由于负刚度产生的带隙范围。



k_{eff} —Equivalent effective stiffness

图5 超材料混凝土的有效质量和有效刚度的等效模型图

Fig. 5 Equivalent model diagram for effective mass and effective stiffness of metaconcrete

超材料混凝土中人工骨料内部金属重芯在振动过程中会受到各向约束，因此，将砂浆和软涂层的约束等效为一维刚度与实际情况并不完全相符。为此，在 Mitchell 等^[9]所提出的一维模型基础上，韩洁等^[14]通过考虑砂浆基体和软涂层的三维约束，建立了超材料混凝土单胞骨料的三维无阻尼振动模型，如图 6(a) 所示。当受到外部激励时，质量为 m 的金属重芯在砂浆和软涂层等效弹簧刚度 k 的约束下，整个系统的振动方程可以表达为

$$m\ddot{y} + 2ky + 4k\Delta l \sin \theta = 0 \tag{3}$$

其中： l 为砂浆和软涂层等效的弹簧长度； θ 为横向等效弹簧的角变形，重芯的轴向位移 $y=l\theta$ ，横向等效弹簧的变形 $\Delta l=y\theta$ ； $\ddot{y}$ 为金属重芯的加速度。紧接着引入材料阻尼系数 c ，又发展出了三维有阻尼的振动模型^[45]，如图 5(b) 所示，振动方程如下：

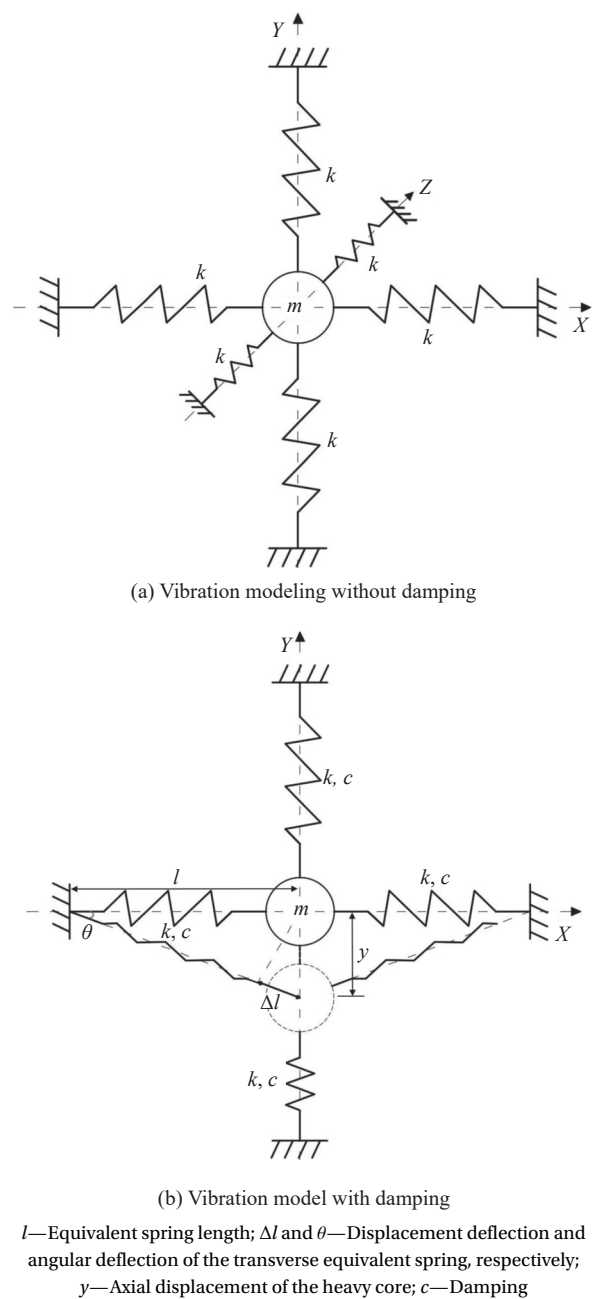


图6 超材料混凝土三维振动模型示意图^[14, 45]

Fig. 6 Three-dimensional vibration model of metaconcrete^[14, 45]

$$m\ddot{y} + 2ky + 4k\Delta l \sin \theta + 6c\dot{y} = 0 \tag{4}$$

式中： $\dot{y}$ 为金属重芯的运动速度。韩洁等^[14]所提出的振动模型考虑了砂浆和软涂层对金属重芯的三维约束效应，并引入材料阻尼系数，相比文献^[9, 40]的一维线弹性振动模型，能够更准确地预测人工骨料内重芯的振动状态，对内部人工骨料的自振频率做出更精确预测。以文献^[46]中厚1.6 mm的 Polyurethane 软涂层、半径 6.3 mm 的铅球重芯的超材料混凝土为例，根据三维无阻尼、有阻尼振动模型及一维 mass-mass 模型计算得到

的超材料混凝土单胞骨料固有频率分别为 10.940、10.033、10.060 kHz，用 COMSOL Multiphysics 有限元软件计算得到的骨料共振频率或带隙下限为 10.585 Hz，而试验测得的骨料共振频率为 10.600 kHz。可以发现现有理论模型和数值分析模型对内部骨料自振频率的预测值与试验结果均较准确，其中数值分析与试验结果更接近，而三维无阻尼振动模型对骨料固有频率的预测是理论模型中最精确的，误差仅为 3.2%。

目前针对超材料混凝土产生的带隙，学者们提出的一维有效质量和有效刚度模型及考虑三维约束的骨料振动分析模型，能够对局部共振带隙和内部骨料的共振频率做出较准确的预测。但大多是基于周期排布单一球体骨料的线弹性理论分析模型，无法预测由周期排布骨料引起的布拉格散射带隙，因此需引入布拉格带隙计算方法以完善理论。同时，现有研究缺乏关于骨料形状和尺寸、材料非线性及黏弹性对带隙影响，因此在今后的研究中应当予以考虑，从而建立起更完备的超材料混凝土等效计算模型。

2 研究现状

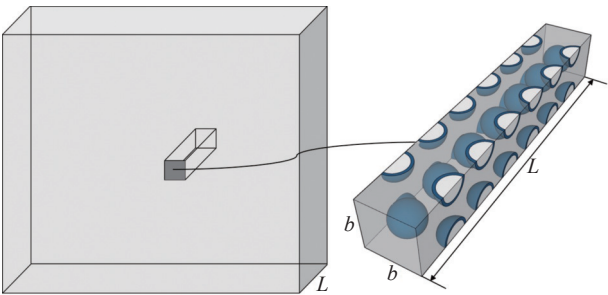
基于局部共振超材料已有的工作机制，开发更多种类的超材料混凝土，对其振动衰减性能进行系统的研究，从而应用到工程实践中是十分有意义的。为实现不同频率范围的振动衰减，学者们通过改变骨料的几何形状、结构形式与材料属性，设计出了不同类型的超材料混凝土，并采用不同的实验手段对各类试件的减振性能和基本力学性能进行了研究。

2.1 不同骨料形状的超材料混凝土

2.1.1 球体人工骨料的超材料混凝土

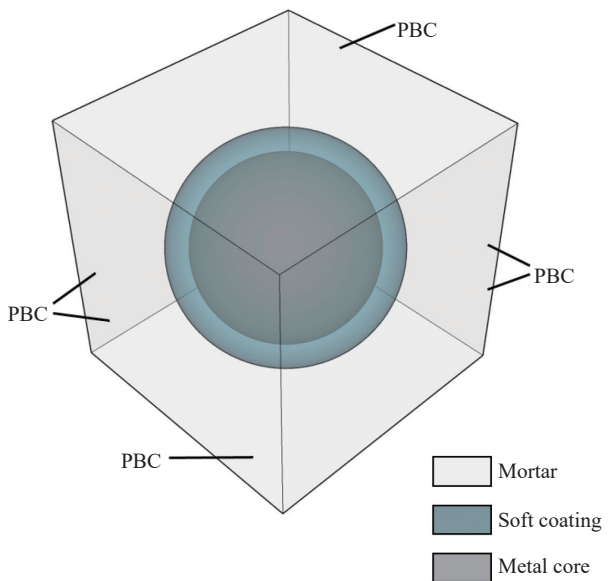
由于球体骨料设计和制备相对简单，且具有更强的几何对称性，球体成为人工骨料最普遍采用的几何形式。Mitchell 等^[9]首次提出了具有球体人工骨料的超材料混凝土，在弹性假设下对周期性排列球体人工骨料的超材料混凝土板(图 7)和普通混凝土板通过数值模拟进行了对比分析，结果表明，与普通混凝土板相比，超材料混凝土板吸收了更多的爆炸能量，并降低了板内的应力分布幅值。

为了研究球体人工骨料的材料属性、尺寸等对带隙及减振性能的影响。Jin 等^[47]基于周期性 mass-mass 系统，在线弹性条件下，推导了均匀



L —Thickness of the plate; b —Width of the selected section
图7 有序排列的超材料混凝土板模型^[9]

分布球体人工骨料的超材料混凝土杆在轴向冲击荷载下的动态响应模型，通过数值分析验证了理论模型的正确性并发现重芯密度更大时，超材料混凝土能够减少更多应力波的传递。Mitchell等^[48]通过数值模拟研究了软涂层材料和球体骨料的尺寸对超材料混凝土板的振动传输系数的影响，结果表明涂层属性和骨料尺寸会显著影响超材料混凝土结构的减振范围，同时随着人工骨料数目的增多，减振性能会随之提升。Ma等^[32]率先通过振动试验验证了COMSOL Multiphysics数值软件计算周期性局部共振超材料杆振动带隙的正确性，进而Oyelade等^[49]和Xu等^[50]分别将COMSOL Multiphysics数值分析软件引入到对超材料混凝土单胞带隙的预测中。其中Xu等^[50]详细地展示了数值模型的边界条件布置，需要在单胞各侧面设置如图8所示的周期性边界条件(Periodic



PBC—Periodic boundary condition
图8 超材料混凝土单胞的边界条件

boundary conditions, PBC), 并系统地研究了球体人工骨料的材料属性、结构尺寸对其带隙的影响。参数分析结果表明，增大软涂层的厚度、重芯的尺寸和密度会使超材料混凝土产生的共振带隙向低频移动，同时增大重芯尺寸或密度也会使带隙范围扩大，这进一步印证了Jin等^[47]的研究结论，佐证了mass-mass分析模型的正确性。而增大软涂层的泊松比、弹性模量及人工骨料占单胞的体积分数时，共振带隙则会往高频移动，且带隙范围增大，影响规律如图9所示，这为超材料混凝土的设计与应用提供了依据。

为探讨球体人工骨料排布方式对减振性能的影响，Jin等^[51]对具有随机分布球体人工骨料的超材料混凝土杆进行了动态冲击模拟，结果表明用人工骨料对天然骨料进行无序取代时，超材料混凝土杆同样可以衰减冲击振动，削减杆内应力幅值。随后Briccola等^[52]首次制备了具有随机分布球体骨料的超材料混凝土圆柱体试件，并验证了超材料混凝土的减振特性，直径10.16 cm、高20.32 cm的圆柱体内分别含有人工骨料数目为60和40的超材料混凝土试件均能实现振动衰减，并通过试验研究发现带有更多人工骨料数目(60个)的试件表现出更强的振动衰减性能。在后续的研究中，Briccola等^[53]又对骨料有序排布的超材料混凝土立方体块进行了相同的试验研究，试验结果展现出了与具有随机分布球体骨料的超材料混凝土一致的衰减规律，表明超材料混凝土在人工骨料有序排布和无序排布状态下均能实现对振动的衰减。Xu等^[31]分别对带有周期布置和无序排布球体人工骨料的超材料混凝土梁进行横向冲击加载，通过对比分析试件支承处和加载处的振动幅值，同样证明了骨料排布方式对超材料混凝土梁的振动衰减效应影响不明显，其减振性能主要取决于人工骨料产生的局部共振。实际上，Xu等^[31]、Jin等^[51]和Briccola等^[52-53]的研究仅针对超材料混凝土的局部共振带隙展开了探讨，忽略了由周期性排布产生的更高频率范围的布拉格散射带隙，本质上布拉格散射带隙的存在会增强超材料混凝土的减振性能，也值得深入研究。

目前对超材料混凝土的分析大都采用弹性假定，但混凝土是一种非线性材料，在动力荷载作用下，其断裂特性和材料非线性是不可忽视的。Mitchell等^[54]引入了纵向最大应力的断裂准则，

Fig. 8 Boundary condition setting for metaconcrete unit cell

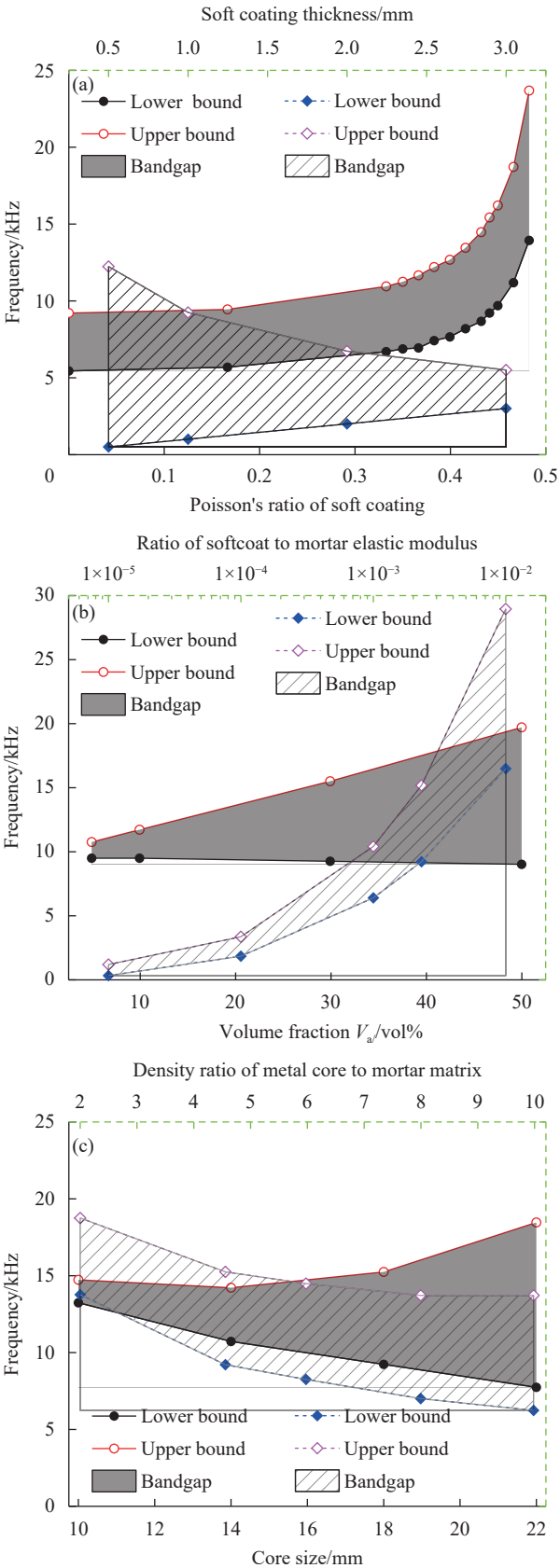


图9 几何参数、材料属性对超材料混凝土带隙的影响^[50]

Fig. 9 Effect of geometric parameters and material properties on bandgap in metaconcrete^[50]

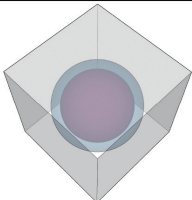
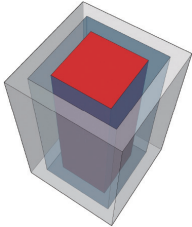
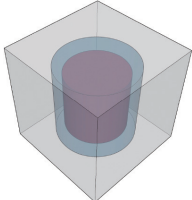
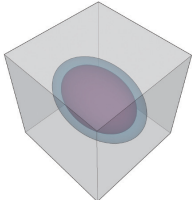
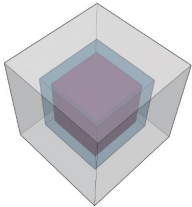
对超材料混凝土板在冲击载荷作用下的动态响应和应力分布进行了数值模拟，并分析了球体人工骨料的设计参数对超材料混凝土板响应的影响。结果表明：相比普通混凝土板，超材料混凝土板内的人工骨料能够吸收板内传播的能量，从而减小砂浆内的纵向应力并防止断裂破坏区域的延伸，由于采用的爆炸冲击波频率范围在 1 kHz~1 MHz，随着软涂层弹性模量的增加，板中分布的应力也相应降低。Jin 等^[47]通过引入砂浆基体的应变率效应和材料损伤来考虑超材料混凝土的非线性，研究了爆炸荷载下含有球体人工骨料的超材料混凝土杆中应力波的传播和材料的破坏模式，结果表明：超材料混凝土杆内重芯的局部振动会导致在与软涂层接触界面处出现应力集中现象，这可能导致局部损伤，但同时吸收大量板内传播的能量，从而降低混凝土内的应力幅值。相比线弹性状态的超材料混凝土在动力荷载作用下的受力分析，考虑了材料的非线性以后，能够更具体地对超材料混凝土构件各部分受力及破坏模式进行描述说明。目前超材料混凝土考虑材料非线性的研究仍较少，尤其是缺少对超材料混凝土构件在动力荷载作用下的动态变形及能量传递的细致分析，有待进一步深入研究。

2.1.2 其他形状骨料的超材料混凝土

探索骨料形状的影响也是实现超材料混凝土工程应用的必要途径。除球体人工骨料的超材料混凝土外，学者们还提出了其他不同形状骨料的超材料混凝土，如表 1 所示。郜英杰等^[36]对比分析了具有圆柱体人工骨料的超材料混凝土板和普通混凝土板在平面内受特定频率冲击波作用下的振动响应，通过比较板内前、中、后三点的应力时程曲线，验证了具有圆柱体人工骨料的超材料混凝土板与普通混凝土板相比具有更好的抗冲击效果。Oyelade 等^[49]也通过数值模拟证明了拥有圆柱体骨料的二维平面超材料混凝土板对特定频率下平面内弹性波的衰减性能。张恩等^[55]提出具有长方体骨料的超材料混凝土，利用超材料混凝土的有效质量模型，分析了软涂层的弹模、基体和重芯密度、重芯尺寸及骨料体积占比等对其单向带隙的影响规律，并通过冲击模拟证明了长方体骨料超材料混凝土板对振动的衰减效应。

上述研究证明了具有圆柱体骨料和长方体骨料的超材料混凝土板对二维平面内振动的衰减效

表 1 不同骨料形状的超材料混凝土
Table 1 Metaconcrete with different aggregate shape

Aggregate shape	Aggregate schematic	Bandgap characteristic	Ref.
Sphere		Isotropic fundamental stability bandgap	[9, 50]
Cuboid		With the same planar bidirectional bandgap	[35, 55]
Cylinder		Longitudinal bandgap with lower frequency and transverse bandgap with higher frequency	[35-36, 50]
Ellipsoid		Longitudinal bandgap with lower frequency and transverse bandgap with higher frequency	[50, 56]
Cubic		Capable of generating bandgaps in a wider and higher frequency range in each direction than spherical artificial aggregates	[50]

果，但并没有分析人工骨料形状对超材料混凝土单胞在不同振动方向带隙产生的影响。实际上，人工骨料形状的不同会影响砂浆和软涂层对重芯的约束，从而影响超材料混凝土在不同方向的带隙范围。为探讨人工骨料形状对超材料混凝土减振性能和带隙的影响，Miranda 等^[35]率先对具有方形和圆形骨料的超材料混凝土二维平面板的单胞结构，结合改进的平面波展开法(常用于分析声子晶体能带结构^[37])和 Kirchhoff-Love 薄板理论进行了带隙分析，这也为后续进行超材料混凝土板的理论带隙分析提供了可行的理论参考。结果表明：超材料混凝土单胞按沿 x 和 y 双向周期排布时，长方体骨料的超材料混凝土能够形成宽 21.6 Hz、中心频率为 147.85 Hz 的带隙，而圆柱体

骨料的超材料混凝土会形成宽 24.8 Hz、中心频率为 170.7 Hz 的带隙，长方形骨料与圆柱体骨料的超材料混凝土相比，具有更高频率和更宽范围的带隙。Oyelade 等^[56]提出了一种椭球体骨料的超材料混凝土，基于 Mitchell 等^[9]的有效模型推导了其在平面内不同方向上的有效质量密度，并通过数值分析成功验证了椭球体骨料的超材料混凝土在各方向上表现出不同的有效质量，能够在不同频率范围内对不同方向的振动进行衰减。Xu 等^[50]进一步评估了骨料形状对超材料混凝土衰减带隙的影响，在 Ma 等^[32]的基础上通过数值模拟对球体、圆柱体、椭球体、立方体人工骨料的超材料混凝土各个方向上的有效质量密度进行了对比分析，结果表明：在均匀涂有软涂层时，骨料形状

的差异性会造成金属重芯在不同方位受到不同程度的约束，具有圆柱体骨料和椭球体骨料的超材料混凝土，能够在人工骨料长轴方向和短轴方向表现出不同频率范围的带隙，其中人工骨料短轴方向的带隙频率更高且范围更宽。由于具有立方体人工骨料的超材料混凝土内重芯的运动不仅受到软涂层拉伸压缩变形的约束还会受侧向剪切变形的约束，因此会比具有球体人工骨料的超材料混凝土产生更宽范围和更高频率的带隙，同时球体和立方体的高度对称性，使得具有立方体人工骨料和球体人工骨料的超材料混凝土都具有3个方向上相对稳定的带隙。

人工骨料形状差异性对超材料混凝土带隙特性的影响，为设计具有理想衰减范围的超材料混凝土提供了依据。但目前对具有不同形状人工骨料的超材料混凝土的研究仍相对较少，且大都通过数值模拟分析，缺乏试验验证。因此，有必要对含有多种形状人工骨料的超材料混凝土进行相关试验研究，探讨人工骨料形状和组成对超材料混凝土性能的影响，并系统分析骨料受力变形后对带隙的影响，为超材料混凝土的设计方法和工程应用提供依据。

2.2 具有多带隙的超材料混凝土

超材料混凝土在带隙内所展现出的减振性能，驱使着研究者不断寻找扩大振动衰减范围的方法。从有效质量模型和有效刚度模型的表达式中可以看出，影响带隙的主要因素为金属重芯的质量和软涂层等效的刚度。由于尺寸限制，通过增大金属重芯的尺寸和软涂层的厚度来扩大带隙范围往往不可行，同时软涂层的弹性模量取决于材料自身，调整的幅度很有限。因此，学者们提出了具有双质量涂层人工骨料和具有多种人工骨料(由不同粒径、材料组成的球体人工骨料)的超材料混凝土，用于拓宽其振动衰减带隙。

在局部共振声学超材料中，Pai等^[57]和Tan等^[58]已证明了单胞内具有双质量谐振器比单质量谐振器的超材料拥有更多的带隙。基于此，Tan等^[59]和Liu等^[60]通过增加软涂层和金属层设计出了具有双质量涂层的超材料混凝土，如图10所示。Tan等^[59]考虑了软涂层的线性黏弹性效应，开发出一种用于分析有序分布双质量涂层骨料的超材料混凝土对冲击波衰减的模型，通过数值模拟验证了此模型的正确性，并发现相对单质量涂层骨

料，具有双质量涂层骨料的超材料混凝土能够实现更大程度的波衰减。Liu等^[60]在已有的研究基础上^[9,40]，针对双质量涂层的人工骨料，建立了有效质量模型，如图11所示，在单质量涂层骨料模型的基础上，分别考虑了双涂层对金属层和金属重芯的约束作用，推导了具有双质量涂层骨料时超材料混凝土的有效质量方程，表达式如下：

m_eff = M_m + ((m1*omega^2 - m1*omega2^2)*(m2*omega2^2 - m1*omega1^2))/(m1*(omega1^2 - omega^2)*(omega2^2 - omega^2) - m2*omega4^2) (5)

式中，M_m表示砂浆基体的质量。在软涂层等效刚度的约束下，质量为m1金属层和质量为m2金属重芯的自振圆频率为

omega1 = sqrt((2k1 + 2k2)/m1), omega2 = sqrt(2k2/m2) (6)

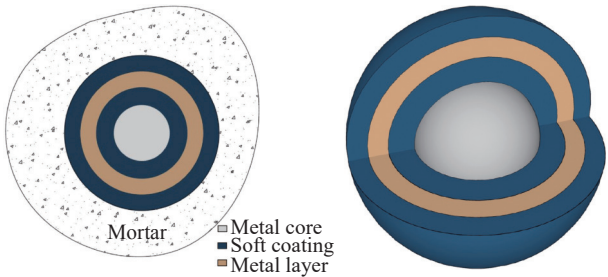
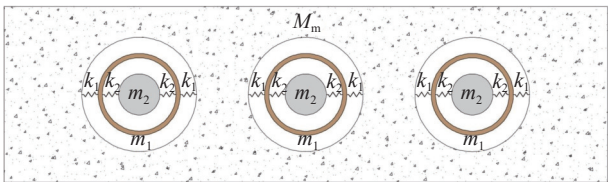


图10 具有双质量涂层骨料的超材料混凝土单胞示意图
Fig. 10 Schematic diagram of the metaconcrete unit cell with dual mass coated aggregates



M_m—Total mass of the mortar matrix
图11 双质量涂层骨料的超材料混凝土模型示意图^[59]
Fig. 11 Schematic diagram of the metaconcrete model with dual mass coated aggregates^[59]

通过振动试验研究，Liu等^[60]发现具有双质量涂层骨料的超材料混凝土能够产生两个频率范围的带隙，在振动衰减带隙内，能够比普通混凝土多衰减56.4%的输入能量，相比单质量涂层的超材料混凝土具有更宽频率范围的减振效果。同时通过理论分析发现，随着双质量涂层骨料数量从1增加到30，超材料混凝土表现出的减振频率范围随之拓宽，减振能力也得到增强。进一步地，Liu等^[61]和Zhang等^[62]将具有双质量涂层骨料的超材料混凝土设计成超材料混凝土板。Zhang等^[62]

在数值研究中发现周期阵列双质量涂层骨料的超材料混凝土板也具有两个带隙范围,通过增加骨料数量,同样会增强超材料混凝土板的减振能力。Liu 等^[61]首次浇筑了 500 mm×1 200 mm 的双质量涂层骨料超材料混凝土板,通过试验对比研究了骨料在周期阵列和随机分布时超材料混凝土板的减振性能,并为超材料混凝土开展大尺寸构件的试验研究开启了新篇章。这两种超材料混凝土板均能在人工骨料自振频率附近实现振动衰减,其减振范围主要取决于骨料自振频率,受骨料排布方式的影响较小。

不同于 Liu 等^[61]和 Zhang 等^[62]的设计, Briccola 等^[52, 63]将两种不同的普通人工骨料进行组合,设计了拥有两种自振频率骨料的超材料混凝土圆柱体试件,分别对骨料是有序布置和随机布置的试件进行了无损动态试验。试验表明,具有两种不同骨料的超材料混凝土试件相比普通混凝土试件,能够在骨料的共振频率附近衰减 80%~90% 的振动;与具有单一骨料的超材料混凝土试件相比,能将两种骨料产生的带隙进行耦合利用,表现出两个带隙,拓宽了振动衰减范围。陈俊豪等^[64]在对含有 3 种自振频率人工骨料的超材料混凝土单胞进行带隙研究中也发现了相同的规律——这种超材料混凝土单胞具有 3 条带隙,带隙存在的频率与自振频率相关。Chen 等^[65]将这种带隙拓宽思路应用到了地震防护工程中,通过同时增大或减小超材料混凝土中重芯直径和软涂层厚度,设计出了具有不同谐振骨料尺寸的超材料地震屏障,在数值仿真中实现对频率范围在 2.7~7.2 Hz 表面弹性波的衰减。最后输入实际地震波进行了时程分析,证明了通过排布不同骨料尺寸的超材料混凝土,也能够拓宽低频带隙,为其在地震防护工程中应用提供可能。同样地,改变人工骨料的材料属性也会影响其自振频率。Xu 等^[50]和 Jin 等^[51, 66-68]通过改变骨料的材料属性扩大了振动衰减范围,利用 COMSOL Multiphysics 数值软件,计算了拥有不同材料组成的超材料混凝土单胞的带隙,对均匀分布多种骨料的超材料混凝土杆开展了动态响应模拟。在爆炸冲击作用下,相比单一骨料的超材料混凝土杆,具有多带隙的超材料混凝土杆可以更有效地降低构件内部的最大应力。

具有双质量涂层骨料和多种混合骨料的超材料混凝土均表现出多带隙特性,能够扩大其对振

动的衰减范围。因此通过对人工骨料结构和种类的进一步优化和创新,继续拓宽超材料混凝土的带隙范围,能够为超材料混凝土在多种工况下的工程应用提供可能。

2.3 试验方法

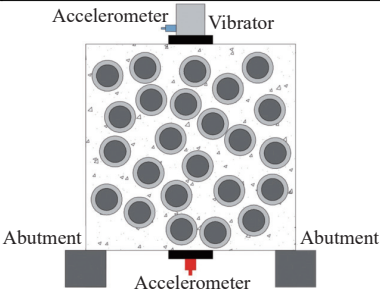
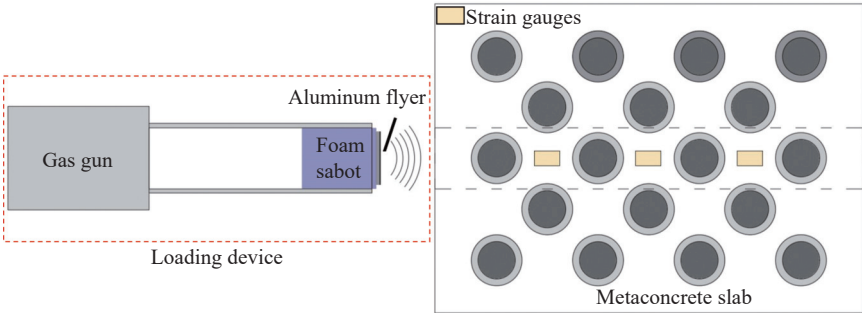
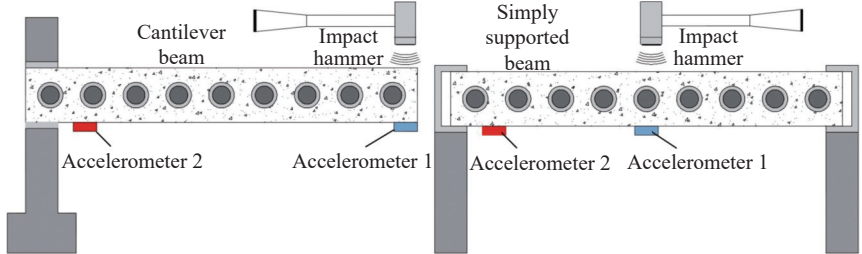
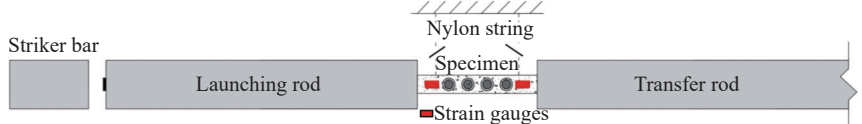
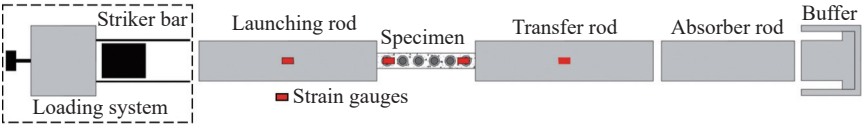
在对超材料混凝土性能的相关研究中,试验是一种重要的研究手段。通常采用振动试验(扫频振动和冲击振动)来研究和验证超材料混凝土的减振性能,但由于超材料混凝土试件种类和加载方式的不同,采用的振动试验方法也存在差异性,常见的试验方法见表 2。

2017 年, Briccola 等^[52]首次采用无损扫频振动的方法对超材料混凝土圆柱体和超材料混凝土立方体进行了振动测试,利用布置在试件两侧(底面和顶面)的加速度传感器成功验证了超材料混凝土的减振特性和衰减效应;2021 年,又通过扫频振动试验验证了具有两种人工骨料的超材料混凝土圆柱体在随机排布和有序排布时对振动的衰减效果等^[63, 69]。在 Briccola 等^[52]的基础上, Liu 等^[60]通过扫频振动试验验证了带有双质量涂层骨料的超材料混凝土立方体对振动的衰减效应。

振动扫描能够成功测试出超材料混凝土的减振范围,但无法直观或量化验证超材料混凝土结构构件衰减冲击荷载的有效性及骨料内部的局部共振现象。为此 Kettenbeil 等^[46]采用平板冲击对一种利用环氧树脂取代砂浆作为基体的超材料混凝土板进行了试验,使用高速摄影和数字图像相关技术观测到了内部骨料的共振频率;并利用布置在环氧数值基体中的应变计测量到了超材料混凝土板内的应变衰减效应,验证了超材料混凝土理论分析模型的正确性和对动态应力波的衰减效应。

Kettenbeil 等^[46]采用的平板冲击试验是以环氧树脂替代砂浆,未真正反映出具有实际砂浆材料的超材料混凝土结构构件在冲击荷载下的动态响应,同时难适用于超材料混凝土梁和杆类构件。为此, Xu 等^[33]制作了超材料混凝土杆和梁,对拥有不同骨料数量的超材料混凝土杆和梁进行了无损状态下的纵向动态冲击试验。为减小边界条件对试验的影响,使用尼龙线对超材料混凝土杆进行悬挂支撑,同时利用高速运动的冲击块击打入射杆对试件进行加载。通过布置在试件中的应变计测量并比较了试件加载两端的应变时程曲线,证明了拥有人工骨料的超材料混凝土杆,相对于

表 2 超材料混凝土的试验方法
Table 2 Test methods for metaconcrete

No.	Test type	Test schematic	Ref.
1	Sweep frequency vibration test		[52-53, 60-61, 63, 69]
2	Flat plate impact test		[46]
3	Hammer impact test/damping test		[31, 70]
4	Non-destructive dynamic impact test		[33, 71-72]
5	Impact damage test and dynamic compression test		[71-72]

水泥砂浆试件、普通混凝土试件和含有钢球的砂浆试件，能更有效地衰减应力波。同时还发现骨料数量在一定阈值内时，骨料数量不会明显改变超材料混凝土杆对冲击应力波的衰减效应，而当超过阈值时，其衰减应力波的能力随着骨料数量的增多而提高。

为得到超材料混凝土梁受横向冲击荷载的动态响应及阻尼性能，Xu 等^[31]利用冲击锤分别对超材料混凝土悬臂梁的末端和超材料混凝土简支梁的中部施加横向冲击荷载，通过布置在靠近梁加载处和支承边界处的传感器对加速度时程进行记录，对悬臂梁的加速度时程曲线进行指数拟合

确定了超材料混凝土的等效阻尼系数。同时，通过记录的加速度时程曲线验证了无论人工骨料是周期排布还是非周期排布，超材料混凝土梁在简支和悬臂状态下，均存在有效减弱横向载荷的作用，表现出比普通混凝土梁更高的阻尼特性。Ansari 等^[70]通过将人工骨料固定在普通混凝土简支梁跨中进行阻尼试验，也发现人工骨料的存在使构件的阻尼性能得到显著增强。

要实现超材料混凝土在实际工程中的应用，其基本力学性能研究也十分重要。Jin 等^[66]在对超材料混凝土进行三维受冲击载荷的数值研究中发现，由于软涂层的存在，普通人工骨料制成的

超材料混凝土的抗压强度会降低。为得到超材料混凝土的基本力学性能,Xu等^[71-72]对超材料混凝土展开了单轴压缩和单轴冲击压缩性能试验研究,并在普通人工骨料外部附加薄钢层,设计出了两种增强型人工骨料,如图12所示,并分别浇筑了7组含有不同骨料的圆柱体试件,如图13所示。超材料混凝土圆柱体试件的抗压强度试验同普通混凝土一样,在超材料混凝土圆柱体试件侧面中央分别布置纵向和横向应变计,采用ASTM压力

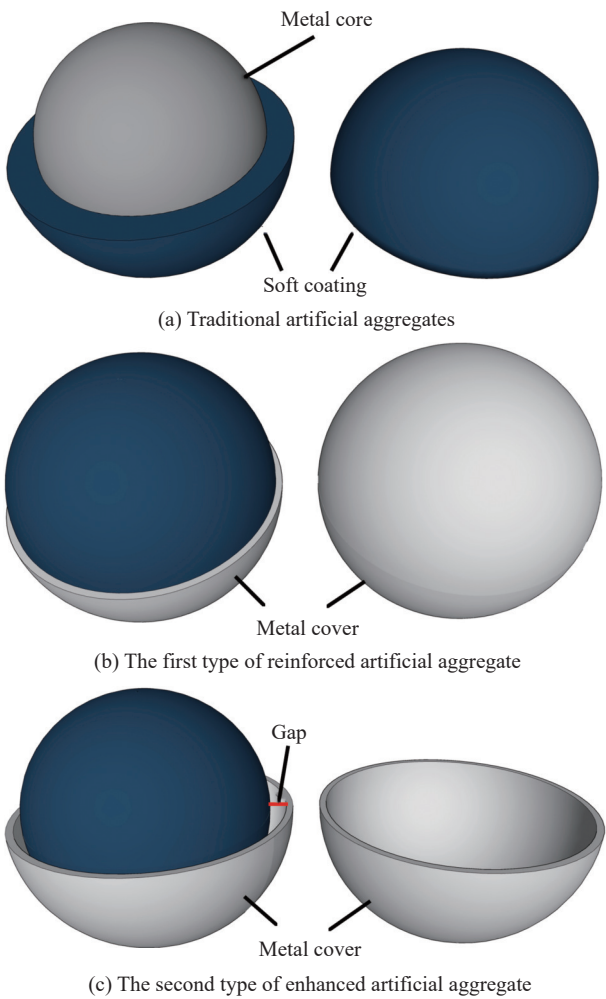


图 12 超材料混凝土中人工骨料的结构示意图^[71-72]

Fig. 12 Structural diagram of artificial aggregates in metaconcrete^[71-72]

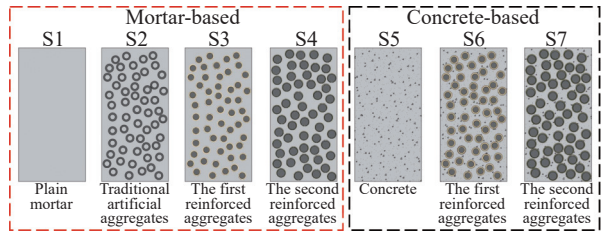


图 13 超材料混凝土试件示意图^[71-72]

Fig. 13 Schematic diagram of metaconcrete specimens^[71-72]

机进行加载,获得其抗压强度和弹性模量,其结果如图14所示。相比普通混凝土,超材料混凝土的抗压强度与弹性模量有所降低,但对人工骨料进行改进后,具有增强型人工骨料的超材料混凝土抗压强度和弹性模量的降低幅度得到了改善,同时还能对冲击振动进行衰减,这为超材料混凝土在未来的工程应用提供了有力的试验依据。同时为获得超材料混凝土的单轴压缩动态力学性能,Xu等^[72]利用分离式的霍普金森杆对其进行了破坏性和非破坏性的冲击压缩试验,将两端涂好润滑油的超材料混凝土圆柱体纵向悬挂在入射杆和传输杆之间,在试件、入射杆和传输杆上分别布置应变计对应力波进行记录,并使用高速摄影机记录下试件的破坏过程。通过改变应变率加载速率研究了超材料混凝土的破坏过程、破坏模式、动态抗压强度及能量吸收能力。相对普通混凝土,骨料增强的超材料混凝土具有更强的能量吸收能力和略低的动态抗压强度,但仍然强于传统骨料的超材料混凝土。此外,在高应变率破坏状态下,骨料外的金属壳会出现与基体分离、壳体分裂和压溃现象,为分析和设计超材料混凝土结构抵抗动态荷载提供了依据。

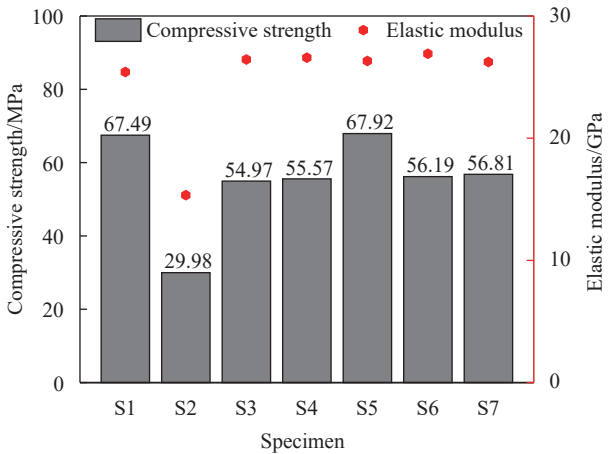


图 14 超材料混凝土试件的抗压强度和弹性模量

Fig. 14 Compressive strength and modulus of elasticity for metaconcrete specimens

目前,学者们针对不同试件类型和试验条件,已经设计出了不同的试验方法,对超材料混凝土展开了一定数量的试验研究,结果均表明超材料混凝土在减振方面存在着巨大的工程应用前景,这为后续的超材料混凝土性能研究提供了参考。但与传统混凝土相比,超材料混凝土在试验方面进行的研究还不够全面,特别是作为建筑材料其

受拉、受压、抗剪等基本力学性能和长期服役性能的研究。此外,需要对超材料混凝土大比例梁、板、柱等构件开展振动试验和力学性能试验研究及人工骨料与砂浆界面之间粘结应力和粘结性能也需得到进一步关注。

3 结论与展望

超材料混凝土是一种具有消波减振作用的新型混凝土材料,当前国内外学者提出了可行的理论分析模型和数值方法,并针对具有不同人工骨料形式和不同骨料排列方式的超材料混凝土进行了带隙范围、减振抗冲击、阻尼和抗压强度等研究。通过对近年来超材料混凝土性能研究现状的梳理和分析,得出以下结论:

(1) 超材料混凝土内部人工骨料的局部共振效应,使其具有可消波减振的共振带隙,能够削弱应力传播和降低应力幅值,并拥有更好的阻尼特性,在土木工程中具有广阔的应用前景;

(2) 骨料尺寸与形状、软涂层和重芯的材料性能、骨料排布方式及数量是影响超材料混凝土带隙范围和带隙减振性能的重要因素,其中骨料的有序排布可同时产生共振带隙和布拉格带隙,能够进一步增强带隙的宽度和减振性能;

(3) 具有双质量谐振器骨料和多种不同尺寸单质量骨料的超材料混凝土,能够产生多个共振带隙,这对拓宽超材料混凝土的减振带隙范围十分关键;

(4) 通过在人工骨料外增加金属壳,可在保证超材料混凝土减振性能的同时,有效改善其基本力学性能,并为超材料混凝土用于实际工程中提供了可能。

目前关于超材料混凝土的研究十分有限,距离其实际工程应用尚面临着许多挑战,为此,在以下方面还有待开展深入系统的研究工作:

(1) 在理论研究和数值计算方法方面,需要考虑材料非线性及阻尼对超材料混凝土带隙的影响,提出能够计算多个共振带隙和布拉格散射带隙的理论模型;

(2) 在材料性能研究层面,人工骨料的使用可能会造成混凝土强度等力学性能的降低,因此有必要对其受压、受拉、抗剪等基本力学性能进行研究。此外,不同材料之间粘结作用对超材料共振带隙的影响也是有待进一步研究的重要方向;

(3) 在构件研究方面,当前仅有少量文献研究

了超材料混凝土梁、板试件的减振性能,需要进一步对超材料混凝土构件,尤其是大比例构件和结构开展力学性能、动力响应和减振性能的试验研究和数值分析;

(4) 在拓宽带隙方面,由于振动激励频率分布较广,而带隙范围有限,因此可通过进一步优化人工骨料结构组成,如将单质量涂层骨料替换成不同尺寸的双质量涂层骨料或多质量涂层骨料,使超材料混凝土产生多个共振带隙以拓宽减振范围,为超材料混凝土实现对如地震、交通振动等低频振动衰减提供可能;

(5) 在骨料制作方面,由于人工骨料结构精细,内部重芯多为金属,增加了超材料混凝土的应用成本,因此亟需对制作工艺进行改进,如结合3D打印等新型制造技术优化软涂层结构,将实心结构替换成多孔结构,并采用价格相对低廉的钢材或其他人造材料对铅芯和软涂层进行替换,开发出低成本、简便的骨料制作方法。

参考文献:

- [1] XU C, CHEN W S, HAO H, et al. Effect of engineered aggregate configuration and design on stress wave attenuation of metaconcrete rod structure[J]. [International Journal of Solids and Structures](#), 2021, 232: 111182.
- [2] LI X, NI X, FENG L, et al. Tunable unidirectional sound propagation through a sonic-crystal-based acoustic diode[J]. [Physical Review Letters](#), 2011, 160: 084301.
- [3] BRUN M, GUENNEAU S, MOVCHAN A B. Achieving control of in-plane elastic waves[J]. [Applied Physics Letters](#), 2009, 94: 061903.
- [4] HIRSEKORN M. Small-size sonic crystals with strong attenuation bands in the audible frequency range[J]. [Applied Physics Letters](#), 2004, 84(17): 3364-3366.
- [5] SMITH D R, PENDRY J B, WILTSHIRE M C. Metamaterials and negative refractive index[J]. [Science](#), 2004, 305: 788-792.
- [6] SOUKOULIS C M, WEGENER M. Past achievements and future challenges in 3D photonic metamaterials[J]. [Nature Photonics](#), 2011, 5: 523-530.
- [7] LU M H, FENG L, CHEN Y F. Phononic crystals and acoustic metamaterials[J]. [Materials Today](#), 2009, 12(12): 34-42.
- [8] KUSHWAHA M S, HALEVI P. Acoustic band structure of periodic elastic composites[J]. [Physical Review Letter](#), 1993, 71(13): 2022-2025.
- [9] MITCHELL S J, PANDOLFI A, AND ORTIZ M. Meta-concrete: Designed aggregates to enhance dynamic

- performance[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2014, 65: 69-81.
- [10] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58: 2059-2062.
- [11] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58: 2486-2489.
- [12] WANG G, YU D L, WEN J H, et al. One-dimensional phononic crystals with locally resonant structures[J]. *Physics Letters A*, 2004, 327: 512-521.
- [13] NOTOMI M. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refractionlike behaviour in the vicinity of the photonic band gap[J]. *Physical Review B*, 2000, 62: 10696-10705.
- [14] 韩洁, 路国运. 超材料混凝土单胞骨料的无阻尼自由振动特性研究 [J]. 振动与冲击, 2021, 40(8): 173-178.
HAN Jie, LU Guoyun. Study of undamped free vibration characteristics on metaconcrete unit cell[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(8): 173-178(in Chinese).
- [15] LUO C, JOHNSON S G, JOANNOPOULOS J D, et al. All-angle negative refraction without negative effective index[J]. *Physical Review B*, 2002, 65: 201104.
- [16] ZHU R, LIU X N, HU G K, et al. Negative refraction of elastic waves at the deep-subwavelength scale in a single-phase metamaterial[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 5510.
- [17] LI J S, FOK L, YIN X B, et al. Experimental demonstration of an acoustic magnifying hyperlens[J]. *Nature Materials*, 2009, 8: 931-934.
- [18] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85: 3966-3969.
- [19] SCHURIG D, MOCK J J, JUSTICE B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. *Science*, 2006, 314(5801): 977-980.
- [20] CUMMER S, SCHURIG D. One path to acoustic cloaking[J]. *New Journal Physics*, 2007, 9(3):45.
- [21] ALITALO P, TRETYAKOV S. Electromagnetic cloaking with metamaterials[J]. *Materials Today*, 2009, 12(3): 22-29.
- [22] ZHENG L Y, WU Y, NI X, et al. Acoustic cloaking by a near-zero-index phononic crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104: 161904.
- [23] SMITH D R, PADILLA W J, VIER V C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84: 4184-4187.
- [24] SOROKIN S V, ERSHOVA O A. Analysis of the energy transmission in compound cylindrical shells with and without internal heavy fluid loading by boundary integral equations and by Floquet theory[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 291(1/2): 81-99.
- [25] LIU Z, ZHANG X, MAO Y, et al. Locally resonant sonic materials[J]. *Science*, 2000, 289: 1734-1736.
- [26] SHENG P, ZHANG X X, LIU Z Y, et al. Locally resonant sonic materials[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2003, 338: 201-205.
- [27] XIAO Y, WEN J H, YU D L, et al. Flexural wave propagation in beams with periodically attached vibration absorbers: Band-gap behavior and band formation mechanisms[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(4): 867-893.
- [28] XIAO Y, WEN J H, WEN X S. Broadband locally resonant beams containing multiple periodic arrays of attached resonators[J]. *Physics Letters A*, 2012, 376: 1384-1390.
- [29] CHEN J S, SHARMA B, SUN C T. Dynamic behavior of sandwich structure containing spring-mass resonators[J]. *Composite Structures*, 2011, 93: 2120-2125.
- [30] 熊剑荣, 黎永盛, 任凤鸣. 局部共振超材料梁的弯曲带隙及减振性能研究 [J]. 广州大学学报 (自然科学版), 2023, 22(2): 10-15.
XIONG Jianrong, LI Yongsheng, REN Fengming. Flexural bandgap and vibration reduction performance of locally resonant metamaterial beams[J]. *Journal of Guangzhou University (Nature Science Edition)*, 2023, 22(2): 10-15(in Chinese).
- [31] XU C, CHEN W S, HAO H, et al. Damping properties and dynamic responses of metaconcrete beam structures subjected to transverse loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 311: 125273.
- [32] MA G C, FU C X, WANG G H, et al. Polarization bandgaps and fluid-like elasticity in fully solid elastic metamaterials[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 13536.
- [33] XU C, CHEN W S, HAO H, et al. Experimental and numerical assessment of stress wave attenuation of metaconcrete rods subjected to impulsive loads[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 159: 104052.
- [34] XIAO Y, WEN J H, WEN X S. Longitudinal wave band gaps in metamaterial-based elastic rods containing multi-degree-of-freedom resonators[J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(3): 033042.
- [35] MIRANDA E, ANGELIN A F, SILVA F M, et al. Passive vibration control using a metaconcrete thin plate[J]. *Cerâmica*, 2019, 65: 27-33.
- [36] 郜英杰, 范华林, 张蓓, 等. 超材料消波混凝土板在二维平面波作用下的削波效应研究 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(20): 39-44.
GAO Yingjie, FAN Hualin, ZHANG Bei, et al. Wave attenuation of super-material wave absorbing concrete panel subjected to two-dimensional plane wave[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(20): 39-44.

- [37] XIAO Y, WEN J H, WEN X S. Flexural wave band gaps in locally resonant thin plates with periodically attached spring-mass resonators[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(19): 195401.
- [38] 徐青, 张俊杰. 周期复合板的带隙特性和辐射噪声衰减特性分析[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(11): 188-191.
XU Qing, ZHANG Junjie. Research on the band gap and attenuation characteristic of sound radiation for periodic sompound plate[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(11): 188-191.
- [39] MILTON G W, WILLIS J R. On modifications of Newton's second law and linear continuum elastodynamics[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 2007, 463: 855-880.
- [40] HUANG H H, SUN C T, HUANG G L. On the negative effective mass density in acoustic metamaterials[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2009, 47(4): 610-617.
- [41] HUANG H H, SUN C T. Wave attenuation mechanism in an acoustic metamaterial with negative effective mass density[J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11: 013003.
- [42] VO N H, PHAM T M, BI K, et al. Model for analytical investigation on meta-lattice truss for low-frequency spatial wave manipulation[J]. *Wave Motion*, 2021, 103: 102735.
- [43] LIU Y, SHEN X H, SU X Y, et al. Elastic metamaterials with low-frequency passbands based on lattice system with on-site potential[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2016, 138(2): 021011.
- [44] VO N H, PHAM T M, HAO H, et al. A reinvestigation of the spring-mass model for metamaterial bandgap prediction[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 221: 107219.
- [45] 韩洁, 路国运, 赵一涛. 超材料混凝土单胞骨料的有阻尼自由振动特性研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(4): 239-245, 269.
HAN Jie, LU Guoyun, ZHAO Yitao. A study of damped free vibration characteristics on metaconcrete unit cell[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(4): 239-245, 269(in Chinese).
- [46] KETTENBEIL C, RAVICHANDRAN G. Experimental investigation of the dynamic behavior of metaconcrete[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 111: 199-207.
- [47] JIN H, HAO H, HAO Y F, et al. Predicting the response of locally resonant concrete structure under blast load[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 252: 118920.
- [48] MITCHELL S J, PANDOLFI A, ORTIZ M. Investigation of elastic wave transmission in a metaconcrete slab[J]. *Mechanics of Materials*, 2015, 91: 295-303.
- [49] OYELADE A O, ABIODUN Y O, SADIQ M O. Dynamic behaviour of concrete containing aggregate resonant frequency[J]. *Journal of Computational Applied Mechanics*, 2018, 49(2): 380-385.
- [50] XU C, CHEN W S, HAO H. The influence of design parameters of engineered aggregate in metaconcrete on bandgap region[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2020, 139: 103929.
- [51] JIN H X, CHEN W S, HAO H, et al. Numerical study on impact resistance of metaconcrete[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica*, 2020, 50(2): 78-89.
- [52] BRICCOLA D, ORTIZ M, PANDOLFI A. Experimental validation of metaconcrete blast mitigation properties[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2017, 84(3): 031001.
- [53] BRICCOLA D, TOMASIN M, NETTI T, et al. The influence of a lattice-like pattern of inclusions on the attenuation properties of metaconcrete[J]. *Frontiers in Materials*, 2019, 6: 35.
- [54] MITCHELL S J, PANDOLFI A, ORTIZ M. Effect of brittle fracture in a metaconcrete slab under shock loading[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2016, 142(4): 04016010.
- [55] 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[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(6): 69-77.
ZHANG En, LU Guoyun, YANG Huiwei, et al. Band gap features of metaconcrete and shock wave attenuation in it[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(6): 69-77(in Chinese).
- [56] OYELADE A O, SADIQ M O, OGUNDALU O A, et al. On the dynamic properties of metamaterials in civil engineering structures[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 640: 012045.
- [57] PAI P F, PENG H, JIANG S. Acoustic metamaterial beams based on multi-frequency vibration absorbers[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, 79: 195-205.
- [58] TAN K T, HUANG H H, SUN C T. Blast-wave impact mitigation using negative effective mass density concept of elastic metamaterials[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 64: 20-29.
- [59] TAN S H, POH L H, TKALICH D. Homogenized enriched model for blast wave propagation in metaconcrete with viscoelastic compliant layer[J]. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 2019, 119: 1395-1418.
- [60] LIU Y, AN X Y, CHEN H L, et al. Vibration attenuation of finite-size metaconcrete: Mechanism, prediction and verification[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2021, 143: 106294.
- [61] LIU Y, SHI D Y, HE H G, et al. Double-resonator based metaconcrete composite slabs and vibration attenuation mechanism[J]. *Engineering Structures*, 2022, 262: 114392.
- [62] ZHANG E, ZHAO H X, LU G Y, et al. Design and evaluation of dual-resonant aggregates metaconcrete[J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2023, 20(2): 1-14.

e479.

[63] BRICCOLA D, PANDOLFI A. Analysis on the dynamic wave attenuation properties of metaconcrete considering a quasi-random arrangement of inclusions[J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 7: 615189.

[64] 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 [J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(5): 1-11.
CHEN Junhao, ZENG Xiaohui, XIE Youjun, et al. Band gap properties of metaconcrete with vibration reduction function[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(5): 1-11(in Chinese).

[65] CHEN Z Y, WANG G F, LIM C W. Artificially engineered metaconcrete with wide bandgap for seismic surface wave manipulation[J]. *Engineering Structures*, 2023, 276: 115375.

[66] JIN H X, HAO H, CHEN W S, et al. Spall behaviors of metaconcrete: 3D meso-scale modelling[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2021, 21(9): 2150121.

[67] JIN H X, HAO H, CHEN W S, et al. Influence of bandgap on the response of periodic metaconcrete rod structure under blast load[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(11): 04022284.

[68] JIN H X, HAO H, CHEN W S, et al. Effect of enhanced coating layer on the bandgap characteristics and response of metaconcrete[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2021, 30(1): 175-188.

[69] BRICCOLA D, CUNI M, DE JULI A, et al. Experimental validation of the attenuation properties in the sonic range of metaconcrete containing two types of resonant inclusions[J]. *Experimental Mechanics*, 2021, 61(3): 515-532.

[70] ANSARI M, ZACHARIAS C, KOENKE C. Metaconcrete: An experimental study on the impact of the core-coating inclusions on mechanical vibration[J]. *Materials*, 2023, 16(5): 1836.

[71] XU C, CHEN W S, HAO H, et al. Static mechanical properties and stress wave attenuation of metaconcrete subjected to impulsive loading[J]. *Engineering Structures*, 2022, 263: 114382.

[72] XU C, CHEN W S, HAO H, et al. Dynamic compressive properties of metaconcrete material[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 351: 128974.