



地震超材料: 从自然结构到新型人工结构

陈振宇^{1,2*}, 林志华^{1,2*}, 施帆³

1. 香港城市大学深圳研究院, 深圳 518057;

2. 香港城市大学建筑学及土木工程学系, 香港;

3. 香港科技大学机械及航空航天工程学系, 香港

* 联系人, E-mail: zhenychen8-c@my.cityu.edu.hk; bccwlim@cityu.edu.hk

2021-05-30 收稿, 2021-06-27 修回, 2021-06-30 接受, 2021-07-01 网络版发表

国家自然科学基金(12072165)和深圳市知识创新计划基础研究项目(JCYJ20170413141248626)资助

摘要 光子晶体、声子晶体和声学超材料在调控波和波衰减等领域产生了深远影响. 它们并不是自然界中新发现的材料, 而是根据不同需求设计的复合结构, 通常利用布拉格散射或局域共振机理来达到调控声波/弹性波能带结构的目的. 与光子晶体不同, 声子晶体和声学超材料的工作区域在较低频区域, 因此获得低频且大范围的禁带是该领域的研究重点, 并逐渐拓展到频率低、波长长的地震波隔震减灾防控上. 本文从纳米光子和地震超材料的联系出发, 从固体物理的视角分析了地震超材料的城市群、自然森林超材料等, 将新型人工地震超材料在分布区域、禁带机制、实验方式3个方面进行了分类比较, 并展望了现阶段地震超材料研究的一些局限性以及面临的挑战.

关键词 地震保护, 地震超材料, 能带结构, 弹性波

声子晶体(phononic crystal)和声学超材料(acoustic metamaterial)由于具有非凡特性, 在很多技术领域逐渐兴起, 并展现出非凡的发展潜力. 声子晶体通过在液体或者固体基体中周期排列一系列弹性介质来调制声波或弹性波的传播, 这一领域的形成源于电子晶体(electronic crystal)和光子晶体(photonic crystal)的概念. 1946年, Brillouin^[1]指出, 波具有类比性和统一性, 且与它们的具体形式(如横波还是纵波、弹性波还是电磁波)无关. 这些性质是由电子流、光波、声波、弹性波等在不同结构中的衍射、反射或者折射等现象形成的. 当声子晶体的概念第一次被提出时, Kushwaha等人^[2]就将电子、光子、声子晶体的性质进行类比. 这些具有理想布拉维格子的周期性结构会产生相同的布拉格衍射行为, 具有高度的相似性. 尽管它们在晶格大小、计算维度、组成材料、极化方式、波动方程等方面有

所不同, 但是由于三者的数学形式一脉相承, 电子、光子晶体的研究依然能对声子晶体的发展予以启发、进行指导. 光子晶体中, 由于振幅为矢量, 光波是矢量波. 但由于其两个偏振分量均为一种类型的波, 且相互没有耦合关系, 因此在各向同性的介质中, 它常被简化为标量波. 相较而言, 声子晶体中的弹性波为一种横纵波相互耦合的矢量波, 因此声子晶体的研究则更为复杂^[3].

声子晶体存在能带是它最显著的一个特征. 能带一般指频率和波数的关系. 通常, 能带结构由两部分组成: 一部分为禁带/带隙区域, 另一部分为通带区域. 在禁带频率范围内, 波不能传播; 相反, 在通带频率范围内, 波可以传播. 禁带又可分为全禁带以及方向禁带. 在全禁带频率范围内, 波在各个方向都不能传播, 而在方向禁带内, 只有某些方向的波不可以传播. 在声子晶

引用格式: 陈振宇, 林志华, 施帆. 地震超材料: 从自然结构到新型人工结构. 科学通报, 2022, 67: 1264–1278

Chen Z Y, Lim C W, Shi F. A review on seismic metamaterials: From natural to artificial structures (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 1264–1278, doi: 10.1360/TB-2021-0517

体中,禁带的产生机理一般为布拉格散射机制.当结构周期尺寸与波长大小类似时,反射波在相邻的原胞中相消干涉,产生禁带.由于低频波所对应的波长很大,因此周期结构的原胞尺寸需要与波长数量级相当才能产生低频禁带,这在实际应用中受到很大限制.因此,新的低频禁带产生机制亟须发掘.

进入21世纪, Liu等人^[4]发现,在软性基体材料中嵌入铅制共振单元能够显著改变结构性能,突破传统的质量定律.具体而言,该结构通过新的机制产生400 Hz左右的低频禁带,且该禁带所对应的波长比结构晶格常数大两个数量级.这第一次突破了布拉格散射型声子晶体的尺寸限制,为低频禁带的产生引入了新的局域共振机理.借鉴从电磁波超材料发展而来的超材料概念,声学超材料从声子晶体的概念中衍生出来^[5].2004年, Li和Chan^[6]发现了具有负体积模量以及负等效质量的“双负”声学人工结构.通过类比电磁波超材料中的负介电常数及负磁导率,这类结构首次被命名为声学超材料.自此,这种在周期或半周期基体材料中设计亚波长分布局域共振单元的人工结构被广泛运用于减震、导波、隔声降噪、声聚焦、声学斗篷等工程物理器件的设计中.关于声子晶体^[7~9]、声学超材料^[10~12]以及更进一步的拓扑超材料^[13~15],迄今已经有大量的评述性文章及研究成果.

弹性波超材料属于声学超材料的一种.相较于光波,弹性波的波长较长,于是高效、轻量、宽带、低频的弹性波超材料在近年受到越来越多的关注.研究发现,兰姆波通过模式分解以及人为调控激发方式,可以轻易实现在宏观^[16]以及纳观板结构^[15]内进行波的调控.受以上人工结构的启发,超低频地震超材料作为弹性波超材料的一个分支,被广泛应用于地震波屏蔽、地震波衰减等领域的研究.地震波源于地球表层抑或表层下快速释放能量的过程,具有波长长、衰减慢、传输远等特点.地震波与普通应力波相比,其能量更高、破坏力更强,因此在结构设计时需要考虑更多的影响因素,例如材料的非线性本构、结构的塑性响应等.

传统的隔震方式包括增加整体刚度、底层引入柔性结构等.但是,它们主要依托于建筑结构本身的强度并利用结构的塑性、材料的延性来抗震.这就导致了两方面的主要缺陷:一方面,其对地震波的伤害是被动消极的;另一方面,其存在由于位移过大导致的整体结构倾覆等风险.那么,会不会存在地震波可以被人为设

计及控制的情况?虽然在传统建筑结构中这非常难实现,但是声学超材料由于存在禁带、负反射、导波等性能,已经初步在地震波的防控上显示出优越性.因此,本文将从自然界的森林地震超材料以及超城市建筑群抵御地震波入手,综述地震波的发展、应用以及尚存在的问题.

1 地震超材料发展概述

1.1 基本研究现状

地震超材料的基本设计思想是在亚波长范围内设计不同材料的结构构件以改变地面的局域特性.由于地震超材料的提出,很多重要的概念(例如有效介质理论、布里渊区、倒格矢等)都从光子晶体等领域的研究中拓展而来.简言之,地震超材料的设计目的在于调制、减弱甚至阻止自然地震波的传播.在大部分情况下,地震波通过地基土-结构或者土-基础-结构两种方式传递能量,以致结构震动^[17].与传统的各向同性介质不同,地基土以及土-结构物体系有很多复杂的现象,例如非弹性行为甚至液化失效等,导致地震超材料的设计和实现更加复杂.

从Web of Science数据库收录文章数量来看,以地震超材料为主题的文章数量仅占以弹性波超材料为主题文章数量的约8.8%.具体原因有两方面:(1)地震超材料需要巨大的尺寸,实验制备较难;(2)地表的地质学特征增加了弹性波波场的复杂性.据统计,现阶段大部分工作都局限于理论推导和数值模拟分析.理论方式分为两类:(1)基于周期结构的频散特性分析方法,例如传递矩阵法、平面波展开法、多重散射理论、有限单元法、时域有限差分法、微分求积法等,但它们的收敛性、精度、应用维度等有所差别.(2)基于局域共振理论设计出负刚度动力吸震器、负体积模量手性结构^[18]等.数值模拟则采用常用的商业软件,例如ANSYS和COMSOL Multiphysics等,通过建模等一系列操作可计算出所需的频散关系以及模态结果.

理论上,通过设计人工各向异性介质来调控地震波的传播是可行的,但地震超材料真正引起人们广泛的关注起源于Brûlé等人^[19]于2012年设计的全尺寸实验(full-scale experiment).他们通过周期性钻孔将实验区域类比于声子晶体,在理论、模拟及实验上验证了频率范围为50 Hz左右的地震表面波在该周期结构中可以被过滤.但是,该实验主要存在两个缺点:(1)实际的

地震波频率小于20 Hz^[20], 实验中波的频率并不在此范围内; (2) 该实验并未考虑场地中不同区域之间土壤存在的差异. 尽管如此, 该实验依然有效地在实验上验证了地震超材料应用于土木工程抗震工程中的实际价值, 为低频滤波提供了很好的经验^[19]. 并且, Brûlé等人^[21]设计了另外一个尺寸实验探究地表传播的破坏性环境性信号. 他们在结构化土壤(structural soil)上进行了大规模测试, 以周期性排列的圆柱形垂直钻孔构造出网格形式结构, 且控制激发波的频率在10 Hz以下. 实验表明, 在该类地震超材料中的等效动态各向异性等性质可以用于调控地震表面波, 类似于在弹性波超材料中常见的负反射系数等性质. 2019年, 石南南等人^[22]综述了地震超材料的带隙特性和隔震原理, 总结了其应用前景. Brûlé等人^[23]指出, 纳米光子对地震超材料的产生具有重大意义, 并对此进行了系统阐述. 2020年, Mu等人^[24]列举了多种地震超材料的分类方式, 分析了其他低频且禁带范围较大的弹性波超材料. Brûlé等人^[17]通过分析地震超材料在土木工程结构隔震减震方面的应用, 重点强调了发展地震超材料的紧迫性. 2021年, Muhammad和Lim^[25]从光子晶体着手, 详细叙

述了地震超材料的发展史, 并提出了机器学习等方法在此方面可能的应用. Vasileiadis等人^[8]强调了地震超材料并不限于人工结构, 也有周期性树木组成的天然结构. 此外, 一些常见的地震超材料模型也逐渐被设计出来, 例如固支于基岩(bedrock)的地震超材料^[26](图1(a))、超低频巨型声子晶体^[27](图1(b))、带衰减域(attenuation zone)的层状复合周期基础^[28](图1(c))、负泊松比地震超材料^[29](图1(d))等.

1.2 从纳米光子到地震超材料

近期, Brûlé等人^[17,23]指出, 纳米光子的研究对地震巨型结构的发现至关重要. 通常, 地震波的波长范围从分米级别到百米级别, 相较而言, 光波(包括紫外光、可见光、红外光等)的波长仅约有200~1200 nm. 虽然这两者的区别非常明显, 但是正如Brûlé等人^[30]在2017年所强调的“超城市”(meta city)概念那样, 很多城市的建筑分布规律都与电磁波超材料的分布类似, 可以说, 地震超材料源于纳米光子学的研究进展, 如图2所示. 于是, 他们通过大规模的理论 and 实验证明了街区化的建筑群可以被认为是与地震信号互相作用的纯弹性地表

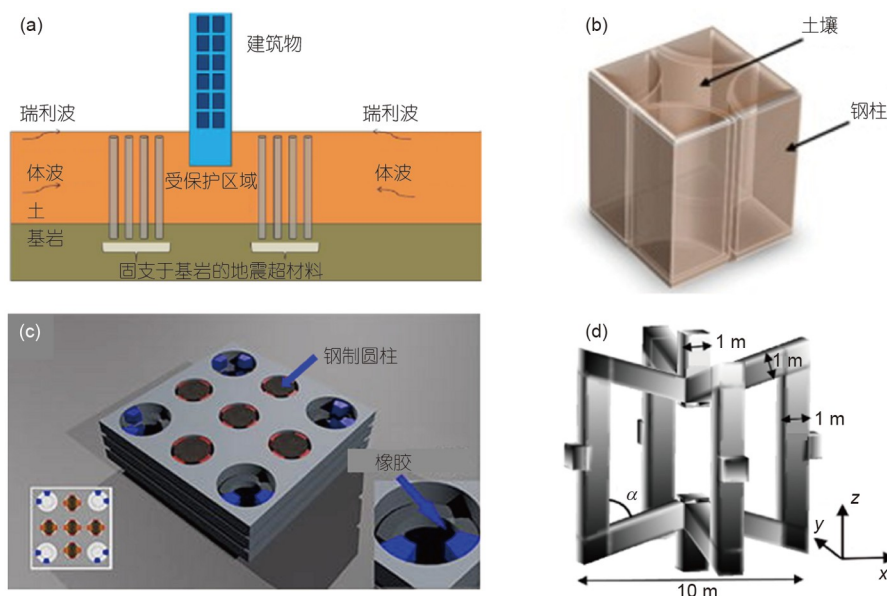


图1 (网络版彩色)几种新型地震超材料. (a)一种由周期性柱固支于基岩组成的地震超材料, 以保护建筑物免受地震波破坏^[26], Copyright © 2017, IOP. (b)由嵌入土壤的周期性钢柱组成的低频巨型声子晶体^[27], Copyright © 2019, APS. (c)由更有效的衰减机理设计出的复合周期基础^[28], Copyright © 2018, AIP Publishing. (d)一种负泊松比地震超材料^[29], Copyright © 2018, EDP Sciences

Figure 1 (Color online) Several novel seismic metamaterials. (a) A clamped seismic metamaterial which consists of periodic columns clamped to bedrocks for protecting buildings from seismic waves^[26], Copyright © 2017, IOP. (b) A low-frequency large scale phononic crystal which is composed of periodic steel columns embedded in soil background^[27], Copyright © 2019, APS. (c) A composite periodic foundation governed by a more-efficient attenuation mechanism^[28], Copyright © 2018, AIP Publishing. (d) A seismic metamaterial with negative Poisson's ratios^[29], Copyright © 2018, EDP Sciences

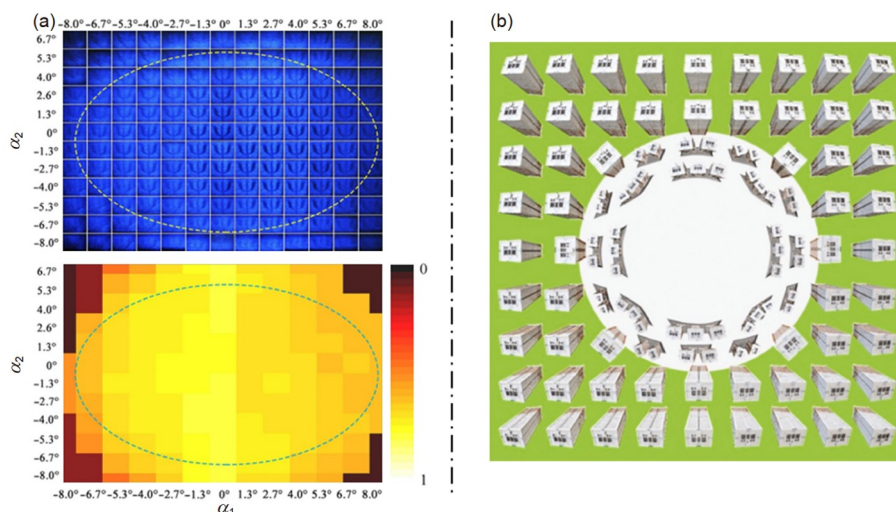


图2 (网络版彩色) 纳米、微米级别的光子晶体与十米级别的巨型结构的类比。(a) 一种用于隐形斗篷的光子芯片^[31], Copyright © 2016, Springer Nature. (b) 由周期性高层建筑组成的巨型地震超材料^[23], Copyright © 2019, De Gruyter

Figure 2 (Color online) Analogies between photonic crystals at nanometer or micrometer scale and megastructures at decameter scale. (a) A photonic chip for invisibility cloak^[31], Copyright © 2016, Springer Nature. (b) A mega seismic metamaterial consisting of periodic tall buildings^[23], Copyright © 2019, De Gruyter

局域共振体。其中, 很显著的一个例子就是加洛罗马 (Gallo-Roman) 剧院, 它的整体结构类似于光子隐身超材料的设计^[30], 一定程度上解释了这样一个古老的建筑能够保留下来的原因。

由此可见, 地震超材料的发展离不开光子、声子晶体等新型人工结构的发展。光子、声子能带的发展和验证^[2,32], 为地震超材料利用能带理论、“彩虹俘获”效应 (rainbow trapping effect) 等进行地震波的滤波、衰减提供了强劲利器。利用禁带的特性, Muhammad等人^[33]设计了周期性分布在半无限空间分层土上的钢柱, 发现这样的结构对低频地震表面波有很好的衰减作用。这种在地面上布置的柱形结构类似于声子晶体板上的共振单元, 因此, 他们还考察了由表面波激发的钢柱局域共振模态, 揭示了这些人工构造柱和表面波相互作用的机理。Zhang等人^[34]通过设计周期性交叉型或方形截面的嵌入地下式桩型结构, 考察了兰姆波在该结构中传播规律, 并且推广到地震波的调制上。根据整体结构的动力模态响应图, 他们发现两种截面对地震波的衰减都起了很大的作用, 但是相较而言, 方形截面效果更佳。

“彩虹俘获”的概念是从量子光学中提出, 其实现是基于一种类似楔形、分布着半波长共振单元的波导结构^[35]。可见光波包在该结构中被激发, 其各个频率分量会被截留在结构的不同厚度处, 产生一道彩虹^[36]。

Krödel等人^[37]设计出了一种宽带地震超材料。他们通过改变排列局域共振型超屏障 (metabarrier) 中共振单元的自振频率, 使它们呈一定规律均匀分布, 进而观察到了在空间谱上分布的不同频率波以及在低频范围内的宽禁带。Palermo等人^[38]也利用这样的效应设计出含双质量单元谐振器的超屏障, 可以保护建筑物免受瑞利波的破坏。

此外, 声子晶体中的被动、主动调控^[39,40]的思想也被应用于调控低频地震波的器件设计上。2018年, Pu和Shi^[41]在层状土中以矩形晶格人为排布周期性桩基础, 通过结构的瑞利波及勒夫波在低频范围内会有效衰减。他们改变了柱间距, 即晶格常数, 发现整体结构的衰减域能够得到有效调控。但是, 此调控方法在整体结构设计施工完成之后不能够灵活实施, 属于被动调控范畴。为了应对不同环境以及多变的实际需求, 半主动^[42,43]或者主动^[44]的方式也被应用到抗震结构上。

光子晶体、声子晶体中的结构形式、奇特性质不胜枚举。将它们应用于低频地震超材料的设计, 可采用的结构有拉胀超材料^[45]、手性超材料^[46]、负刚度超材料^[47]等。由此可见, 虽然光波与地震波有巨大区别, 但在地震超材料领域, 通过合理利用纳米光子发展以来设计出的一些人工结构, 可以有效且智能地调控低频地震弹性波。

1.3 自然界的地震超材料

自然界的事物和规律等一直为研究者提供思路及理念,多应用于仿生结构的设计.例如,Neil等人^[48]近期发现,蛾翅是一种天然的声学超材料;Huang等人^[49]受蛾眼启发,设计出一种可调频且具有疏水性的电磁波超材料.类似地,Colombi等人^[50]将超材料中的局域共振机理和自然界的树木联系在一起.他们发现,当瑞利波通过森林时,在半波长范围内周期排列的树木将会发生低频共振,这个行为与局域共振型声学超材料非常相似.尽管该研究的激发频率小于150 Hz,但是他们指出,竖直共振单元的共振频率与其长度成反比,故可据此设计出共振频率小于10 Hz的结构,以应用于实际的地震瑞利波衰减调控.这个发现引起了人们探求森林地震超材料(forest seismic metamaterial)的兴趣.

此后,Lata等人^[51]利用地震波在空间排布树木中散射的几何相位研发出一种声学传感(acoustic sensing)技术,可以实现远距离监测.Liu等人^[52]研究了城市森林地震超材料的减震效能,并分析了土壤的弹性模量等因素对禁带的影响.Muhammad等人^[53]研究了瑞利波在森林地震超材料的传播情况,考察了树木的机械及几何特性等因素对整体系统效能的影响.他们发现,当树木的纵向共振模式与在软沉积土中传播的瑞利波垂直分量相互耦合时,能够观测到非常强的波衰减.因

此,森林中的树木可以精确地用作天然的局域共振超材料,能够通过结构优化在低频范围内产生极宽带隙^[53].但是,这些工作一般将树木简化成竖直柱形局域共振单元,未考虑实际中树木本身的性质,例如树枝甚至树叶对整体系统的影响.因此,Muhammad和Lim^[54]在2021年将研究聚焦在树枝的分布对森林超材料的影响.如图3所示,通过测试频率响应,他们发现,这样的结构能产生在20 Hz左右的低频宽禁带.他们还考察了单侧树枝和两侧树枝的影响.进一步基于不同频率下整体系统的位移场分布,他们发现一部分瑞利波会被树木俘获,而另一部分瑞利波则被转化为剪切体波传向深处地层.

2 基于分布位置分类

基于地震超材料的分布位置,大致可以分为外部屏障型地震超材料(outer-shielded seismic metamaterial)和超材料基础(metamaterial foundation)^[24].外部屏障型地震超材料的设计区域分布在受保护的建筑物之外,形成禁带范围与地震波频率相近的屏障,俘获地震能量波或者将表面波转化为体波,改变其传输路径,以达到保护建筑物免受地震波侵袭的目的.超材料基础由于与建筑物直接相连,功能与外部屏障型不同,但其机理也是形成禁带以阻止地震波通过基础传递到上部结构.

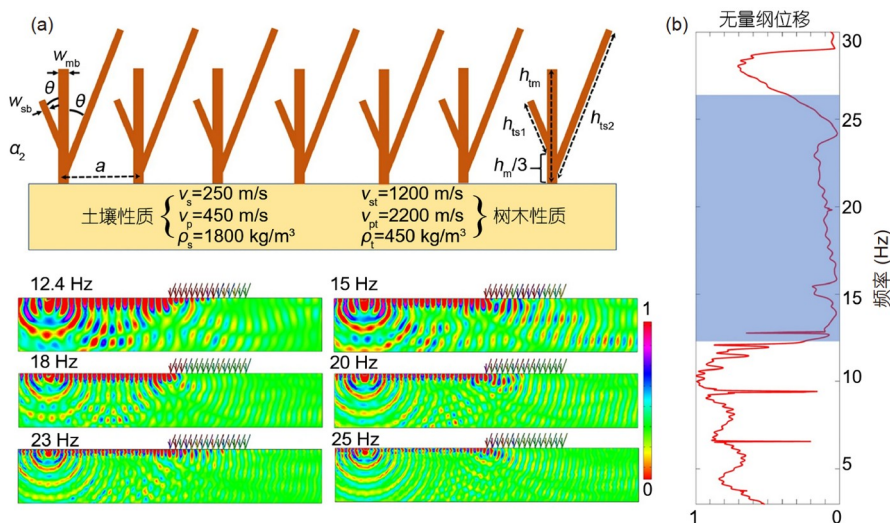


图3 (网络版彩色)一种周期性森林超材料^[54]. (a) 该结构的示意图以及土壤、树木的基本性质. (b) 系统的频率响应. (c) 不同频率下的位移场分布图,可见瑞利波在树木中被俘获且在深层地面转化为体波. Copyright © 2021, Springer Nature

Figure 3 (Color online) A periodic forest seismic metamaterial^[54]. (a) A schematic plot of this structure and the basic properties of soil and trees. (b) Frequency response of the system. (c) Displacement fields at different frequencies with observation of the trapped Rayleigh waves inside the trees and conversion of Rayleigh waves into bulk waves in deep ground. Copyright © 2021, Springer Nature

2.1 外部屏障型地震超材料

在垂直位置上, 外部屏障型地震超材料又可细分为地表面上和地下的人工结构, 前者的设计机理类似于森林超材料. 2016年, Colombi等人^[55]研究了一种位于地表外部的地震波屏障, 在此结构中, 局域共振单元的高度从左到右依次增加, 如图4所示. 他们^[56]首先研究了低频瑞利波从较低共振单元入射, 得到了类似声子中的“彩虹俘获”现象, 称此现象为“地震彩虹”(seismic rainbow). 不同的是, 当瑞利波从较高共振单元入射时, 表面瑞利波会转化为剪切波. Kacin等人^[57]提出了一种圆孔型三角形阵列组成的地震超材料, 该结构在25~36 Hz周围有两个低频禁带, 并能够将它们降低到8 Hz, 对衰减表面波非常有效. Xu等人^[58]通过在空心圆柱体内引入一种加号形状的结构, 改进了普通空心圆柱体结构的地震超材料. 研究表明, 这样的新型结构能产生3倍于普通结构的低频禁带. Hajjaj和Tu^[59]则将目光转向新型材料: 贫铀(depleted uranium). 贫铀具

有高密度、高熔点、较高的拉伸强度、低价格等特点. 通过将贫铀制成内部质量块加入钢制圆柱壳中, 能够减小相似系统中共振单元的尺寸而不影响其产生低频带隙. 这个发现为利用工业废料制造地震超材料提供了理论与实践依据.

2017年, Colquitt等人^[60]类比光学中的超表面, 提出了地震超表面(seismic metasurface)的概念. 他们研究了一组在薄弹性板或者弹性半空间上周期分布的杆状局域共振单元, 发现在这两种情况下, 由于禁带的存在, 表面的瑞利波和局域共振单元作用, 转化为体波. 之后, Wootton等人^[61]、Pu等人^[62]、Liu等人^[63]、Palermo等人^[64]都借鉴了这个概念, 设计出新型的结构来调控地震表面波. 总之, 这些位于地表外部的屏障型地震超材料的优势在于不受深层地质结构的影响, 仅受浅表层地面的约束, 设计施工简单. 但是, 其也有一定的缺陷, 例如, 在密集建筑群中会受实际城市规划的限制.

因此, 另一种嵌于地下型的地震超材料^[65]显示出其优势. 如图5(a)所示, Miniaci等人^[66]设计了一种地下巨型机械超材料作为地震保护屏障, 有很好的隔震效果. 通过有限元模拟进行频散分析以及全尺寸三维瞬态波传输分析, 他们发现, 不仅是地震表面波, 整体地震波都可以非常明显地衰减. 图5(b)中测试了两块区域, 一块受地震超材料保护, 另一块则会直接遭受地震波侵袭. 可以看到, 受保护区域鲜有能量分布, 而未受保护区域的能量则非常集中, 由此证明了嵌于地下型地震超材料的有效性.

2016年, Achaoui等人^[67]通过铁链或者橡胶链把铁球以立方体阵列连接到混凝土基体中, 使得每个铁球能在其与混凝土之间的空隙中进行弯曲或旋转移动. 最终, 他们通过设计6个优化形状的橡胶韧带连接直径为0.74 m的铁球与土壤, 实现了频率范围为8~49 Hz的弹性波阻尼, 为大型民用基础设施周围放置地震防护板的设计提供了初步方案. 秦凯强等人^[68]针对低频地震波的减震问题, 设计了周期性部分嵌于地下的工字形截面地震超屏障, 通过梯度或者分段梯度的优化设计, 拓宽了衰减域的频率范围, 实现了低频瑞利表面波的全覆盖, 频率范围为1.5~20 Hz. Mandal等人^[69]将木桩包围在土层中, 组成正方形阵列, 以研究单层土中周期排布的桩基础对地震表面波的调控效果, 优化了结构设计. 与此不同, Chen等人^[70]使用常规的建筑材料设计混凝土柱, 并通过实验考察了其组成的周期结构

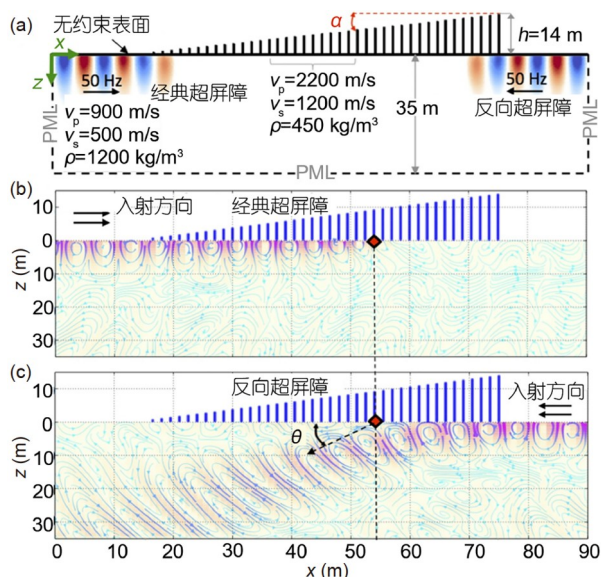


图4 (网络版彩色)一种位于地表外部的屏障型地震超材料^[55]. (a) 整体结构示意图、结构尺寸及基本参数, 局域共振单元的高度从左向右依次增加. (b) 瑞利波从低侧入射时整体系统的模式情况. (c) 瑞利波从高侧入射时整体系统的模式情况. Copyright © 2016, Springer Nature

Figure 4 (Color online) An outer-shielded seismic metamaterial on the ground^[55]. (a) A schematic plot of the whole structure with presentation of structural dimensions and basic parameters, where the heights of local resonance gradually increase from left to right. (b) Mode shape of the whole system with Rayleigh waves incident towards the shorter end. (c) Mode shape of the whole system with Rayleigh waves incident towards the taller end. Copyright © 2016, Springer Nature

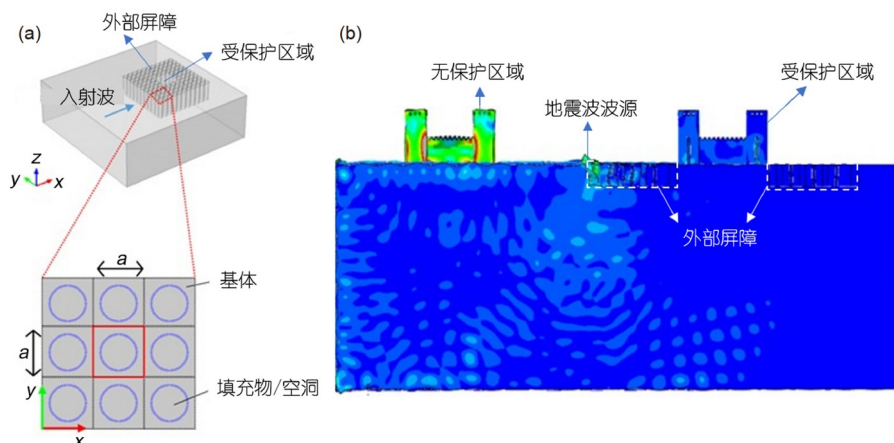


图5 (网络版彩色)一种嵌入地面外部的屏障型地震超材料^[66]. (a) 该结构的示意图以及局部放大图. (b) 受保护区域及无保护区域的归一化范式等效应力(Von Mises stress)场图. Copyright © 2016, IOP

Figure 5 (Color online) An outer-shielded seismic metamaterial embedded in the ground^[66]. (a) A schematic plot of this system and a local plot. (b) The normalized Von Mises stress field map for shielded and non-shielded structures. Copyright © 2016, IOP

在层状土中对地震波的调控效果. 他们发现, 该结构在 7.2 Hz 处能由于桩和周围土层之间的约束形成宽频禁带, 调整基础刚度能对其进行有效调控.

随着高铁系统的迅速发展, 设计师迫切需要减缓地面震动的解决方案. 因此, 受声子晶体的概念启发, Li 等人^[71]在 2020 年将地震超材料应用到轨道交通的地震控制. 基于有限元理论, 他们系统地分析了三维耦合的火车-轨道-土壤三者互相作用的模型, 用时域、频域分析法分析了嵌于地下型地震超材料对此系统的减震效果, 并进行了参数分析. 由此可见, 地震超材料不仅可以应用于工民建领域, 甚至还能对轨道交通、道路桥梁等领域的设计提供一些新的抗震设计思路.

2.2 超材料基础

相对于外部屏障型地震超材料, 超材料基础的优势在于不需要干扰结构周围的环境. 迄今为止, 不乏对超材料基础的报道^[72,73], 为建筑底部隔震提供了新思路. 2018 年, Cheng 和 Shi^[74]提出了一种新型的多维复合周期隔震基础, 通过创新排列周期结构并且利用周期结构的定向衰减特性, 设计出多维衰减域. 如图 6 所示, La Salandra 等人^[75]设计了一种三维超材料基础, 旨在减少工厂中储油罐的震动. 他们借助常见的混凝土与橡胶两种建筑材料研发了由 3 部分组成的周期基础单元, 并探究了基体材料中的裂纹对弹性波传播的影响. 最终, 通过谐波分析, 验证了这样一个超材料基础对隔震的有效性. 类似地, 2019 年, Basone 等人^[76]利用空心

钢型材以及混凝土板单元设计出一种局域共振型的超材料基础, 以减少由于地面运动引起的上部结构震动. 2020 年, Wenzel 等人^[77]利用声子晶体中常用的负刚度概念, 设计出一种周期性超材料基础. 值得注意的是, 非线性虽然经常在该类结构的理论模拟设计中被忽略, 但是在实际运用时却不可避免. 因此, 他们对该系统进行了频域中的非线性时程分析(nonlinear time history analysis), 发现器件的非线性效应会减少周期系统的禁带宽度. 2021 年, Sun 等人^[78]基于惯性放大机制(inertial amplification mechanism)设计了一种超材料基础, 以解决现有基础衰减机制的不足, 并通过频率响应分析研究其减震性能. 他们还对该机制与上部建筑组成的交互式系统进行了灵敏度分析和优化.

此外, 有研究将外部屏障型地震超材料及超材料基础两者相结合并进行对比^[79], 以达到更好的整体隔震效果. 上述两种方式也可以理解为基于表面波和体波的调控方式, 这是地震超材料中最常用的两种方式, 研究对象通常处于半空间内. 而当研究对象为薄板型结构或者壳体结构时, 弹性波的波长通常比板壳厚度大, 兰姆波在该类结构中便起主导作用^[15]. 2019 年, Muhammad 和 Lim^[80]研究了弹性波在一种新型薄板超材料中的传播情况, 并分析了共振单元为正方形、圆形、十字形 3 种情况结构的频散关系. Du 等人^[81]将周期性方形混凝土填充的钢桩埋入土壤, 设计出一种二维的弹性地震超材料, 证明了结构存在对兰姆波以及表面波的全禁带.

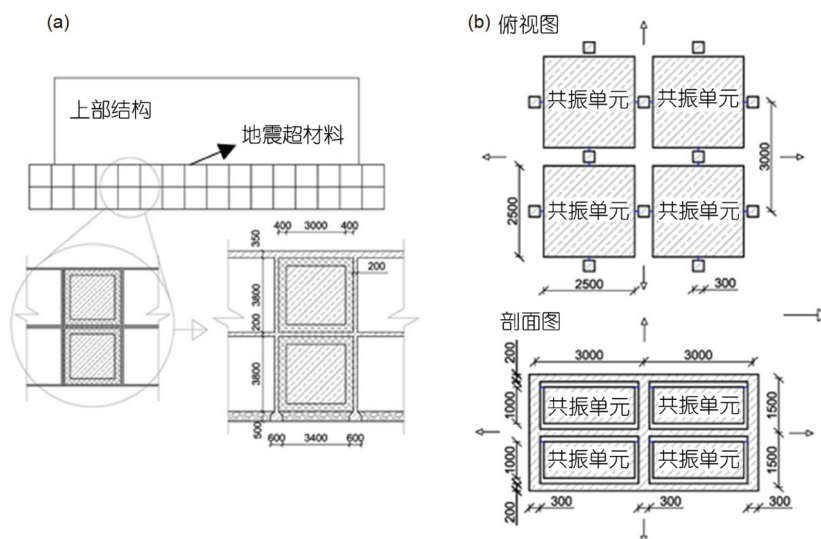


图6 静态系统中基于3D超材料概念设计出的基础(a), 以及该超材料基础优化后的俯视图和剖面图(b)^[75]. Copyright © 2017, Frontiers Media SA

Figure 6 Concept of a 3D metamaterial-based foundation for a static system (a) and top-section and cross-section of the optimized foundation (b)^[75]. Copyright © 2017, Frontiers Media SA

3 基于构造机制分类

类似于声子晶体, 地震超材料也可以按照禁带的形成机制进行分类, 即布拉格散射机制和局域共振机制. 因此, 上一节中所提及的结构也可以基于此进行分类, 但是本节着眼于由这两种机制导致的地震超材料之间的区别. 总体而言, 整体结构的周期性和单个组元的Mie散射共同作用, 导致了这两种禁带的产生. 区别在于: 对布拉格禁带, 结构的周期性起主导作用; 对局域共振禁带, 单个组元的共振效应起主要作用^[3,24,82].

3.1 布拉格散射机制

影响布拉格散射机制型声子晶体带隙的因素有很多, 主要分为组元的材料参数及结构参数两类^[3]. 对于地震超材料, 组元的材料参数包括地基土及填充物的密度、弹性模量等, 结构参数包括填充物占整体结构的填充率、填充物的形状、周期晶格的形式及晶格常数等. 因此, 地震超材料可以通过人为调控上述两类影响因素来改变工作频率.

2012年, Bao等人^[83]利用3个不同基础的7层框架进行动力学响应分析, 测试了一种新型周期性隔震基础. 2018年, Geng等人^[84]设计了一种一维分层地震超材料, 在周期方向内两种材料的组元交替排列, 能够在低频

范围内产生大的带隙, 且降低软材料的填充率可以进一步扩大带隙范围. 但是, 这样的超材料也有一些实际问题, 例如, 低频地震波的衰减会导致地震超材料的整体结构刚度较低; 较高的材料阻尼会导致波衰减的成因从能带原理转变为阻尼耗散等. 王维超等人^[85]设计了一种周期排布的十字空构型地震超屏障, 在20 Hz以下能产生范围为10 Hz的衰减域, 且能够有效地控制Oroville地震表面波. Witarto等人^[86]设计了一种三维周期性基础作为关键基础设施的隔震装置, 并分析了利用带隙设计基础相较于传统隔震系统的许多优越性. 他们通过实验证明了该三维周期基础可以将上部结构与地震波的任意分量分隔开. 2021年, Zhao等人^[87]对一种多层混凝土和橡胶层组成的周期性基础进行了振动台实验, 发现当激发的频率在周期基础的带隙范围内时, 结构的动态响应明显降低. 值得注意的是, 他们指出, 在此情况下, 周期性晶胞的数量对结构动力的影响很小. 相反, 更多的晶胞会增加基础的高度, 显然, 这在实际应用中不可取.

迄今为止, 不乏利用布拉格散射机制设计周期性基础的研究工作^[88-91]. 尽管基于布拉格散射机制设计的基础, 其晶格常数需要与地震波波长相当, 导致这类基础较大, 但是相较于局域共振型地震超材料, 布拉格散射型地震超材料所需要的周期晶格数更少, 经济适用性更强^[86].

3.2 局域共振机制

相较于布拉格散射型超材料,周期局域共振型超材料的带隙一般分为两部分^[40]:一是由周期性产生的布拉格散射型带隙;二是由单个组元的振动特性产生的局域共振型带隙.当外部激励的频率与局域共振单元的自振频率接近或者相等时,单元会发生共振,与结构中的弹性波长波相互作用,抑制其传播,以形成局域共振型带隙^[3].在此类超材料中,结构可以为周期的,也可以为半周期的^[92],其带隙频率主要取决于单个散射体的特性,为低频抗震提供了新思路^[4,93].地震超表面系统^[55-64,94-96]便是利用局域共振性质调控地震波,在前文已有介绍,本节将着眼于设计单个共振体内部性质的地震超材料.

2014年,Finocchio等人^[97]设计了一种等时地震超材料(isochronous seismic metamaterials)来抑制地震剪切波的传播.他们考察了局域共振型的质量弹簧系统下土壤的响应,发现该系统能够过滤与建筑物共振频率相近的地震波.之后,Xiao等人^[98]提出了一种有限局域共振超材料基础,通过频域及时域分析方法测试了周期性基础和上部结构所形成的耦合系统的减震效果.Zeng等人^[99]研究了一种基于俄罗斯套娃(matryoshka-like)结构的地震超材料,他们发现该结构能有效衰减地震表面波,且结构的整体带隙宽度取决于套娃的层数,因此可以利用这个性质对结构的工作频率进行调控.Zaccherini等人^[100]设计出一种多层深亚波长共振单元组成的超屏障,为异质基底的隔震提供新思路.2021年,Bursi等人^[101]开发了两种多自由度局域共振型超材料基础,并通过线性和非线性时程分析方法对该系统进行了优化.

虽然局域共振型禁带频率比较低,相较于布拉格散射型禁带,更适合工作区间在极低频范围内的地震超材料,但是由于类Fano现象的影响,弹性波在该带隙内有效衰减比较小^[3].因此,合理设计出低频且具有高衰减系数的结构尤为关键.

4 实验方式

地震超材料的滤波、隔震等特性具有重要的理论和应用价值.与其他土木工程实验一样^[102,103],地震超材料的实验方法主要分为缩尺实验(scale model experiment)和全尺寸实验.

4.1 缩尺实验

由于地震超材料具有实际场地复杂、体积庞大、成本昂贵等特点,因此缩尺实验成为许多研究工作的焦点.2016年,Palermo等人^[104]设计出一种超材料屏障.为了验证其在低频区域对地震波的衰减效果,他们首先使用了足尺有限元模拟预测,如图7(a)所示,证明了该系统在10 Hz以下的频率范围内能够减少50%的地面震动.由于该足尺有限元模型长225 m、高60 m,在实验中很难实现,于是他们进而设计了一个缩尺实验.如图7(b)所示,整个实验装置包括信号发生器、多普勒测振仪、示波器、计算机、实验台等.他们使用在地球物理实验中常用的聚合物树脂(polymer resin)实验台^[105]代表实际土壤,并在实验台上嵌入30个小型局域共振单元.这些共振单元由3部分组成:刚性铝管、软弹簧和约4 g的质量块.其中,软弹簧通过细的螺纹铝棒等效而成,质量块被包裹在铝管中.它们按三角形晶格排布成10行,晶格常数为1.7 cm.共振单元仅底部是封闭的,目的是在实验中可通过光学方法直接测量质量

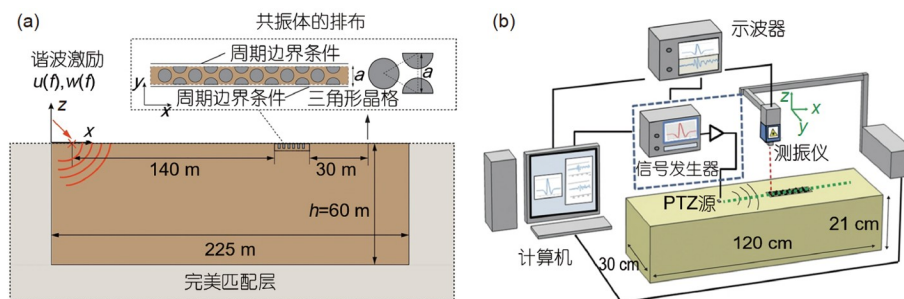


图7 (网络版彩色)针对超材料屏障的缩尺实验^[104]. (a) 由12行共振体组成的三维条形有限元模型. (b) 使用多普勒激光测振仪测量面外速度波场的实验设置. Copyright © 2016, Springer Nature

Figure 7 (Color online) A scaled experiment for metabarriers^[104]. (a) A three-dimensional stripe finite element model with 12 lines of resonators. (b) Experimental setup to measure the surface out-of-plane velocity wave field using a laser Doppler vibrometer. Copyright © 2016, Springer Nature

块的频率响应。值得注意的是,由于是缩尺实验,激发频率不能按照实际的地震波频率设定,因此,他们通过分析预测出该结构的带隙频率在11.5~16.4 kHz之间。这个频率对应足尺实验中的4.9~7.5 Hz,在此范围内,地震超材料对地震波的衰减起到了很大作用。

此外,还有一些典型的地震超材料缩尺实验^[100,106]。2019年,Zeng等人^[107]设计了常在地球物理实验中采用的1:30比例^[37]的缩尺实验,来验证板状地震超材料的滤波性。由于考察的表面波波长远大于沙颗粒,可忽略板与沙子的相互作用,故他们采用沙子填充玻璃箱以构造实验基板。Chen等人^[70]使用直径为7.7 cm的钢条组成5行3列的阵列,嵌入沙子中。为了减少波反射,他们将整体样品放在一个四边内侧布置了柔软垫子的钢制容器中。他们的实验为全尺寸实验提供了一些指导思想及优化方式。整体而言,缩尺实验为地震超材料从理论、模拟走向实践提供了可行性,但其也有一些未考虑的因素,例如由复杂土层引起的射线弯曲效应(ray bending effect)、结构完整性、波源的不确定性、土壤承载力、实际施工可行性等^[105]。

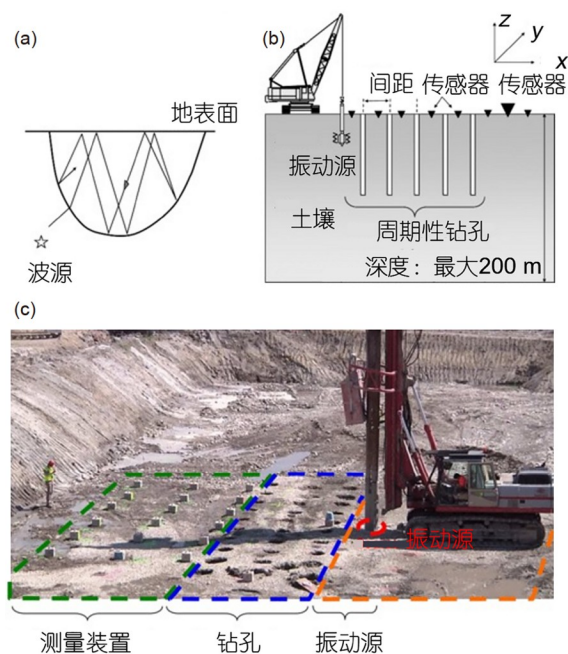


图8 (网络版彩色)针对地震超材料的全尺寸实验^[19]。(a)冲积盆地中的地震波。(b)实验示意图。(c)地震超材料实验照片。Copyright © 2014, American Physical Society
Figure 8 (Color online) A full-scale experiment for seismic metamaterials^[19]. (a) A seismic wave in an alluvium basin. (b) A sketch of the experiment. (c) Photograph of the seismic metamaterial experiment. Copyright © 2014, American Physical Society

4.2 全尺寸实验

如图8所示,Brûlé等人^[19]开发了第一个关于地震超材料的全尺寸实验,他们根据计算机模拟(图8(b))的结果在预设的场地上钻出3排平行的孔,每一排数量为10个,如图8(c)所示。这些圆孔直径为0.32 m、深为5 m、孔间距为1.73 m。波源的设定也是根据模拟而来,频率为50 Hz,侧向振幅为0.014 m。在圆孔的另一侧,布置了20个测量传感器,并进行了多次测量,最终证实了这样的布拉格散射型超材料屏障能够有效屏蔽50 Hz左右的弹性地震波。此后,地震超材料的全尺寸实验开始见诸报道^[21,108]。2021年,Huang等人^[109]设计了一个全尺寸实验来测试超材料屏障的隔震性能,对比了空沟以及周期屏障对波的屏蔽效益。他们使用预制的周期性混凝土屏障单元组成两种情形:(1)一个长度为2.44 m的长屏障和一个长度为1.22 m的短屏障;(2)两个长度为1.22 m的短屏障,目的在于测试单胞数量以及屏障长度对整体系统表现的影响。他们用最先进的三轴振动装置测试了空沟、长屏障等4组实验,记录了地面震动反馈,为全尺寸实验以及将地震超材料从理论、模拟变为实际提供了宝贵经验。

5 总结与展望

结构减震控制业已历经几十年的研究,传统结构的主动、被动、半主动、混合控制等隔震技术已经相对成熟,并能应用于各种土木工程结构设计、施工中。相较而言,地震超材料是在抗震领域新兴的一种减震技术,是一个新兴的领域。现有大部分的工作聚焦在理论预测以及软件模拟中,实际的全尺寸实验还太少,更鲜有进一步的工程实际案例。这就导致很多在应用层面上的问题很少被考虑。

(1) 土壤的自身性质。目前许多研究在进行理论、模拟工作时将土壤简化为一个各向同性的均质材料,以简单的杨氏模量、泊松比及密度等参数对其进行分析。这在实际应用中远远不够,仍需考虑例如是否是饱和/非饱和土、是否是单一/多种土壤以及土壤的非线性、各向异性、孔隙度、液化及塑性问题。

(2) 地质条件。许多研究将层状土壤简单分层甚至只考虑一层情况,而忽略了实际地质中其他影响土壤性质的因素,例如地下水位的影响、岩石层的位置、实际承载力、海拔情况等。

(3) 土壤-结构的动力相互作用。土壤与传统结构相

互作用的研究已经持续了几十年,但是在超材料屏障、超材料基础等新型结构的设计中,该作用很少被考虑。

(4) 地震波形式的多样性. 现阶段许多地震超材料的设计都是基于地震波的单一分量设计的,但是将P波、S波、勒夫波、瑞利波等都考虑进去的新型结构还比较少。

(5) 周围环境的影响. 现有的模拟及实验都是理想化的激励,即激励和建筑之间没有任何的干扰,但是城市建筑群中情况较复杂,例如周围的建筑或者桥梁地下铁路等对其有综合影响。更进一步,能够对整体区域进行保护的超材料屏障也亟待开发。

(6) 上层荷载的影响. 现有的超材料基础考虑的更多是对地震波的防护,但是对其上部荷载的承载力以及整体系统稳定性的研究较少。

除此之外,对于声子晶体/超材料的一些其他性质,例如负折射、超透性等在地震超材料方面的应用,还有待发掘,近年来兴起的深度学习等人工智能工具在地震超材料优化设计方面的研究也较少。事实上,许多工民建筑、桥梁隧道等都具有周期性,但未通过固体物理学中的理论加以应用及指导。总体而言,地震超材料由于其新颖性、可靠性以及适用性,具有很大的潜在研究价值,可进一步为建筑物隔震减灾扩展研究思路。

参考文献

- Brillouin L. Wave Propagation in Periodic Structures. New York: John Wiley, 1946
- Kushwaha M S, Halevi P, Dobrzynski L, et al. Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Phys Rev Lett*, 1993, 71: 2022–2025
- Wen X S, Wen J H, Yu D L, et al. Phononic Crystals (in Chinese). Beijing: National Defence Industry Press, 2009 [温熙森, 温激鸿, 郁殿龙, 等. 声子晶体. 北京: 国防工业出版社, 2009]
- Liu Z, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials. *Science*, 2000, 289: 1734–1736
- Walser R M. Electromagnetic metamaterials. In: Complex Mediums II: Beyond Linear Isotropic Dielectrics. International Society for Optics and Photonics, 2001. 1–15
- Li J, Chan C T. Double-negative acoustic metamaterial. *Phys Rev E*, 2004, 70: 055602
- Jin Y, Djafari-Rouhani B, Torrent D. Gradient index phononic crystals and metamaterials. *Nanophotonics*, 2019, 8: 685–701
- Vasileiadis T, Varghese J, Babacic V, et al. Progress and perspectives on phononic crystals. *J Appl Phys*, 2021, 129: 160901
- Zhou W, Wu B, Chen Z, et al. Actively controllable topological phase transition in homogeneous piezoelectric rod system. *J Mech Phys Solids*, 2020, 137: 103824
- Zhang X, Qu Z, Wang H. Engineering acoustic metamaterials for sound absorption: From uniform to gradient structures. *iScience*, 2020, 23: 101110
- Ma G, Sheng P. Acoustic metamaterials: From local resonances to broad horizons. *Sci Adv*, 2016, 2: e1501595
- Zhou W, Muhammad W, Chen W, et al. Actively controllable flexural wave band gaps in beam-type acoustic metamaterials with shunted piezoelectric patches. *Eur J Mech-A Solids*, 2019, 77: 103807
- Chen Z, Wang G, Zhou W, et al. Elastic foundation induced wide bandgaps for actively-tuned topologically protected wave propagation in phononic crystal beams. *Int J Mech Sci*, 2021, 194: 106215
- Chen Z, Zhou W, Lim C W. Tunable frequency response of topologically protected interface modes for membrane-type metamaterials via voltage control. *J Sound Vib*, 2021, 494: 115870
- Zhou W, Chen Z, Chen Y, et al. Mathematical modelling of phononic nanoplate and its size-dependent dispersion and topological properties. *Appl Math Model*, 2020, 88: 774–790
- Yang L, Yu K, Wu Y, et al. Topological spin-Hall edge states of flexural wave in perforated metamaterial plates. *J Phys D-Appl Phys*, 2018, 51: 325302
- Brûlé S, Enoch S, Guenneau S. Emergence of seismic metamaterials: Current state and future perspectives. *Phys Lett A*, 2020, 384: 126034
- Torres-Silva H, Cabezas D T. Chiral seismic attenuation with acoustic metamaterials. *J Electromagn Waves Appl*, 2013, 5: 10–15
- Brûlé S, Javelaud E, Enoch S, et al. Experiments on seismic metamaterials: Molding surface waves. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 133901
- Du Q, Zeng Y, Xu Y, et al. H-fractal seismic metamaterial with broadband low-frequency bandgaps. *J Phys D-Appl Phys*, 2018, 51: 105104
- Brûlé S, Javelaud E H, Enoch S, et al. Flat lens effect on seismic waves propagation in the subsoil. *Sci Rep*, 2017, 7: 18066
- Shi N N, Kang Z K, Shao W A, et al. Principle and research progress of seismic metamaterials (in Chinese). *J Funct Mater*, 2019, 50: 09019–09026 [石南南, 亢志宽, 邵伟昂, 等. 地震超材料的应用与研究进展. 功能材料, 2019, 50: 09019–09026]
- Brûlé S, Enoch S, Guenneau S. Role of nanophotonics in the birth of seismic megastructures. *Nanophotonics*, 2019, 8: 1591–1605

- 24 Mu D, Shu H, Zhao L, et al. A review of research on seismic metamaterials. *Adv Eng Mater*, 2020, 22: 1901148
- 25 Muhammad, Lim C W. From photonic crystals to seismic metamaterials: A review via phononic crystals and acoustic metamaterials. *Arch Comput Method Eng*, 2021, doi: 10.1007/s11831-021-09612-8
- 26 Achaoui Y, Antonakakis T, Brûlé S, et al. Clamped seismic metamaterials: Ultra-low frequency stop bands. *New J Phys*, 2017, 19: 063022
- 27 Lee D, Oh J H, Kang I S, et al. Seismic phononic crystals by elastodynamic Navier equation. *Phys Rev E*, 2019, 100: 063002
- 28 Casablanca O, Ventura G, Garesci F, et al. Seismic isolation of buildings using composite foundations based on metamaterials. *J Appl Phys*, 2018, 123: 174903
- 29 Ungureanu B, Achaoui Y, Enoch S, et al. Auxetic-like metamaterials as novel earthquake protections. *EPJ Appl Metamater*, 2015, 2: 17
- 30 Brûlé S, Ungureanu B, Achaoui Y, et al. Metamaterial-like transformed urbanism. *Innov Infrastruct Solut*, 2017, 2: 1–11
- 31 Feng Z, Wu B H, Zhao Y X, et al. Invisibility cloak printed on a photonic chip. *Sci Rep*, 2016, 6: 28527
- 32 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. *Phys Rev Lett*, 1987, 58: 2059–2062
- 33 Muhammad, Lim C W, Reddy J N. Built-up structural steel sections as seismic metamaterials for surface wave attenuation with low frequency wide bandgap in layered soil medium. *Eng Struct*, 2019, 188: 440–451
- 34 Zhang K, Luo J, Hong F, et al. Seismic metamaterials with cross-like and square steel sections for low-frequency wide band gaps. *Eng Struct*, 2021, 232: 111870
- 35 Tsakmakidis K L, Boardman A D, Hess O. ‘Trapped rainbow’ storage of light in metamaterials. *Nature*, 2007, 450: 397–401
- 36 Zhao X P, Luo W, Huang J X, et al. Trapped rainbow effect in visible light left-handed heterostructures. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 071111
- 37 Krödel S, Thomé N, Daraio C. Wide band-gap seismic metastructures. *Extreme Mech Lett*, 2015, 4: 111–117
- 38 Palermo A, Vitali M, Marzani A. Metabarriers with multi-mass locally resonating units for broad band Rayleigh waves attenuation. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2018, 113: 265–277
- 39 Muhammad, Lim C W, Li J T H, et al. Lightweight architected lattice phononic crystals with broadband and multiband vibration mitigation characteristics. *Extreme Mech Lett*, 2020, 41: 100994
- 40 Chen Z, Zhou W, Lim C W. Active control for acoustic wave propagation in nonlinear diatomic acoustic metamaterials. *Int J Non-Linear Mech*, 2020, 125: 103535
- 41 Pu X, Shi Z. Surface-wave attenuation by periodic pile barriers in layered soils. *Constr Build Mater*, 2018, 180: 177–187
- 42 Lu L Y, Lin G L. Improvement of near-fault seismic isolation using a resettable variable stiffness damper. *Eng Struct*, 2009, 31: 2097–2114
- 43 Lu L Y, Lin T K, Yeh S W. Experiment and analysis of a leverage-type stiffness-controllable isolation system for seismic engineering. *Earthq Eng Struct Dyn*, 2010, 39: 1711–1736
- 44 Tsang H H. Seismic isolation by rubber-soil mixtures for developing countries. *Earthq Eng Struct Dyn*, 2008, 37: 283–303
- 45 D’Alessandro L, Zega V, Ardito R, et al. 3D auxetic single material periodic structure with ultra-wide tunable bandgap. *Sci Rep*, 2018, 8: 2262
- 46 Liu X N, Hu G K, Huang G L, et al. An elastic metamaterial with simultaneously negative mass density and bulk modulus. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 251907
- 47 Sridhar A, Liu L, Kouznetsova V G, et al. Homogenized enriched continuum analysis of acoustic metamaterials with negative stiffness and double negative effects. *J Mech Phys Solids*, 2018, 119: 104–117
- 48 Neil T R, Shen Z, Robert D, et al. Moth wings are acoustic metamaterials. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, 117: 31134–31141
- 49 Huang L, Duan Y, Dai X, et al. Bioinspired metamaterials: Multibands electromagnetic wave adaptability and hydrophobic characteristics. *Small*, 2019, 15: 1902730
- 50 Colombi A, Roux P, Guenneau S, et al. Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances. *Sci Rep*, 2016, 6: 19238
- 51 Lata T D, Deymier P A, Runge K, et al. Topological acoustic sensing of spatial patterns of trees in a model forest landscape. *Ecol Model*, 2020, 419: 108964
- 52 Liu Y, Huang J, Li Y, et al. Trees as large-scale natural metamaterials for low-frequency vibration reduction. *Constr Build Mater*, 2019, 199: 737–745
- 53 Muhammad, Wu T, Lim C W. Forest trees as naturally available seismic metamaterials: Low frequency Rayleigh wave with extremely wide bandgaps. *Int J Struct Stab Dyn*, 2020, 20: 2043014
- 54 Muhammad, Lim C W. Natural seismic metamaterials: The role of tree branches in the birth of Rayleigh wave bandgap for ground born vibration attenuation. *Trees-Struct Funct*, 2021, 35: 1299–1315
- 55 Colombi A, Colquitt D, Roux P, et al. A seismic metamaterial: The resonant metawedge. *Sci Rep*, 2016, 6: 27717
- 56 Zhu J, Chen Y, Zhu X, et al. Acoustic rainbow trapping. *Sci Rep*, 2013, 3: 1728
- 57 Kacin S, Ozturk M, Sevim U K, et al. Seismic metamaterials for low-frequency mechanical wave attenuation. *Nat Hazards*, 2021, 107: 213–229
- 58 Xu R, Muzamil M, Fan L, et al. Broadband seismic metamaterial with an improved cylinder by introducing plus-shaped structure. *Europhys Lett*,

- 2021, 133: 37001
- 59 Hajjaj M M, Tu J. A seismic metamaterial concept with very short resonators using depleted uranium. *Arch Appl Mech*, 2021, 91: 2279–2300
- 60 Colquitt D J, Colombi A, Craster R V, et al. Seismic metasurfaces: Sub-wavelength resonators and Rayleigh wave interaction. *J Mech Phys Solids*, 2017, 99: 379–393
- 61 Wootton P, Kaplunov J, Colquitt D. An asymptotic hyperbolic-elliptic model for flexural-seismic metasurfaces. *Proc R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 2019, 475: 20190079
- 62 Pu X, Palermo A, Cheng Z, et al. Seismic metasurfaces on porous layered media: Surface resonators and fluid-solid interaction effects on the propagation of Rayleigh waves. *Int J Eng Sci*, 2020, 154: 103347
- 63 Liu W, Yoon G H, Yi B, et al. Ultra-wide band gap metasurfaces for controlling seismic surface waves. *Extreme Mech Lett*, 2020, 41: 101018
- 64 Palermo A, Krödel S, Matlack K, et al. Large scale metasurfaces for seismic waves control. *J Acoust Soc Am*, 2018, 143: 1713
- 65 Meng L, Cheng Z, Shi Z. Vibration mitigation in saturated soil by periodic in-filled pipe pile barriers. *Comput Geotech*, 2020, 124: 103633
- 66 Miniaci M, Krushynska A, Bosia F, et al. Large scale mechanical metamaterials as seismic shields. *New J Phys*, 2016, 18: 083041
- 67 Achaoui Y, Ungureanu B, Enoch S, et al. Seismic waves damping with arrays of inertial resonators. *Extreme Mech Lett*, 2016, 8: 30–37
- 68 Qin K Q, Liu Z, Yu G L. Partially embedded barrier for broad band attenuation of surface waves in low frequencies (in Chinese). *Earthq Eng Struct Dyn*, 2020, 40: 187–194 [秦凯强, 刘泽, 于桂兰. 具有低频超宽衰减域的部分埋入式表面波屏障. *地震工程与工程振动*, 2020, 40: 187–194]
- 69 Mandal P, Somala S N. Periodic pile-soil system as a barrier for seismic surface waves. *SN Appl Sci*, 2020, 2: 1184
- 70 Chen Y, Qian F, Scarpa F, et al. Harnessing multi-layered soil to design seismic metamaterials with ultralow frequency band gaps. *Mater Des*, 2019, 175: 107813
- 71 Li T, Su Q, Kaewunruen S. Seismic metamaterial barriers for ground vibration mitigation in railways considering the train-track-soil dynamic interactions. *Constr Build Mater*, 2020, 260: 119936
- 72 Cheng Z, Shi Z, Palermo A, et al. Seismic vibrations attenuation via damped layered periodic foundations. *Eng Struct*, 2020, 211: 110427
- 73 Tsang H H, Tran D P, Hung W Y, et al. Performance of geotechnical seismic isolation system using rubber-soil mixtures in centrifuge testing. *Earthq Eng Struct Dyn*, 2021, 50: 1271–1289
- 74 Cheng Z B, Shi Z F. Composite periodic foundation and its application for seismic isolation. *Earthq Eng Struct Dyn*, 2018, 47: 925–944
- 75 La Salandra V, Wenzel M, Bursi O S, et al. Conception of a 3D metamaterial-based foundation for static and seismic protection of fuel storage tanks. *Front Mater*, 2017, 4: 30
- 76 Basone F, Wenzel M, Bursi O S, et al. Finite locally resonant metafoundations for the seismic protection of fuel storage tanks. *Earthq Eng Struct Dyn*, 2019, 48: 232–252
- 77 Wenzel M, Bursi O S, Antoniadis I. Optimal finite locally resonant metafoundations enhanced with nonlinear negative stiffness elements for seismic protection of large storage tanks. *J Sound Vib*, 2020, 483: 115488
- 78 Sun F, Dai X, Liu Y, et al. Seismic mitigation performance of periodic foundations with inertial amplification mechanism considering superstructure-foundation interaction. *Smart Mater Struct*, 2021, 30: 025018
- 79 Colombi A, Zaccherini R, Aguzzi G, et al. Mitigation of seismic waves: Metabarriers and metafoundations bench tested. *J Sound Vib*, 2020, 485: 115537
- 80 Muhammad, Lim C W. Elastic waves propagation in thin plate metamaterials and evidence of low frequency pseudo and local resonance bandgaps. *Phys Lett A*, 2019, 383: 2789–2796
- 81 Du Q, Zeng Y, Huang G, et al. Elastic metamaterial-based seismic shield for both Lamb and surface waves. *AIP Adv*, 2017, 7: 075015
- 82 Romero-Garcia V, Hladky-Hennion A C. Fundamentals and Applications of Acoustic Metamaterials: From Seismic to Radio Frequency. London: John Wiley & Sons, 2019
- 83 Bao J, Shi Z, Xiang H. Dynamic responses of a structure with periodic foundations. *J Eng Mech*, 2012, 138: 761–769
- 84 Geng Q, Zhu S, Chong K P. Issues in design of one-dimensional metamaterials for seismic protection. *Soil Dyn Earthq Eng*, 2018, 107: 264–278
- 85 Wang W C, Liu Z, Yu G L. Periodic barriers with cruciform trenches for seismic surface waves (in Chinese). *Eng Mech*, 2019, 36: 144–148 [王维超, 刘泽, 于桂兰. 周期十字空沟地震表面波屏障. *工程力学*, 2019, 36: 144–148]
- 86 Witarto W, Wang S J, Yang C Y, et al. Three-dimensional periodic materials as seismic base isolator for nuclear infrastructure. *AIP Adv*, 2019, 9: 045014
- 87 Zhao C, Zeng C, Huang H, et al. Preliminary study on the periodic base isolation effectiveness and experimental validation. *Eng Struct*, 2021, 226: 111364
- 88 Huang H W, Wang J, Zhao C, et al. Two-dimensional finite-element simulation of periodic barriers. *J Eng Mech*, 2021, 147: 04020150
- 89 Meseguer F, Holgado M, Caballero D, et al. Rayleigh-wave attenuation by a semi-infinite two-dimensional elastic-band-gap crystal. *Phys Rev B*, 1999, 59: 12169–12172

- 90 Pu X, Meng Q, Shi Z. Experimental studies on surface-wave isolation by periodic wave barriers. [Soil Dyn Earthq Eng](#), 2020, 130: 106000
- 91 Liu Z, Dong H W, Yu G L. Topology optimization of periodic barriers for surface waves. [Struct Multidisc Optim](#), 2021, 63: 463–478
- 92 Wu X, Li Y, Zuo S. The study of a locally resonant beam with aperiodic mass distribution. [Appl Acoust](#), 2020, 165: 107306
- 93 Varma T V, Ungureanu B, Sarkar S, et al. The influence of clamping, structure geometry, and material on seismic metamaterial performance. [Front Mater](#), 2021, 8: 106
- 94 Zeng Y, Xu Y, Deng K, et al. Low-frequency broadband seismic metamaterial using I-shaped pillars in a half-space. [J Appl Phys](#), 2018, 123: 214901
- 95 Xu Y, Xu R, Peng P, et al. Broadband H-shaped seismic metamaterial with a rubber coating. [Europhys Lett](#), 2019, 127: 17002
- 96 Cai R, Jin Y, Rabczuk T, et al. Propagation and attenuation of Rayleigh and pseudo surface waves in viscoelastic metamaterials. [J Appl Phys](#), 2021, 129: 124903
- 97 Finocchio G, Casablanca O, Ricciardi G, et al. Seismic metamaterials based on isochronous mechanical oscillators. [Appl Phys Lett](#), 2014, 104: 191903
- 98 Xiao L, Sun F, Bursi O S. Vibration attenuation and amplification of one-dimensional uncoupled and coupled systems with optimal metafoundations. [J Eng Mech](#), 2020, 146: 04020058
- 99 Zeng Y, Xu Y, Yang H, et al. A Matryoshka-like seismic metamaterial with wide band-gap characteristics. [Int J Solids Struct](#), 2020, 185–186: 334–341
- 100 Zaccherini R, Palermo A, Marzani A, et al. Mitigation of Rayleigh-like waves in granular media via multi-layer resonant metabarriers. [Appl Phys Lett](#), 2020, 117: 254103
- 101 Bursi O S, Basone F, Wenzel M. Stochastic analysis of locally resonant linear and hysteretic metamaterials for seismic isolation of process equipment. [J Sound Vibr](#), 2021, 510: 116263
- 102 Li J C, Hu S Y, Li Q S. Comparative study of full-scale and model-scale wind pressure measurements on a gable roof low-rise building. [J Wind Eng Ind Aerodyn](#), 2021, 208: 104448
- 103 Lirola J M, Castañeda E, Lauret B, et al. A review on experimental research using scale models for buildings: Application and methodologies. [Energy Build](#), 2017, 142: 72–110
- 104 Palermo A, Krödel S, Marzani A, et al. Engineered metabarrier as shield from seismic surface waves. [Sci Rep](#), 2016, 6: 39356
- 105 Bretaudeau F, Leparoux D, Durand O, et al. Small-scale modeling of onshore seismic experiment: A tool to validate numerical modeling and seismic imaging methods. [Geophysics](#), 2011, 76: T101–T112
- 106 Huang J, Shi Z, Huang W, et al. A periodic foundation with rotational oscillators for extremely low-frequency seismic isolation: Analysis and experimental verification. [Smart Mater Struct](#), 2017, 26: 035061
- 107 Zeng Y, Xu Y, Deng K, et al. A broadband seismic metamaterial plate with simple structure and easy realization. [J Appl Phys](#), 2019, 125: 224901
- 108 Brûlé S, Guenneau S. Past, present and future of seismic metamaterials: Experiments on soil dynamics, cloaking, large scale analogue computer and space-time modulations. [C R Phys](#), 2020, 21: 767–785
- 109 Huang H W, Zhang B, Wang J, et al. Experimental study on wave isolation performance of periodic barriers. [Soil Dyn Earthq Eng](#), 2021, 144: 106602

Summary for “地震超材料: 从自然结构到新型人工结构”

A review on seismic metamaterials: From natural to artificial structures

Zhenyu Chen^{1,2*}, C. W. Lim^{1,2*} & Fan Shi³

¹ City University of Hong Kong Shenzhen Research Institute, Shenzhen 518057, China;

² Department of Architecture and Civil Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong, China;

³ Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China

* Corresponding authors, E-mail: zhenychen8-c@my.cityu.edu.hk; bccwlim@cityu.edu.hk

In the recent three decades, the breath-taking discoveries of phononic crystals in conjunction with research advances in acoustic metamaterials have far-reaching implications in many science and engineering branches. These new discoveries can be traced to the fundamentals of wave manipulation and wave attenuation, etc., within a very wide frequency spectrum from ultrahigh electromagnetic wave frequency to very low seismic frequency ranges. Inspired by electromagnetic and photonic crystals, these newly designed artificial structures are able to control acoustic/elastic waves at relatively low frequency ranges. In periodic systems, Bloch waves are formed by reflection, refraction and scattering of De Broglie, electromagnetic/light and acoustic/elastic waves. These waves contain marvelous band structures which allow transmission or lead to attenuation. Frequency domains for transmission and attenuation correspond to passbands and stopbands, respectively. There exist many studies that materialize the idea of designing metadevices at will by utilizing wave band behaviors. Generally, the mechanism for forming stopbands contains two parts, i.e., Bragg scattering and local resonance, that can also be used to identify phononic crystals and acoustic metamaterials. Especially, a Bragg scattering type metamaterial prohibits waves with a wavelength of the same order as the lattice constant from propagating through the structure. It results in a large-scale structural dimension for a low frequency bandgap. Comparatively, local resonance type metamaterials allow the generation of bandgaps at low frequency ranges with relatively small dimensions as their properties rely primarily on the local resonance.

The study of seismic wave propagation in civil engineering has been reinvigorated due to the new, exciting concept of seismic metamaterials. The spectacular designs provide new approaches to control seismic surface (Rayleigh and Love) and bulk (pressure and shear) waves for civil and structural engineers. This review traces the state-of-the-art developments of seismic metamaterials and establishes a link between photonic crystals at nano/micro scale and seismic metamaterials at macro scale. We present a survey of more recent developments in seismic metamaterials in terms of geometry, physics (i.e., the mechanism for forming stopbands) and experimental approaches which range from natural sources to artificial structures. A variety of mathematical and physics tools can be extended from photonic crystals to seismic megastructures, such as effective media theory, Brillouin zone, reciprocal space, rainbow trapping, etc. The development of finite element methods provides the possibility to simulate and analyze these complex artificial designs numerically. A school of forest trees as natural seismic metamaterials is a focal point in this review, which enables attenuation of seismic waves using natural resources and also inspires the discovery of seismic metasurfaces. For artificial structures, designs are generally made based on locations (i.e., metabarriers and metafoundations) or mechanisms (i.e., Bragg scattering and local resonance mechanism). Some metamaterial-like transformed urbanism or cities are also verified to work as seismic shielding or cloaking. Further, similar to experimental methods in other disciplines, scale model experiments and full-scale experiments have been explored to validate the efficiency of seismic metamaterials in wave attenuation. Although research in phononic crystals is moving towards extreme frontiers, metastructures working at low frequencies with stability, high bearing capacity, high ductility, wide bandgap and efficient attenuation zones remain substantial challenges. Besides soil-structure interactions, the combination of various components of seismic waves, ground conditions, soil properties, effects of groundwater table, structural nonlinearity or other ineluctable factors is yet to be fully considered. Ultimately, the emergence of seismic metamaterials broadens the horizons for seismic isolation and seismic vibration control. This review will help future researchers witness the continuous development of seismic metamaterials and comprehend the current challenges in this promising, potential and exciting research.

seismic protection, seismic metamaterial, band structure, elastic wave

doi: [10.1360/TB-2021-0517](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0517)