超材料混凝土抗冲击效应数值研究

靳贺欣^{1,2}, 陈文苏², 郝洪^{2*}, 郝逸飞¹

1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350;

2. Centre for Infrastructural Monitoring and Protection, School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University, Perth 6000, Australia

*联系人, E-mail: hong.hao@curtin.edu.au

收稿日期: 2019-05-23; 接受日期: 2019-07-08; 网络出版日期: 2019-10-10

摘要 作为一种广泛应用的工程材料, 混凝土材料抗拉强度低的缺点限制了其应用. 当高速冲击荷载作用在混凝土结构上时, 由于混凝土的脆性和较低的抗拉强度, 结构后部的混凝土通常会产生严重的层裂破坏. 因此, 有效降低混凝土的层裂破坏对于提高结构性能很重要. 近些年学者提出了局域共振超材料, 它利用人造微结构的存在能使该超材料呈现出天然材料所不具备的超常物理性质. 本文借鉴局域共振超材料的工作原理, 通过将混凝土中的部分天然骨料替换为人工骨料超材料来降低冲击荷载下的层裂破坏. 通过LS-DYNA, 建立考虑随机分布的砂浆、天然骨料和人工骨料的超材料混凝土三维细观模型来进行层裂实验的数值模拟. 研究超材料混凝土在冲击荷载作用下的材料性能以及人工骨料的材料属性和几何属性对超材料混凝土动态性能的影响.

关键词 超材料混凝土, 人工骨料, 细观模型, 层裂破坏

PACS: 47.27.ek, 43.28.Mw, 28.41.Te, 28.41.Qb

1 引言

“超材料”是具有人工设计的微结构并呈现出构成该超材料的天然材料所不具备的超常物理性质的复合材料的总称. 超材料的概念首先是在电磁学领域提出来的^[1]. 当电磁波在电磁超材料中传播时, 某些频率范围内的电磁波会被材料所吸收, 这些频率范围被称为带隙^[2,3]. 由于声波、弹性波和电磁波之间的数学相似性, 一些研究人员试图寻找与电磁超材料具有相似带隙性质的声学或弹性超材料^[4-7]. Liu等人^[8]通过将涂有硅橡胶的铅球嵌入环氧树脂基体中, 制作出了局域共振超材料. 当弹性波在局域共振超材料中传播时,

包裹有橡胶层的铅球在其固有频率附近产生共振, 通过共振作用储存外荷载施加在局域共振超材料上的能量, 进而产生带隙.

局域共振超材料新颖的材料性能引起了土木工程研究人员的兴趣. 到目前为止, 研究人员从理论方面和实验方面分别验证了应用局域共振超材料进行结构抗震的可能性. 与传统技术不同, 通过使用局域共振超材料作为结构基础, 可以有效地削弱地震等弱动态荷载对结构造成的破坏. Xiang等人^[9], Hussein等人^[10], Pollicarpo等人^[11], Krödel等人^[12]和Dertimanis等人^[13]研究了运用局域共振超材料制作的结构基础对地震的削弱作用. Yan等人^[14]建立了一个缩尺的局域共振超材料

引用格式: 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: 024609

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: 024609, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0183

结构基础, 通过监测基础上部的建筑物的震动发现, 局域共振超材料基础可有效地减少地震对建筑物的影响.

由于越来越多的意外爆炸冲击和对人造设施的恐袭爆炸事件, 保护结构免受爆炸和冲击荷载的破坏越来越受到关注. 爆炸冲击强动载是一种与静态和弱动态荷载(例如地震)完全不同的荷载. 当结构受到爆炸冲击载荷作用, 其结构响应和材料行为通常是非线性的, 会导致复杂的应力状态. 混凝土材料在加载点附近将承受高应变率和高静水压力. 爆炸和冲击荷载引起的压缩应力波在结构后部反射后将变为拉伸应力波在结构中传播. 由于混凝土的脆性和较低的抗拉强度, 结构后部的混凝土可能会产生严重的层裂破坏. 现阶段防爆抗爆的主要手段包括利用障碍物改变爆炸波的传播和分布、对建筑物进行加固以提高建筑物的整体抗爆水平和利用外挂非结构构件的破坏吸收爆炸能量等^[15,16].

借鉴局域共振超材料的带隙特性, 研究人员将包裹有弹性层的金属球等人工骨料按照一定规律填充到混凝土中, 制作成了一种新型混凝土: 超材料混凝土. 该混凝土在动态荷载作用下会表现出明显的带隙特性. 研究人员对利用超材料混凝土进行抗爆抗冲击进行了研究. Tan 等人^[17]运用有限元模拟的方法研究了超材料混凝土对爆炸荷载的削弱作用. 在该研究中, Tan 等人^[17]考虑了两种人工骨料设计(含有单层重芯的人工骨料和含有多层硬芯的人工骨料). 结果显示, 超材料混凝土对爆炸荷载起到了很好的衰减作用, 具有多层重芯的人工骨料构成的超材料混凝土比由单层重芯的人工骨料构成的超材料混凝土能更有效地削弱爆炸荷载. Mitchell 等人^[18-20]研究发现, 当爆炸荷载作用在超材料混凝土上产生的应力波在这种材料中传播时, 铅球能够有效地吸收由爆炸荷载施加在材料上的能量, 从而相应提高砂浆基体的抵抗爆炸荷载的能力. Kettenbeil 和 Ravichandran^[21]基于 Mitchell 等人的研究, 应用板冲击实验技术对超材料混凝土试件施加了具有大量高频成分的应力波. 试验结果表明, 超材料混凝土能有效降低砂浆中的最大应变, 提高砂浆抗爆炸或冲击的能力.

本文借鉴局域共振超材料的工作原理, 以由砂浆、天然骨料和人工骨料组成的超材料混凝土为研究对象, 考虑天然骨料和人工骨料在超材料混凝土中的

随机分布, 建立超材料混凝土三维细观模型. 通过数值模拟的方法模拟超材料混凝土层裂实验, 研究超材料混凝土在冲击、爆炸等荷载作用下的动态响应. 通过参数分析, 研究人工骨料的材料属性和几何属性对超材料混凝土动态性能的影响.

2 超材料混凝土基本单元的负等效质量

利用等效质量来描述超材料混凝土的力学特性. 在超材料混凝土中, 取基本单元为研究对象, 如图1所示. 图中所示的基本单元为边长为 h 的立方体, 单元中金属球半径为 R_1 , 弹性层厚度为 t . 为简化计算, 将三维超材料混凝土基本单元简化为图2所示的二维模型, 假设铅球质量为 m , 砂浆质量为 M , 聚氨酯弹性层简化为刚度系数为 k (用于连接铅球和砂浆)的弹簧, 在简化过程中忽略聚氨酯弹性层的质量.

当单元处于静态, 或在荷载作用下 m 与 M 运动和谐时, 基本单元的等效质量 $m_{\text{eff},1}$ 可表示为

$$m_{\text{eff},1} = M + m. \quad (1)$$

在外荷载作用下, 当 m 与 M 运动失谐时, 基本单元的等效质量与外荷载的频率相关, 如式(2)所示. 通过对式(2)进行变换可知, 当 $1 < \omega / \omega_0 < \sqrt{(M+m)/M}$ 时

图1 (网络版彩图)超材料混凝土基本单元示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of unit cell of metaconcrete.

图2 超材料混凝土基本单元二维模型

Figure 2 Two-dimensional model of unit cell of metaconcrete.

$m_{\text{eff},2}/m_{\text{eff},1} < 0$. 假设 m 与 M 相等, $1 < \omega/\omega_0 < \sqrt{2}$, $m_{\text{eff},2}/m_{\text{eff},1}$ 与 ω/ω_0 的关系如图3所示^[18,22].

$$m_{\text{eff},2} = m_{\text{eff},1} + \frac{m(\omega/\omega_0)^2}{1 - (\omega/\omega_0)^2}, \quad (2)$$

其中, ω_0 是金属球的固有频率且 $\omega_0^2 = k/m$, ω 是外荷载的频率.

超材料混凝土基本单元的共振频率与基本单元的材料属性和几何属性之间存在以下关系:

$$R_1 t = \frac{3E_s}{2\rho_1 \omega_0^2}, \quad (3)$$

其中, ρ_1 为金属球密度, E_s 为弹性层的弹性模量, 金属球半径为 R_1 , 弹性层厚度为 t . 在已知外荷载频率的情况下, 式(3)可用于设计超材料混凝土的基本单元.

3 超材料混凝土细观模型

3.1 随机骨料的建立

用MATLAB软件编写三步骤程序用于生成超材料混凝土细观模型: (1) 生成随机位置和大小骨料几何空间; (2) 通过对混凝土有限元模型的LS-DYNA关键字文件进行操作生成骨料和砂浆的有限元模型; (3) 通过对第(2)步生成的LS-DYNA关键字文件进行操作, 按照设计将符合尺寸要求的骨料改为金属球和聚氨酯弹性层.

本文假定骨料为球体, 不同大小的球体随机分布于混凝土有限元模型中. 骨料的大小服从富勒曲线.

图3 (网络版彩图)等效质量与外荷载频率之间的关系

Figure 3 (Color online) Relationship between effective mass and load frequency.

富勒曲线的公式为

$$p(d) = 100 \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^n, \quad (4)$$

其中, $p(d)$ 是指直径小于 d 的骨料的累计百分数; $d_{\max}$ 是最大骨料粒径; n 是指数系数, 取值范围通常在 0.45–0.7 之间, 这里取值为 0.5.

3.2 数值模型

本文的超材料混凝土细观模型是基于Chen等人^[23]对混凝土层裂实验的数值模拟建立. 模型为直径 74 mm、长 500 mm 的圆柱体, 模型中骨料的体积分率为 35%, 骨料粒径为 4–16 mm, 骨料分为 3 级, 即 4–8, 8–12, 12–16 mm. 基于Chen等人^[23]的模型, 通过将部分 12–16 mm 的骨料替换为人工骨料建立超材料混凝土模型. 一般认为混凝土骨料与砂浆之间的界面(Interfacial Transition Zone, ITZ)是混凝土内最薄弱的区域, 对混凝土的性能起重要影响. 然而, ITZ 的厚度在 10–50 μm 之间, 模拟如此小的厚度会引起模型单元数量巨大, 时间步长过长, 造成计算效率很低. 另一方面, ITZ 区域的材料属性和其在骨料与砂浆间起的作用尚未研究清楚, 因此在数值模拟中很难准确定义 ITZ. 同时, 本文侧重于人工骨料的存在对于应力波消减的影响. 因此, 本文的模型并没有考虑 ITZ. 图4为建立的超材料混凝土三维细观模型. 选取铅为金属球材料, 铅球直径为 8–12 mm, 选取聚氨酯为弹性层材料, 聚氨酯弹性层厚度为 2 mm. 利用式(3)确定超材料混凝土中各材料的参数, 如表1和2所示. 模型中替换 30% 的 12–16 mm 天然骨料为人工骨料(即人工骨料数量为 40 个), 所有单元均为六面体单元, 单元总数为 432 万, 各种材料单元之间共节点以便传递力与位移, 模型四周为自由边界条件.

3.3 材料模型

在超材料混凝土细观模型中, 采用LS-DYNA中的MAT_072R3模拟随机分布的骨料和砂浆, 采用MAT_ELASTIC模拟弹性层和金属球.

在细观模型中考虑材料的应变率效应, 砂浆基体的压缩动态强度增强因子^[24]和拉伸动态强度增强因子^[25]由下式给出:

$$\text{CDIF} = 0.0419(\log \dot{\epsilon}_d) + 1.2165, \quad \dot{\epsilon}_d < 30 \text{ s}^{-1}, \quad (5)$$

图 4 (网络版彩图)三维超材料混凝土细观模型. (a) 超材料混凝土; (b) 砂浆; (c) 天然骨料; (d) 人工骨料; (e) 人工骨料截面示意图

Figure 4 (Color online) Three-dimensional metaconcrete mesoscale model. (a) Metaconcrete; (b) mortar; (c) natural aggregate; (d) artificial aggregate; (e) cross-section of artificial aggregate.

表 1 砂浆及天然骨料的材料参数^[23]

Table 1 Material properties of mortar and natural aggregate^[23]

材料	密度 (kg/m ³)	泊松比	抗压强度 (MPa)
砂浆	2500	0.20	34
天然骨料	2750	0.25	160

表 2 金属球及弹性层的材料参数^[18]

Table 2 Material properties of metallic core and elastic layer^[18]

材料	密度 (kg/m ³)	弹性模量 (MPa)	泊松比
铅	11400	1.6×10^4	0.44
聚氨酯	900	47.0	0.42

$$\text{CDIF} = 0.8988(\log \dot{\epsilon}_d)^2 - 2.8255(\log \dot{\epsilon}_d) + 3.4907, \quad 30 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon}_d \leq 1000 \text{ s}^{-1}, \quad (6)$$

$$\text{TDIF} = (\dot{\epsilon}_d / \dot{\epsilon}_{ts})^\delta, \quad \dot{\epsilon}_d \leq 1 \text{ s}^{-1}, \quad (7)$$

$$\text{TDIF} = \beta(\dot{\epsilon}_d / \dot{\epsilon}_{ts})^{1/3}, \quad \dot{\epsilon}_d > 1 \text{ s}^{-1}, \quad (8)$$

其中, $\delta = 1/(1+8f_{cs}/f_{c0})$, $\log \beta = 6\delta - 2$, $f_{c0} = 1 \times 10^7 \text{ Pa}$, $\dot{\epsilon}_{ts} = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, f_{cs} 为砂浆的静态抗压强度.

骨料的压缩和拉伸动态强度增强因子^[26]由下式给出:

$$\text{CDIF} = 0.0187(\log \dot{\epsilon}_d) + 1.2919, \quad 1 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon}_d < 220 \text{ s}^{-1}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{CDIF} &= 1.8547(\log \dot{\epsilon}_d)^2 - 7.9014(\log \dot{\epsilon}_d) + 9.6674, \\ 220 \text{ s}^{-1} &\leq \dot{\epsilon}_d \leq 1000 \text{ s}^{-1}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{TDIF} &= 0.0598(\log \dot{\epsilon}_d) + 1.3588, \\ 10^{-6} \text{ s}^{-1} &\leq \dot{\epsilon}_d < 0.1 \text{ s}^{-1}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{TDIF} &= 0.5605(\log \dot{\epsilon}_d)^2 + 1.381(\log \dot{\epsilon}_d) + 2.1256, \\ 0.1 \text{ s}^{-1} &\leq \dot{\epsilon}_d \leq 50 \text{ s}^{-1}. \end{aligned} \quad (12)$$

4 数值模拟

4.1 模型验证与网格收敛性分析

为了校验模型, 将超材料混凝土细观模型退化为Chen等人^[23]的普通混凝土模型, 也就是将超材料混凝土细观模型中的人工骨料数量设置为零. 模型尺寸及材料参数已在第3节给出. 对该退化模型施加如图5所示的荷载. 假定沿荷载施加方向的截面力为正值, 应变以压缩为负值. 图6为距离荷载施加位置150 mm处的应变. 从图中可以看出, 本文退化后的模型得到的结果与Chen等人^[23]的结果基本一致. 图7为退化模型的破坏形态与Chen等人^[23]模型破坏形态的对比. 从图中可以看出, 在图5所示的荷载作用下, 模型尾部发生了严重的层裂破坏. 因此, 通过对比应变时程曲线和破坏形态, 验证了本文模型的正确性.

在有限元分析中, 网格尺寸对计算时间和计算精度有很大影响. 为了建立最优的有限元模型, 建立网格尺寸分别为1, 0.5, 0.1 mm的超材料混凝土三维细观模型, 对模型进行网格收敛性分析. 对该模型施加如图5所示的荷载^[23].

图8为网格尺寸不同时模型中距离荷载施加位置150 mm处的截面合力. 从图中可以看出, 网格尺寸为

图5 (网络版彩图)冲击荷载试验数据^[23]

Figure 5 (Color online) Impact loading time history [23].

图6 (网络版彩图)应变时程曲线对比

Figure 6 (Color online) Comparison of strain time history.

0.5 mm时的结果与网格尺寸为0.1 mm时的结果基本相同. 因此, 采用0.5 mm的网格尺寸建立超材料混凝土细观模型可以保证计算精度和计算效率.

4.2 超材料混凝土在冲击荷载作用下的响应

4.2.1 荷载峰值: 20 MPa

当混凝土材料受到冲击荷载作用时, 由于混凝土的脆性和较低的抗拉强度, 远离荷载施加位置的自由

图7 (网络版彩图)破坏形态对比. (a) 退化模型破坏形态; (b) 参考文献^[23]中模型的破坏形态

Figure 7 (Color online) Comparison of failure pattern. (a) Degraded model; (b) the model in the ref. [23].

图 8 (网络版彩图) 网格收敛性验证
Figure 8 (Color online) Mesh convergence.

面附近的混凝土可能会产生严重的混凝土层裂破坏。因此, 在距离模型尾部 100 mm 处选取铅球单元 1、砂浆单元 2 (模型内部) 和砂浆单元 3 (模型表面) 为研究对象, 如图 9 所示。由于施加峰值为 40 MPa 的荷载 (图 5), 超材料混凝土模型及其退化模型尾部均产生严重的层裂破坏。因此, 对超材料混凝土模型及其退化模型施加如图 10 所示较小的荷载, 其荷载峰值为 20 MPa, 模型尺寸及材料参数已在第 3 节给出。

图 11(a) 为应力波传播到超材料混凝土模型尾部未反射之前某一时刻的应力云图。图 11(b) 为将超材料混凝土模型退化为普通混凝土后同一时刻的应力云图。通过与图 11(a) 对比可以发现, 随着应力波在超材料混凝土中的传播, 人工骨料的存在一定程度上衰减了应力波。

图 12(a) 为应力波在超材料混凝土模型尾部反射后某一时刻的应力云图。从图 12(a) 中可以看出, 当应力波从模型尾部反射后, 在模型尾部出现了拉应力, 在拉应力作用下超材料混凝土出现了轻微的层裂破坏。图 12(b) 为将模型退化为普通混凝土后与图 12(a) 同一时刻的应力云图。通过图 12(a) 与 (b) 的对比可以看出, 在相同荷载作用下普通混凝土出现了明显的层裂破坏。因此, 超材料混凝土中人工骨料的存在一定程度上减轻了材料的层裂破坏。

4.2.2 荷载峰值: 8 MPa

根据应力波的相关知识, 同一规格的子弹撞击入射杆产生的应力波形基本相同。只是在不同的撞击速度下, 应力波的幅值有所变化。因此, 为了重点研究在冲击荷载作用下超材料混凝土中人工骨料的作用和各

图 9 (网络版彩图) 砂浆单元和铅球单元位置示意图. (a) 截面位置示意图; (b) 截面上所取铅球单元 1 与砂浆单元 2、3 位置示意图

Figure 9 (Color online) Schematic diagram. (a) Location of the cross-section; (b) lead element 1 and mortar element 2 & 3 at the cross-section.

图 10 (网络版彩图) 20 MPa 峰值荷载曲线^[23]

Figure 10 (Color online) Impulsive loading time history of 20 MPa [23].

材料之间的能量交换, 避免材料层裂破坏带来过分能量消耗, 对超材料混凝土模型及其退化模型施加如图 13 所示的较小荷载^[23], 其荷载峰值为 8 MPa, 模型尺寸及材料参数已在第 3 节给出。

图 14(a) 为将超材料混凝土中的人工骨料全部退化为天然骨料后得到的普通混凝土中铅球单元 1 和砂浆单元 2 的位移时程曲线, 通过对比两位移时程曲线发现, 普通混凝土中这两个单元的位移基本一致。图 14(b) 为超材料混凝土中两单元的位移时程曲线, 超材料混凝土中由于弹性层的存在使得铅球的位移在开始时刻略微滞后于砂浆单元的位移, 此时弹性层被挤压; 铅球相对于铅球和砂浆所在的平面做往复运动; 当铅

图 11 (网络版彩图)应力云图(应力波传播到模型尾部前). (a) 超材料混凝土; (b) 退化模型

Figure 11 (Color online) Stress contour (before stress wave propagates to the right end). (a) Metaconcrete; (b) degraded model.

图 12 (网络版彩图)应力云图分布(应力波模型尾部反射后). (a) 超材料混凝土; (b) 退化模型

Figure 12 (Color online) Stress contour (after stress wave reflects from the right end). (a) Metaconcrete; (b) degraded model.

球和砂浆的位移一致时, 铅球存储的动能达到最大.

图15为所有人工骨料中铅球和弹性层所存储总能量(包含铅球的动能、势能与弹性层的动能、势能)的时程曲线. 从图中可以看出, 人工骨料所存储的总能量不是固定的; 在应力波施加的短时间内, 铅球和弹性层的总能量逐渐增加; 从应力波发生第一次自由面反射

开始, 铅球和弹性层所存储的总能量在动能和势能之间相互转换, 结合图14(b)可知, 当铅球和砂浆单元位移相同时, 铅球存储的总能量达到最大值, 弹性层存储的总能量降低到最小值.

图16(a)和(b)分别为人工骨料数量变化($n=10, 20, 40$)对所有人工骨料存储的总能量和砂浆单元3应变的

图 13 (网络版彩图) 8 MPa峰值荷载曲线^[23]

Figure 13 (Color online) Impulsive load time history of 8 MPa [23].

图 15 (网络版彩图)人工骨料存储能量的时程曲线

Figure 15 (Color online) Time history of energy stored by the artificial aggregates.

图 14 (网络版彩图)位移时程曲线(铅球单元1与砂浆单元2). (a) 超材料混凝土; (b) 退化模型

Figure 14 (Color online) Displacement time histories (lead element 1 and mortar element 2). (a) Metaconcrete; (b) degraded model.

影响. 图16(a)给出了人工骨料数量变化对人工骨料所存储的总能量的影响. 从图中可以看出, 随着应力波在模型中的初次传播, 人工骨料的总能量逐渐增大; 当应力波在自由面反射后, 反向传播的应力波会降低人工骨料所存储的总能量; 当应力波从加载面发生第二次反射后, 人工骨料所存储的能量再一次增加, 此时若铅球数量较少(如 $n=10$), 则人工骨料所存储的总

图 16 (网络版彩图)人工骨料数量对超材料混凝土动态响应的影响. (a) 人工骨料存储的能量; (b) 砂浆单元3的应变

Figure 16 (Color online) The effect of artificial aggregates number on dynamic response of metaconcrete. (a) Energy stored by the artificial aggregates; (b) strain time history of mortar element 3.

能量比应力波初次加载时更高, 当人工骨料数量超过某一值时, 应力波的第二次反射加载不会引起人工骨料存储总能量峰值的二次增加. 图16(b)给出了含有不同数量人工骨料的超材料混凝土在相同荷载作用下砂

浆单元3的应变. 从图中可以发现, 随着应力波在模型中的传播, 人工骨料可以有效地衰减由应力波传播产生的拉应变和压应变; 人工骨料的存在对应力波初次在模型中传播时产生的压应变没有明显的衰减作用; 当应力波第一次从自由面反射时, 人工骨料的存在可以有效地降低模型尾部由应力波叠加产生的拉应变, 与Chen等人^[23]模型结果进行对比, 当 $n=10$ 时, 拉应变降低19%左右, 当 $n=20$ 时, 拉应变降低22%左右, 当 $n=40$ 时, 拉应变降低为35%左右; 人工骨料数量越多, 超材料混凝土中的应力状态越复杂, 波动越明显.

4.3 参数分析

本节参数分析均对模型施加峰值为8 MPa的荷载(如图13所示)^[23]. 图17给出了重芯分别为铅和天然骨料时人工骨料存储的总能量的时程曲线. 当人工骨料中的重芯为天然骨料时, 人工骨料的共振频率为8.1 kHz. 从图中可以看出, 由铅构成的人工骨料相对于天然骨料构成的人工骨料能更有效地存储能量, 降低砂浆中的能量; 随着应力波的传播, 由铅构成的人工骨料存储的总能量存在较大的波动性. 在实际应用中, 人工骨料应选用较重的重芯, 以便人工骨料能更好地存储能量.

图18为弹性层弹性模量不同时人工骨料存储的总能量的时程曲线. 弹性层弹性模量不同时, 人工骨料的共振频率如表3所示. 从图中可以看出, 弹性层的弹性模量为47 MPa时人工骨料存储的总能量达到最大, 有效地降低了砂浆中的总能量. 此时, 人工骨料的共振频率处于幅值较大的荷载频率范围内. 过大或过小的弹

图 17 (网络版彩图)不同重芯材料对人工骨料存储能量的影响
Figure 17 (Color online) The effect of core materials on the energy stored by the artificial aggregates.

性模量都会使人工骨料的共振频率处于荷载曲线中频率分布的边缘, 这会降低人工骨料存储的总能量, 从而相对提高砂浆中的能量. 较低的弹性模量会降低弹性层对应力的传递能力和超材料混凝土本身的整体强

图 18 (网络版彩图)弹性层弹性模量变化对人工骨料存储能量的影响
Figure 18 (Color online) The effect of elastic modulus of elastic layer on the energy stored by the artificial aggregates.

表 3 弹性层的弹性模量不同时人工骨料的共振频率
Table 3 Resonant frequency of artificial aggregate with different elastic modulus of elastic layer

弹性模量 (MPa)	共振频率 (kHz)
4.7	1.129
47	3.571
4.7×10^2	11.29
4.7×10^3	35.71
4.7×10^4	112.9

图 19 (网络版彩图)弹性层厚度变化对人工骨料存储能量的影响
Figure 19 (Color online) The effect of elastic layer thickness on the energy stored by the artificial aggregates.

表 4 弹性层的厚度不同时人工骨料的共振频率

Table 4 Resonant frequency of artificial aggregate with different thickness of elastic layer

弹性层厚度 (mm)	共振频率 (kHz)
1	5.05
2	3.571
4	2.53

度; 较高的弹性模量会限制弹性层的变形和铅球的运动, 从而降低铅球和弹性层存储的能量.

图19为弹性层厚度不同时所有人工骨料存储的总能量的时程曲线. 在弹性层厚度变化的同时保持所有人工骨料的整体尺寸不变, 即当弹性层厚度增大时减小铅球的尺寸. 弹性层厚度不同时, 人工骨料的共振频率如表4所示. 从图中可以看出, 弹性层厚度 $t=2\text{ mm}$ 时, 人工骨料所存储的总能量达到一个较大值, 此时, 砂浆中的能量得到了有效降低. 随着应力波的传播, 含有较厚弹性层的人工骨料存储的能量波动性降低, 这是因为较厚的弹性层起到了很好的缓冲作用; 当弹性层较薄时, 铅球的运动受到了薄弹性层的抑制, 人工骨料存储的总能量具有很强的波动性.

5 结论

超材料混凝土是一种新型的混凝土. 它是在普通混凝土中添加人工骨料(外裹弹性层的重芯). 本文将外裹聚氨酯弹性层的铅球作为人工骨料, 建立考虑天然骨料和人工骨料随机排布的超材料混凝土细观模型, 通过数值模拟的方法分析人工骨料对普通混凝土动态性能的影响. 本研究发现, 使用人工骨料可以有效地降低砂浆基体中的能量, 人工骨料存储的能量主要由铅球的动能和聚氨酯弹性层的弹性势能组成, 这两种能量随着金属球的运动相互转化. 当冲击荷载施加到超材料混凝土上时, 人工骨料中的铅球由于弹性层的存在而做往复运动, 人工骨料重芯为铅时存储的能量是重芯为天然骨料时存储能量的3倍左右. 人工骨料所存储能量的多少与人工骨料的数量有关. 以本文模型为例, 将7%(即 $n=10$)的12–16 mm的天然骨料替换为人工骨料时人工骨料存储的总能量是将30%(即 $n=30$)的12–16 mm天然骨料替换为人工骨料时人工骨料存储的总能量的40%. 另外, 当荷载频率范围为0–15 kHz、人工骨料的共振频率为3.6 kHz时, 将30%的12–16 mm天然骨料替换为人工骨料可使模型尾部的拉应变降低35%左右.

致谢 感谢天津大学崔健博士在超材料混凝土细观模型建立方面给予的帮助.

参考文献

- 1 Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov Phys Usp*, 1968, 10: 509–514
- 2 Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 3966–3969
- 3 Tanaka T, Ishikawa A, Kawata S. Unattenuated light transmission through the interface between two materials with different indices of refraction using magnetic metamaterials. *Phys Rev B*, 2006, 73: 125423
- 4 Cai W, Shalaev V. Optical metamaterials: Fundamentals and applications. *Phys Today*, 2010, 63: 57–58
- 5 Fang N, Lee H, Sun C, et al. Sub-diffraction-limited optical imaging with a silver superlens. *Science*, 2005, 308: 534–537
- 6 Li J, Chan C T. Double-negative acoustic metamaterial. *Phys Rev E*, 2004, 70: 055602
- 7 Yang Z, Mei J, Yang M, et al. Membrane-type acoustic metamaterial with negative dynamic mass. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 204301
- 8 Liu Z, Zhang X, Mao Y, et al. Locally resonant sonic materials. *Science*, 2000, 289: 1734–1736
- 9 Xiang H J, Shi Z F, Wang S J, et al. Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations: Experimental validation. *Smart Mater Struct*, 2012, 21: 112003
- 10 Hussein M I, Hulbert G M, Scott R A. Dispersive elastodynamics of 1D banded materials and structures: Design. *J Sound Vib*, 2007, 307: 865–893
- 11 Policarpo H, Neves M M, Ribeiro A M R. Dynamical response of a multi-laminated periodic bar: Analytical, numerical and experimental study.

- [Shock Vib](#), 2010, 17: 521–535
- 12 Krödel S, Thomé N, Daraio C. Wide band-gap seismic metastructures. [Extreme Mech Lett](#), 2015, 4: 111–117
 - 13 Dertimanis V K, Antoniadis I A, Chatzi E N. Feasibility analysis on the attenuation of strong ground motions using finite periodic lattices of mass-in-mass barriers. [J Eng Mech](#), 2016, 142: 04016060
 - 14 Yan Y, Laskar A, Cheng Z, et al. Seismic isolation of two dimensional periodic foundations. [J Appl Phys](#), 2014, 116: 044908
 - 15 Cui J, Hao H, Shi Y. Discussion on the suitability of concrete constitutive models for high-rate response predictions of RC structures. [Int J Impact Eng](#), 2017, 106: 202–216
 - 16 Zhou X Q, Hao H. Prediction of airblast loads on structures behind a protective barrier. [Int J Impact Eng](#), 2008, 35: 363–375
 - 17 Tan K T, Huang H H, Sun C T. Blast-wave impact mitigation using negative effective mass density concept of elastic metamaterials. [Int J Impact Eng](#), 2014, 64: 20–29
 - 18 Mitchell S J, Pandolfi A, Ortiz M. Metaconcrete: Designed aggregates to enhance dynamic performance. [J Mech Phys Solids](#), 2014, 65: 69–81
 - 19 Mitchell S J, Pandolfi A, Ortiz M. Investigation of elastic wave transmission in a metaconcrete slab. [Mech Mater](#), 2015, 91: 295–303
 - 20 Mitchell S J, Pandolfi A, Ortiz M. Effect of brittle fracture in a metaconcrete slab under shock loading. [J Eng Mech](#), 2016, 142: 04016010
 - 21 Kettenbeil C, Ravichandran G. Experimental investigation of the dynamic behavior of metaconcrete. [Int J Impact Eng](#), 2018, 111: 199–207
 - 22 Gao Y J, Fan H L, Zhang B, et al. Wave attenuation of super-material wave absorbing concrete panel subjected to two-dimensional plane wave (in Chinese). [J Vib Shock](#), 2018, 37: 44–49 [郇英杰, 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. [振动与冲击](#), 2018, 37: 44–49]
 - 23 Chen G, Hao Y F, Hao H. 3D meso-scale modelling of concrete material in spall tests. [Mater Struct](#), 2015, 48: 1887–1899
 - 24 Hao Y F, Hao H. Numerical evaluation of the influence of aggregates on concrete compressive strength at high strain rate. [Int J Protect Struct](#), 2011, 2: 177–206
 - 25 Malvar J L, Crawford J E. Dynamic Increase Factors for Concrete. In: Twenty-Eighth DDESB Seminar. Orlando, FL, 1998
 - 26 Hao Y F, Hao H. Numerical investigation of the dynamic compressive behaviour of rock materials at high strain rate. [Rock Mech Rock Eng](#), 2013, 46: 373–388

Numerical study on impact resistance of metaconcrete

JIN HeXin^{1,2}, CHEN WenSu², HAO Hong^{2*} & HAO YiFei¹

¹ School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

² Centre for Infrastructural Monitoring and Protection, School of Civil and Mechanical Engineering, Curtin University, Perth 6000, Australia

It is well known that concrete material is strong in compression while weak in tension. Concrete structure might experience severe spall damage at the rear of the structure when it is subjected to intensive loading. Concrete is usually simulated as homogeneous material without considering aggregate. However, the presence of aggregates has effect on the dynamic material properties of concrete. In recent years, metamaterial has attracted much attention as the metamaterial with artificial microstructures exhibits extraordinary behaviors that cannot find in nature. In this study, the metaconcrete made of locally resonant metamaterial is investigated. Three-dimensional meso-scale model of metaconcrete considering mortar, aggregates and engineered aggregate is developed to simulate spalling test by using LS-DYNA. The accuracy of the numerical model in simulating the spalling tests is verified by comparing the numerical results with the previous studies. The effects of material properties and geometric properties (e.g. elastic modulus and thickness of elastic layer) on the dynamic response of metaconcrete are studied.

metaconcrete, artificial aggregate, mesoscale, spall damage

PACS: 47.27.ek, 43.28.Mw, 28.41.Te, 28.41.Qb

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0183](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0183)