

高压物理学报

冲击荷载下橡胶超材料混凝土的数值模拟

周荣欣 刘页

Numerical Simulation of Rubberized Metaconcrete under Impact Load

ZHOU Rongxin, LIU Ye

引用本文:

周荣欣, 刘页. 冲击荷载下橡胶超材料混凝土的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2025, 39(7):074201. DOI: 10.11858/gywlb.20251005

ZHOU Rongxin, LIU Ye. Numerical Simulation of Rubberized Metaconcrete under Impact Load[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(7):074201. DOI: 10.11858/gywlb.20251005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20251005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

应变率相关的橡胶本构模型研究

Strain Rate Dependent Constitutive Model of Rubber

高压物理学报. 2022, 36(2): 024205 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210815>

冲击荷载下分支交错层状仿生复合材料动态断裂行为的实验研究和数值模拟

Experimental Study and Numerical Simulation of Dynamic Fracture Behavior of Branch Staggered Laminated Biomimetic Composites under Impact Loading

高压物理学报. 2022, 36(1): 014101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210776>

错位多次打击下UHPC靶体损伤破坏效应的数值模拟研究

Numerical Investigation on Damage and Failure of UHPC Targets Subjected to Dislocation Multi-Attacks

高压物理学报. 2024, 38(3): 034201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230834>

混凝土界面过渡区对裂纹扩展过程的影响

Influence of Interfacial Transition Zone on Crack Propagation Process in Concrete

高压物理学报. 2023, 37(4): 044207 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20230606>

超声动态载荷下混凝土过渡区域的损伤演化

Damage Evolution in Concrete Interfacial Transition Zone with Ultrasonic Dynamic Load

高压物理学报. 2020, 34(4): 044205 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190833>

基于DIC方法研究混凝土劈裂的变形和破坏

Deformation and Failure of Concrete Splitting Based on DIC Method

高压物理学报. 2022, 36(4): 044104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220509>

冲击荷载下橡胶超材料混凝土的数值模拟

周荣欣, 刘 页

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230000)

摘要: 为提升现有类混凝土材料的动态性能, 在超材料混凝土基质中加入橡胶骨料形成新型抗冲击材料, 并对其细观力学模型在冲击荷载作用下的动态响应进行数值模拟。对试件内各组分含量、级配、分布情况及适用材料模型进行系统标定和验证, 分析了橡胶超材料混凝土在冲击荷载下的衰波能力及各组分相互作用规律, 探讨了橡胶骨料在高幅值荷载下对橡胶超材料混凝土破坏模式、损伤区域及损伤程度的影响, 并对橡胶含量及粒径进行了参数分析。数值模拟结果表明: 橡胶骨料的加入不仅使混凝土的损伤区域呈现“分散”特征, 还能够有效降低试件的损伤程度; 橡胶骨料可提升试件韧性, 抑制损伤程度的加剧; 高橡胶含量对试件强度造成负面影响, 形成损伤抑制与损伤加剧之间的矛盾, 为确保两者平衡, 建议橡胶骨料体积占骨料总体积的 15%~30%。以上结果说明, 在超材料混凝土中加入橡胶骨料能够有效提升试件的动态性能, 为未来抗冲击材料的设计和工程应用提供参考。

关键词: 抗冲击材料; 橡胶; 超材料混凝土; 动态性能; 损伤; 谐振器

中图分类号: O347.3; O521.9; TU377

文献标志码: A

近年来, 爆炸和撞击事故频发, 建筑材料的抗冲击性能成为关注焦点。混凝土作为广泛应用的建筑材料, 在爆炸事故中通常承担着防护功能。然而, 现有混凝土防护结构一般只能通过被动方式抵御爆炸冲击波, 无法有效地对冲击波进行主动衰减, 导致混凝土结构遭受冲击时, 其内部产生高应变率和高静水压力, 造成混凝土结构开裂、层裂甚至完全破坏, 影响防护结构的可持续性。提升类混凝土材料的抗爆炸冲击能力对于确保建筑设施功能、保护公共安全至关重要。

早在 20 世纪 90 年代, 研究人员就开始尝试在混凝土中加入橡胶颗粒, 以改善其抗冲击性能。橡胶材料具有良好的耗能特性, 可以有效地吸收冲击能量, 进而提高混凝土的韧性和抗损伤能力^[1-3]。然而, Eldin 等^[4]研究发现, 橡胶颗粒的加入对混凝土的拉压强度产生消极影响, 使橡胶混凝土不适合作为承受准静态载荷的结构。Topcu^[5]指出, 橡胶混凝土的破坏模式展现出延性和塑性特性, 表明橡胶的韧性特征在其内部得以保留, 从而延缓橡胶混凝土内裂纹的产生与扩展。但是, 混凝土的韧性与橡胶含量并非线性相关, 过高的橡胶替代率可能导致韧性增长停滞^[6]。Zheng 等^[7]对橡胶混凝土的动态强度进行了研究, 指出橡胶混凝土的应变率敏感性比普通混凝土更强, 能够部分弥补其在强度上的不足。基于橡胶混凝土的独特性能, 许多研究者将其应用于抗冲击、吸能等领域, 取得了丰硕成果^[2, 8-9]。

超材料混凝土研究则基于局部共振原理, 最初由 Liu 等^[10]于 2000 年提出, 通过在环氧树脂中引入谐振器, 形成局部共振结构, 有效地阻止了低频弹性波的传播。Mitchell^[11]将局部共振结构与混凝土相结合, 成功地构建了超材料混凝土试件, 通过理论和数值分析, 验证了其独特的削波和抗冲击能力。自此, 超材料混凝土研究进入快速发展阶段^[12-15], 并被证明在冲击荷载下的性能优于普通混凝土。

尽管橡胶材料和谐振器在提升类混凝土的抗冲击性能方面展示出一定优势, 但是仍然存在一系列亟待解决的问题。首先, 橡胶混凝土在强度和耐久性方面的不足限制了其应用范围, 其强度与橡胶含

* 收稿日期: 2025-01-03; 修回日期: 2025-02-24

基金项目: 国家自然科学基金(52208159); 高校基础科研基金(JZ2022HGTB0290, JZ2022HGTB0355)

作者简介: 周荣欣(1987—), 男, 博士, 研究员, 主要从事结构损伤断裂研究. E-mail: rongxinzhou@hfut.edu.cn

量的负相关特性导致在承受高强度冲击荷载时,经常表现出不理想的损伤效果。其次,超材料混凝土存在的带隙较窄、强度较低以及应力集中等问题均限制其实际应用效果。虽有学者针对其缺陷提出了具体应对方法,但均没有彻底解决超材料混凝土自身的众多问题^[16-18]。更为严峻的是,现有研究中普遍采用的宏观数值模拟方法难以准确反映橡胶混凝土或超材料混凝土在实际应用中的复杂行为^[19],尤其是试件内部损伤演化趋势、混凝土骨料的级配、橡胶颗粒的分布等细观因素往往被忽视,导致一种材料模型表征多种材料属性时出现矛盾,模拟结果与试验结果存在较大偏差。这些问题的存在不仅影响理论模型的准确性,还制约其应用。

针对上述问题,本研究将设计一种新型抗冲击材料,即橡胶超材料混凝土。在橡胶材料改性混凝土和水泥基内谐振器共振吸波的基础上,将橡胶混凝土与超材料混凝土相结合,采取数值模拟方式分析其动态力学性能,通过细观数值模拟,精确捕捉混凝土中各组分的分布情况,以期深入揭示橡胶骨料、谐振器、天然骨料与混凝土基质之间的力学行为,降低宏观模型可能导致的误差。此外,对数值模型的精细化研究也将有助于揭示橡胶颗粒和谐振器对混凝土整体性能的贡献,为抗冲击材料优化提供更为准确的改进方法。

1 数值模型

1.1 三维细观橡胶超材料混凝土结构

橡胶超材料混凝土的细观结构由均质砂浆、天然骨料、橡胶骨料和谐振器 4 部分组成。各部分之间的接触区域被称为界面过渡区(interfacial transition zone, ITZ)。在混凝土细观结构中,通常认为 ITZ 的实际厚度在 10~50 μm 之间^[20-21]。若在数值模型中采用此网格尺寸,将会产生极其庞大的单元数量,当前计算机的求解能力难以应对该挑战。因此,将各部分间的 ITZ 简化为共节点连接,以确保模型连续,并统一规定骨料为球形,该简化方式及骨料形状的选取在众多混凝土细观数值模拟中被广泛采用,取得了相对可靠的结果^[22-23]。

此外,为消除混凝土中骨料总量对数值结果的影响,设置骨料体积占试件总体积的 45%,粒径遵循富勒级配,在 1~10 mm 区间分布^[24],以确保混凝土内骨料级配的理想密度和整体强度。富勒级配表示为

$$P_d = (d/d_{\max})^n \quad (1)$$

式中: d 为骨料粒径; $d_{\max}$ 为骨料的粒径; P_d 为骨料粒径为 d 的过筛率; n 为方程指数, $0.45 \leq n \leq 0.70$,本研究取 0.50^[25]。富勒级配曲线见图 1。

除规范骨料含量之外,其分布需满足随机性。参考 Pan 等^[26]对混凝土内天然骨料分布的研究,骨料生成及投放程序遵循以下步骤:

- (1) 确定粒径范围、投放区域及体积含量;
- (2) 在投放区域内随机生成不同粒径的骨料;
- (3) 若骨料满足在规定区域内且不重叠,则放置骨料,否则返回上一步,重新随机生成;
- (4) 重复上述步骤,直至满足体积含量要求。

以橡胶骨料体积占骨料总体积 30% 的橡胶超材料混凝土(MRC30)为例,其几何模型如图 2(a) 所示,以网格映射法为媒介实现几何模型向数值模型的转化,如图 2(b) 所示。需要说明的是,图 2(a) 中的谐振器是以手动切割试件内部区域的方式投放,旨在提升骨料生成程序的运行效率,同时消除“谐振器位置分布”这一变量对后续研究的影响。

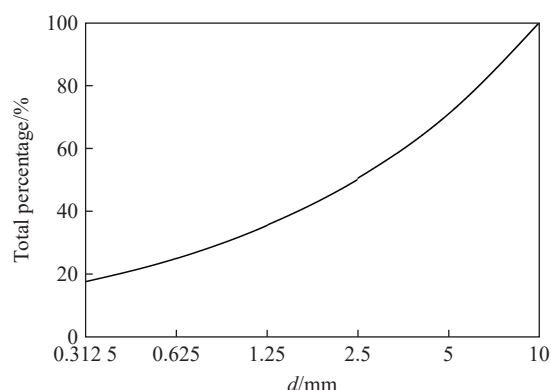


图 1 富勒级配曲线

Fig. 1 Fuller's grading curve

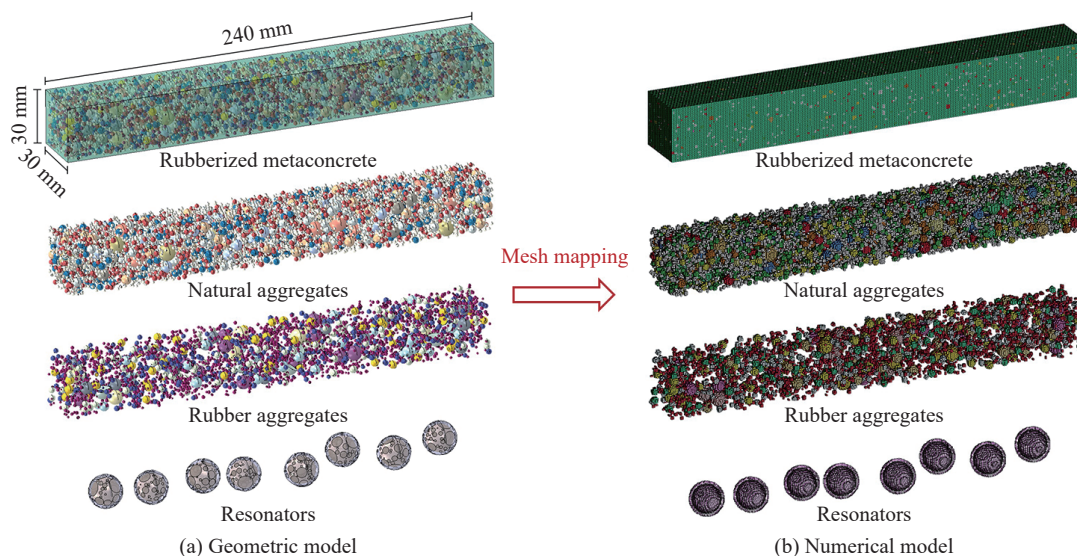


图 2 细观橡胶超材料混凝土模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of meso-scale rubber metaconcrete model

1.2 材料模型

近几十年,国内外学者对混凝土的力学响应进行了广泛研究,并提出了多种符合水泥基体动态性能的材料本构模型,包括 CSCM(continuous surface cap model)、CDPM2(concrete damage plastic model 2)、K&C(Karagozian and Case)模型等。K&C 模型是由 Malvar 等^[27]在伪张量模型的基础上开发的,能够精确描述混凝土的体积压缩行为,可对爆炸冲击荷载下混凝土的力学响应和损伤状态进行高精度预测^[28-29],因此,在动态加载数值模拟中被推荐为首选材料模型^[30-32]。基于上述考虑,本研究中砂浆和天然骨料采用 K&C 模型,该模型在 LS-DYNA 中集成为 MAT_72R3 号材料,通过输入基本材料参数即可实现对 K&C 模型全部参数的自动标定,具体材料参数见表 1^[26,33]。

表 1 材料模型参数^[26,33]Table 1 Parameters of the material model^[26,33]

Component	Density/(kg·m ⁻³)	Poisson's ratio	Strength/MPa	C_{10}	C_{01}
Mortar	2 100	0.18	35		
Natural aggregate	2 600	0.14	90		
Rubber aggregate	1 000	0.492		0.586 43	-0.038 942

K&C 模型是以最大强度面($\Delta\sigma_m$)、屈服强度面($\Delta\sigma_y$)和残余强度面($\Delta\sigma_r$)描述材料在不同加载阶段的损伤特征,其强度面函数^[34]为

$$\begin{cases} \Delta\sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2 p} \\ \Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y} p} \\ \Delta\sigma_r = \frac{p}{a_{1r} + a_{2r} p} \end{cases} \quad (2)$$

式中: p 为静水压力; a_i 、 a_{iy} 、 a_{ir} ($i=0, 1, 2; j=1, 2$)为强度面参数,通过对混凝土试件在不同静水压力($p = -(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})/3$)下进行三轴和单轴拉压测试获得。

结合图 3(f_t 为抗拉强度)可知,压力上升使混凝土先从弹性阶段转化为屈服阶段,达到屈服强度面后在硬化阶段抵达最大强度面,最后在软化阶段回退至残余强度面。强度面函数用于描述混凝土从开始受压到损伤破坏时的应力变化过程,将受力情况与损伤行为相联系,以此定义混凝土的力学特征。

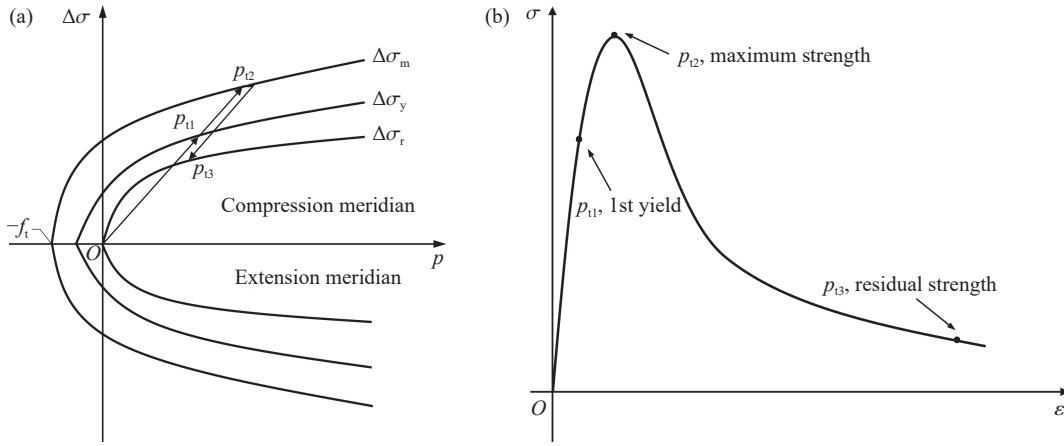


图 3 K&C 模型的本构描述: (a) 强度面子午线, (b) 经典应力-应变曲线

Fig. 3 Constitutive description of K&C model: (a) meridians of strength surfaces; (b) typical stress-strain curve

橡胶材料具有高度的非线性力学响应和极大的失效应变, 通常采用应变-能量密度函数表征其超弹性应力-应变关系。Mooney^[35] 于 1940 年提出关于大弹性形变的应变能理论, 之后 Rivlin 等^[36] 对应变-能量密度函数进行修正, 最终形成了 Mooney-Rivlin 模型。该模型被广泛应用于橡胶材料的数值模拟, 被证实动态荷载下可对其力学行为进行准确描述^[26]。本研究采用 Mooney-Rivlin 模型对橡胶骨料进行模拟, 其应变-能量密度函数为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{l}{d_0}(J - 1)^2 \quad (3)$$

式中: W 为单位体积材料在变形过程中储存的应变能; C_{10} 、 C_{01} 、 d_0 和 l 为材料参数, 由试验标定; I_1 、 I_2 和 J 为柯西-格林应变张量的不变量, $J=1$ 表示不可压缩橡胶。该模型在 LS-DYNA 中集成为 MAT_27 号材料, 仅需输入 C_{10} 和 C_{01} 即可完成对橡胶模型的基本定义, 具体材料参数见表 1。

1.3 应变率效应

混凝土动态和准静态力学性能差异显著, 主要表现为率相关的强度增强效应, 也称应变率效应^[37-40]。在 LS-DYNA 中, 应变率效应通过定义应变率-动态增长因子 (dynamic increase factor, DIF) 函数实现。为确保混凝土基质动态强度的可靠性, 本研究采用 CEB 推荐的压缩强度的 $DIF(\phi_c)$ 和拉伸强度的 $DIF(\phi_t)$ 函数^[41], 该函数由大量水泥砂浆和混凝土试验数据拟合而成, 具体表述如下

$$\phi_c = f_{cd}/f_{cs} = \begin{cases} (\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_{cs})^{0.014} & \dot{\epsilon}_d \leq 30 \text{ s}^{-1} \\ 0.012(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_{cs})^{1/3} & \dot{\epsilon}_d > 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: f_{cd} 为动态压缩强度; f_{cs} 为准静态压缩强度; $\dot{\epsilon}_d$ 为当前应变率; $\dot{\epsilon}_{cs}$ 为准静态压缩时的参考应变率, 取 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

$$\phi_t = f_{td}/f_{ts} = \begin{cases} (\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_{ts})^{0.018} & \dot{\epsilon}_d \leq 10 \text{ s}^{-1} \\ 0.0062(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_{ts})^{1/3} & \dot{\epsilon}_d > 10 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

式中: f_{td} 为动态拉伸强度; f_{ts} 为准静态拉伸强度; $\dot{\epsilon}_{ts}$ 为准静态拉伸时的参考应变率, 取 $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。

此外, 由于水泥砂浆与天然骨料的质量密度存在差异, 导致其侧向惯性约束效应不同^[42], 且均质水泥与岩石材料的损伤机制不同, 因此, 在动态荷载下, 天然骨料的 DIF 应被重新定义, 其压缩 DIF 和拉伸 DIF 采用如下表达式^[42-43]

$$\phi_c = \begin{cases} 0.01911 \lg \dot{\epsilon}_d + 1.2222 & 1 \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon}_d \leq 220 \text{ s}^{-1} \\ 1.6607 (\lg \dot{\epsilon}_d)^2 - 6.9122 \lg \dot{\epsilon}_d + 8.346 & 220 \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon}_d \leq 1000 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

$$\phi_t = \begin{cases} 0.5605 (\lg \dot{\epsilon}_d)^2 + 1.3871 \lg \dot{\epsilon}_d + 2.1256 & 1 \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon}_d \leq 2 \text{ s}^{-1} \\ 0.5605 (\lg \dot{\epsilon}_d)^2 + 0.8301 \lg \dot{\epsilon}_d + 2.2935 & 2 \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon}_d \leq 50 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

为避免高估天然骨料的动态拉伸强度,当应变率大于 50 s^{-1} 时,天然骨料的拉伸 DIF 取定值^[26]。根据上述 DIF 拟合函数,绘制混凝土砂浆和天然骨料的 DIF 曲线,如图 4 所示。

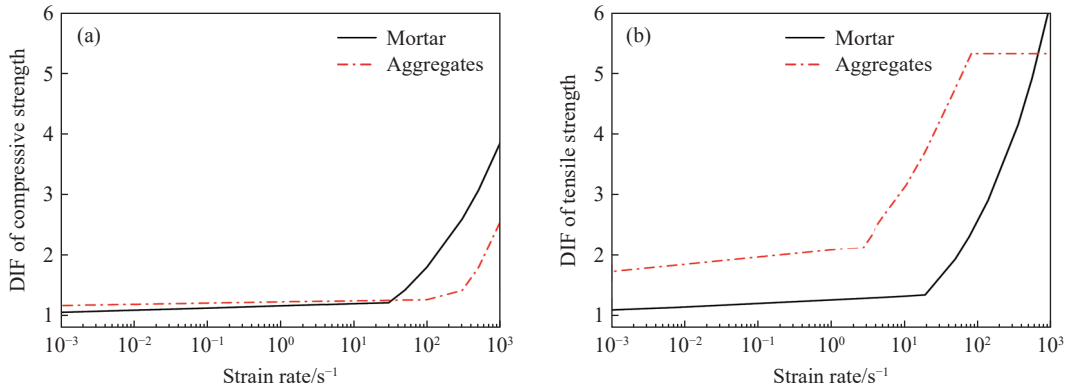


图 4 砂浆和骨料的 DIF 曲线
Fig. 4 DIF curves of mortar and aggregates

1.4 模型验证

Pham 等^[24]对不同橡胶含量的混凝土试件进行分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)试验,试件尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,浇筑 24 h 后采用浸水养护法养护至测试龄期(28 d),以达到设计强度,其配合料按照 AS 1012.2 标准^[44]配置。参照该试验,采用 1.2 节中的细观混凝土模型及参数,在 LS-DYNA 内对不同橡胶含量的混凝土试件进行 SHPB 冲击模拟,验证细观模型和材料模型的可靠性。

如图 5 所示, SHPB 装置由撞击杆、入射杆、试件和透射杆 4 部分组成。撞击杆、入射杆和透射杆由复合钢材制成,其屈服强度、密度、弹性模量和泊松比分别为 1 141 MPa、 7800 kg/m^3 、240 GPa 和 0.3,长度分别为 5 500 和 3 000 mm,杆直径与试件保持一致。撞击杆对入射杆高速冲击,在入射杆内形成入射波,部分应力波在入射杆末端被反射形成反射波,其余应力波则经过试件传递至透射杆,形成透射波。根据一维应力波传播理论,通过测量不同时刻入射杆和透射杆内的反射应变 ε_R 和透射应变 ε_T ,可获得试件应力 $\sigma(t)$ 、应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$ 和应变 $\varepsilon(t)$,分别表示为

$$\sigma(t) = \frac{EA}{A_s} \varepsilon_T(t) \quad (8)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_R(t) \quad (9)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}(t) dt \quad (10)$$

式中: A_s 和 L 分别为试件的横截面积和长度; E 、 A 和 C_0 分别为杆的弹性模量、横截面积和应力波传播速度, $C_0 = \sqrt{E/\rho}$, ρ 为杆的密度。

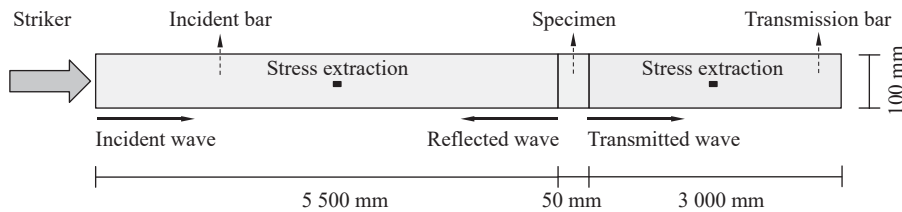


图 5 SHPB 装置示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the SHPB apparatus

采用网格映射法搭建几何模型与数值模型之间的桥梁。映射尺寸在计算精度与计算效率的权衡中起决定作用。在进行 SHPB 试验的数值模拟之前,需进行网格收敛性分析,以确定网格映射尺寸。

如图 6(a) 中的插图所示,建立尺寸为 $15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的橡胶混凝土试件(命名为 RC15s),

分别以 0.50、0.75 和 1.00 mm 的尺寸对试件进行网格映射, 对不同网格尺寸的 RC15s 施加如图 6(a) 所示荷载, 输出各试件中部横截面平均应力时程曲线, 见图 6(b)。经对比, 当网格尺寸为 0.50 和 0.75 mm 时, 两者的应力时程曲线无明显差异; 当网格尺寸为 1.00 mm 时, 曲线出现偏移, 说明此时收敛性较差。综合考虑模拟精度和计算效率, 网格尺寸选取 0.75 mm, 以获得真实且理想的数值模拟效果。

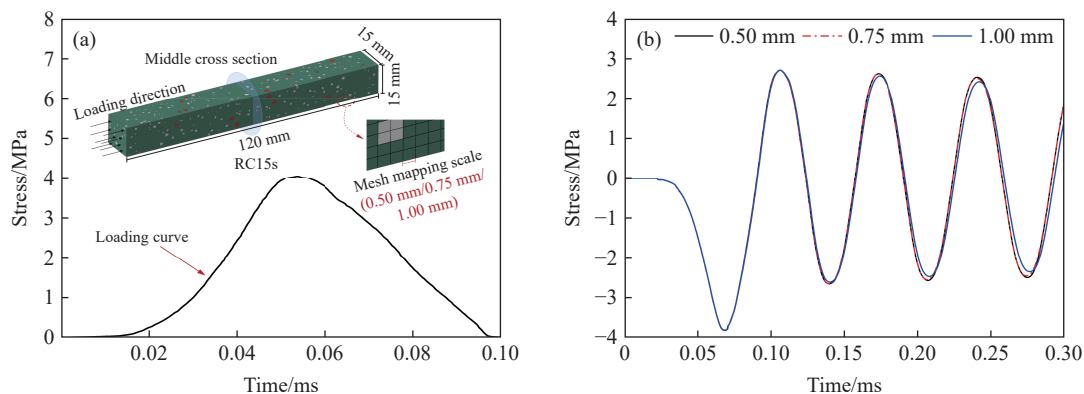


图 6 (a) 加载曲线和数值模型示意图, (b) 应力时程曲线

Fig. 6 (a) Schematic diagram of the numerical model and loading curve; (b) stress-time curves

如图 7 所示, 建立与 Pham 等^[24] 试验一致的细观混凝土数值模型, 根据橡胶骨料在总骨料中的体积分数, 将试件分为普通混凝土 (normal concrete) 试件 NC(0%)、橡胶混凝土试件 RC15(15%) 和 RC30(30%)。提取试验中入射杆的应力时程曲线作为数值模拟中入射杆端面的加载条件, 如图 8(a) 所示, 以模拟试验中撞击杆冲击入射杆端面产生入射波的过程。SHPB 数值模型见图 8(b), 网格映射后, 试件共计 1 132 568 个单元。各部件之间采用 *AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 接触算法, 入射杆和透射杆均采用线弹性本构模型模拟。通过比较试验与数值计算中入射杆和透射杆中部的应力时程曲线来验证数值模型的有效性, 结果如图 9 所示。由图 9 可知, 各试件的 SHPB 数值模拟结果与试验结果吻合较好, 显示出细观混凝土内骨料含量及分布的合理性, 同时验证了综合运用 K&C 模型和 Mooney-Rivlin 材料模型开展细观混凝土数值模拟的可行性。

为进一步验证数值模型的动态力学响应, 提取入射杆及透射杆中部应变时程曲线, 以一维应力波传播理论为基础, 通过式 (8)、式 (9) 和式 (10) 得到不同试件的动态压缩应力-应变曲线, 并与试验结果进行比较。如图 10 所示, 总体上看, 数值模拟曲线与试验结果吻合, 证明了细观模型和材料模型的可靠性, 可为后续研究类混凝土的动态力学性能提供数据支撑。

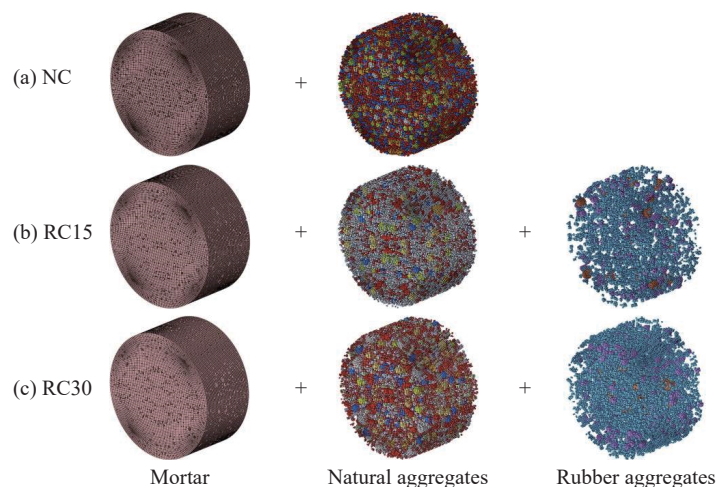


图 7 不同橡胶含量的混凝土数值模型

Fig. 7 Numerical models of the concrete with varying rubber contents

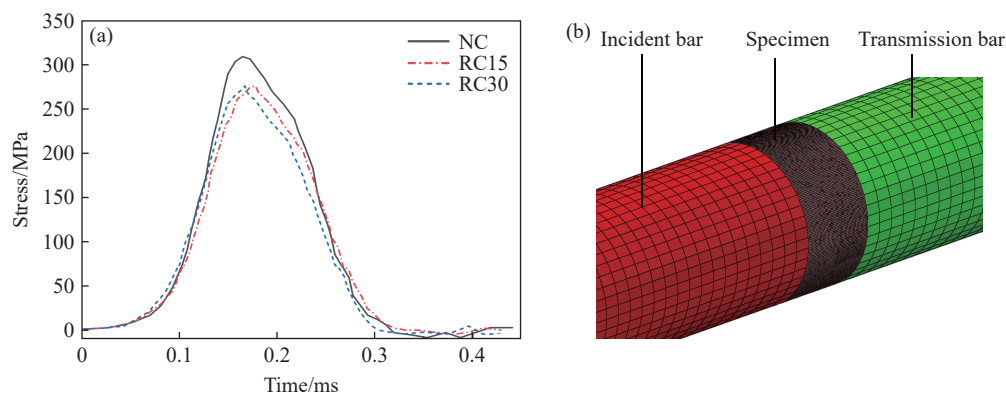


图 8 (a) NC、RC15 和 RC30 的加载曲线以及 (b) SHPB 数值模型

Fig. 8 (a) Loading curves of NC, RC15 and RC30 and (b) numerical model of SHPB

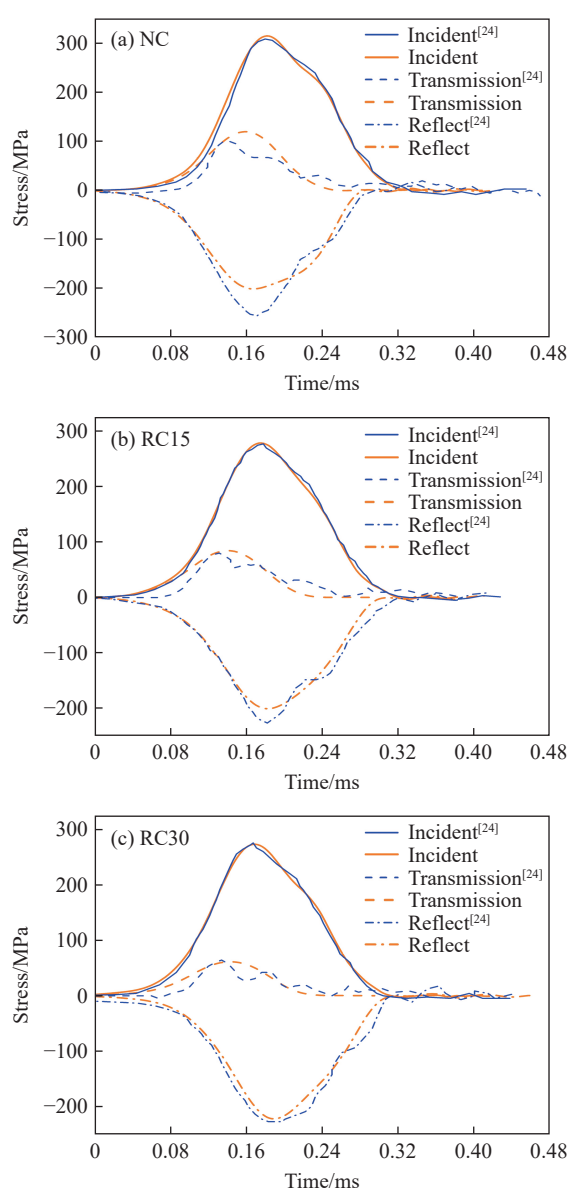


图 9 SHPB 杆内应力时程曲线对比

Fig. 9 Comparison of stress-time curves within the SHPB bars

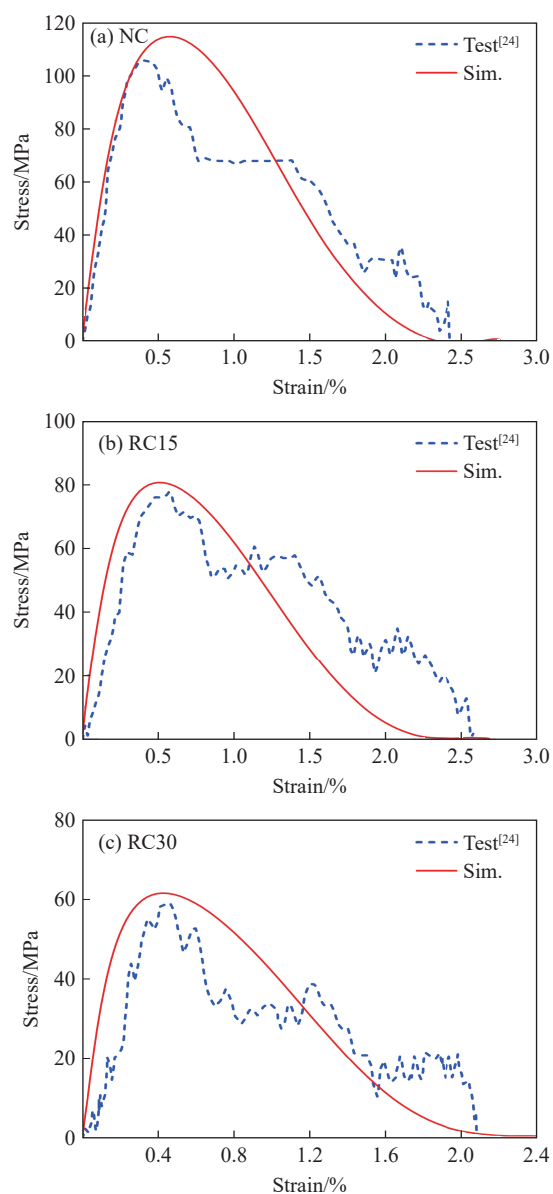


图 10 应力-应变曲线对比

Fig. 10 Comparison of stress-strain curves

2 冲击荷载下的数值模拟

2.1 振动频率与波能集中频带

谐振器受迫振动是超材料混凝土激发其动态优势的关键,因此,可将超材料混凝土的带隙等效为谐振器内核的振动频率范围,该范围虽受谐振器自身几何因素和物理因素的影响,但是为带隙的主观调控提供可能。

冲击荷载下,应力波按一定频率在试件内传递,使波能在特殊频率范围内聚集,该频率范围称为波能集中频带。快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)可将时程曲线在频域内形成新的幅值分布,为波能集中频带可视化提供方法。能量在波能集中频带内聚集是试件破坏隐患,而超材料混凝土在带隙内拥有良好的吸能表现,因此,将谐振器内核振动频率调控至波能集中频带内,实现带隙与波能集中频带同频,可最大限度地发挥超材料混凝土的动态性能优势。

如图 11 所示,建立尺寸为 30 mm×30 mm×240 mm 的普通混凝土试件,在其左侧施加冲击荷载,如图 6(a) 所示,提取试件中部横截面平均应力时程曲线,经 FFT 转换后,波能集中频带为 7~9 kHz,该范围为谐振器的主观设计提供依据。

如图 12(a) 所示,建立尺寸为 30 mm×30 mm×30 mm 的超材料混凝土单胞模型(r_1 和 r_2 分别为内核半径和单胞半径),经网格映射后,单元总数为 6.4×10^4 ,单胞中各组分间均为共节点连接,对基体外表面完全固定,采用 K&C 模型模拟。调整谐振器尺寸及材料属性,对单胞进行多次模态分析,使其振动频率移至 7~9 kHz。经分析,确定谐振器内软涂层厚度和内核直径分别为 1.5 和 15 mm,两者均采用线弹性材料,具体参数如表 2 所示。

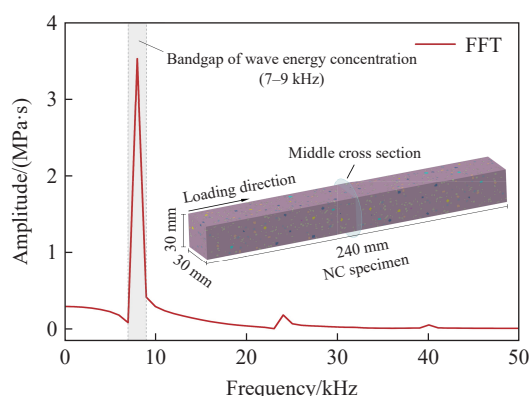


图 11 试件尺寸及波能集中频带示意图

Fig. 11 Schematic diagrams of the specimen size and wave energy concentration bandgap

表 2 谐振器软涂层和内核材料参数

Table 2 Parameters of the resonator soft coating and heavy core

Component	Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Poisson's ratio	Young's modulus/GPa
Soft coating	900	0.49	0.01
Heavy core	7850	0.30	210

提取单胞前四阶模态所对应的固有频率及位移(S)云图,以确定其运动形式。如图 12(b) 所示,一阶和二阶模态分别表现为谐振器内核的转动和振动,三阶和四阶模态则表现为软涂层振动、转动和弯曲的综合状态,其中振动模态所对应的固有频率为 7.92 kHz,落在波能集中频带内。此外,基于图 12(a) 的单胞结构,在 COMSOL Multiphysics 中分析布里渊区^[45]内频率与波矢之间的关系,如图 12(c) 所示,单胞的能带结构绘制于第一布里渊区内^[45],禁止波传播的频率范围为 7.02~7.94 kHz,形成带隙。

需要说明的是,虽然网格映射所产生的尺寸差异使图 12(b) 中的振动频率落于图 12(c) 所示的带隙边缘,但差异的存在同样使内核振动频率更贴近波能集中频带中心,对带隙与波能集中频带的同频具有促进作用,使超材料混凝土的动态性能得以充分地释放。

2.2 数值试件及模拟

如图 13 所示,建立普通混凝土(NC)、橡胶混凝土(RC30)、超材料混凝土(MNC)和橡胶超材料混凝土(MRC30)的数值模型,试件尺寸同图 11,研究不同试件在冲击荷载下的力学响应和动态性能。

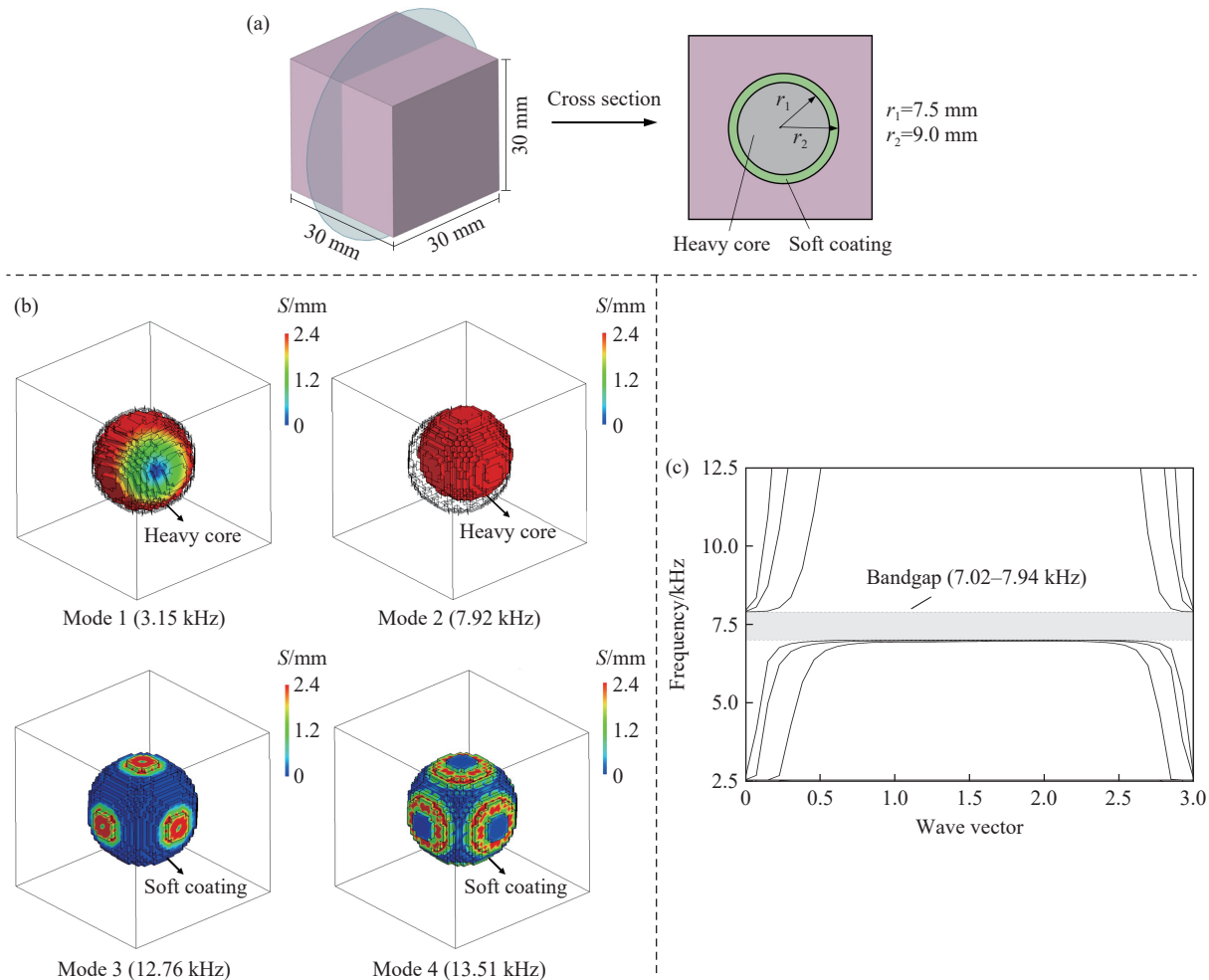


图 12 (a) 单胞尺寸示意图, (b) 谐振器不同模式的固有频率及位移(S)云图, (c) 单胞能带结构

Fig. 12 (a) Schematic diagram of unit cell dimensions; (b) natural frequencies and displacement (S) contour of the resonator's different modes; (c) band structure of the unit cell

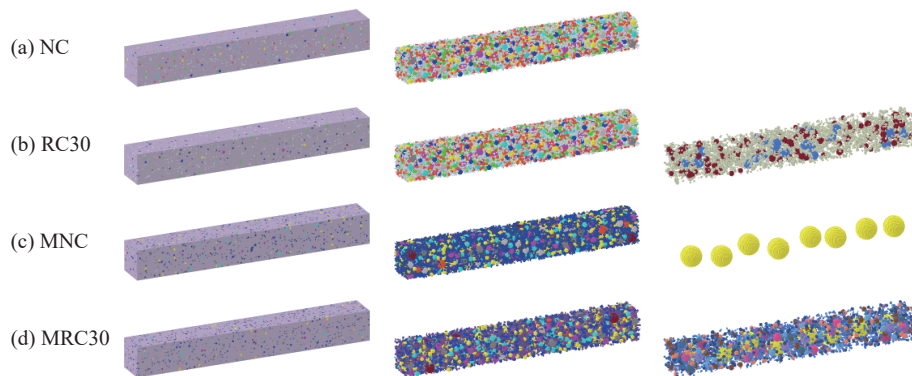


图 13 NC、RC30、MNC 和 MRC30 的数值模型

Fig. 13 Numerical models for NC, RC30, MNC, and MRC30

2.2.1 低幅值荷载

橡胶超材料混凝土作为一种新型抗冲击材料, 在低幅值荷载下对冲击波的衰减及能量耗散表现直接影响其在基础防护结构中应用的可靠性和安全性。因此, 以 SHPB 剥落试验为基础, 简化加载过程, 直接对各试件端面施加低幅值(4 MPa)冲击荷载, 同图 6(a), 提取试件中部横截面的平均应力时程曲线并进行 FFT 转换, 以研究各试件内部应力波的传递及波能集中情况, 结果如图 14 所示。

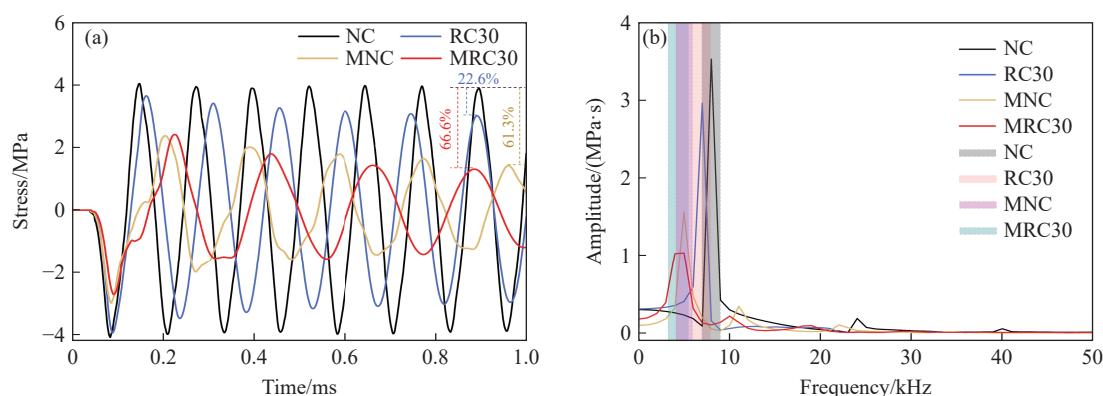


图 14 (a) NC、RC30、MNC 和 MRC30 的应力时程曲线及 (b) FFT 曲线

Fig. 14 (a) Stress-time curves and (b) FFT curves for NC, RC30, MNC, and MRC30

与图 14(a) 中 NC 在 0.8~1.0 ms 时间段内的峰值拉应力相比, RC30、MNC 和 MRC30 在相同时间段内的峰值拉应力分别下降 22.6%、61.3% 和 66.6%, 其中 MRC30 表现出最显著的衰波优势。这表明, 在谐振器和橡胶骨料均能有效衰减荷载应力波的基础上, 将橡胶混凝土与超材料混凝土相结合, 所形成的新型抗冲击材料对应力波的衰减效果得到进一步提升, 体现其动态性能优势。

$$P_{(n)} = \frac{E_c}{E_t} \quad (11)$$

式中: $P_{(n)}$ 为能量占比 ($0 \leq P_{(n)} \leq 1$), E_t 为整个试件的动能与内能之和, E_c 为试件内某一组分的动能与内能之和。

需要特别指出, 尽管橡胶骨料会导致应力波的传递出现一定的“延后效应”, 致使试件内波频发生变化, 如 RC30 的波能集中频带随之“前移”(见图 14(b)), 但是得益于谐振器的主观调控作用, 能量在 MNC 和 MRC30 的波能集中区域均被有效吸收和转移, 尤其在 MRC30 中, 能量仅允许以更低密度的形式聚集, 进一步证明了 MRC30 的动态性能优势。

此外, 各试件在 0.8~1.0 ms 时间段内的峰值拉应力下降率存在差异。与 NC 相比, RC30 的峰值拉应力下降 22.6%, 而 MRC30 与 MNC 之间的差异仅为 8.3%, 表明橡胶骨料对普通混凝土的衰波效果优于超材料混凝土。如图 15 所示, 对不同试件内谐振器和橡胶骨料含能进行归一化处理(见式 (11)), 结果表明, 橡胶骨料对谐振器吸能效率的影响较小(图 15(a)), 但谐振器的加入使橡胶骨料的含能占比明显降低(图 15(b)), 说明 MRC30 中谐振器与橡胶骨料的衰波效果并非线性叠加, 两者的共存对橡胶骨料的衰波能力产生消极影响。综合分析表明, 橡胶骨料在 MRC30 内的衰波效果不可忽视, 在材料动力学性能提升中发挥重要作用。

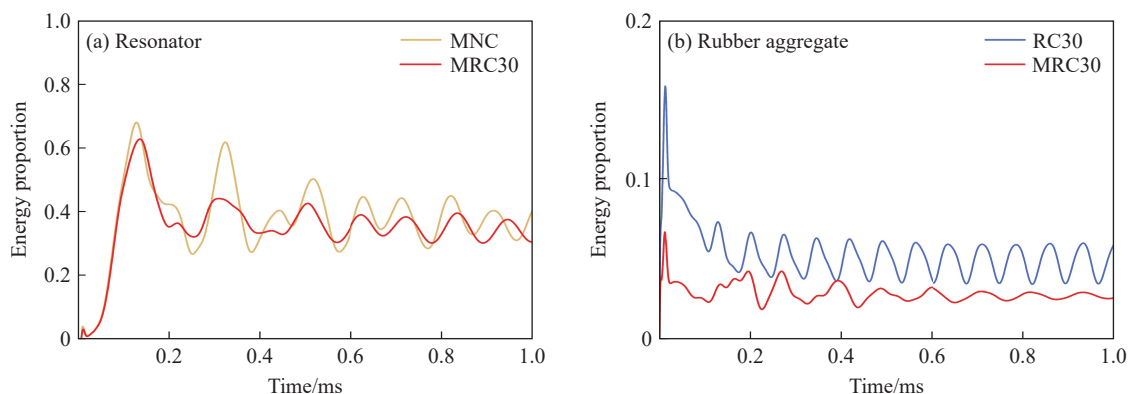


图 15 试件内不同组分的能量占比

Fig. 15 Energy proportion among different components of specimens

2.2.2 高幅值荷载

MRC30 在低幅值冲击荷载下已初步展现其动态性能优势,但在军用爆炸等领域,尤其是面对战略武器爆炸时产生的高幅值冲击波,防护结构将遭受重大威胁。为研究 MRC30 在高幅值冲击荷载下的力学响应,以图 6(a) 中的荷载为参照,在保持其持续时间不变的前提下,将峰值应力提升至 20 MPa,输出各试件在 1.0 ms 时的损伤因子(δ)和最大主应变(maximum principal strain, MPS)云图,分别表征其损伤区域和损伤程度。损伤因子 $\delta=2\lambda/(\lambda+\lambda_m)$ ^[27],其中: λ 和 λ_m 分别为累积应变和最大承受应变,如图 16 所示。

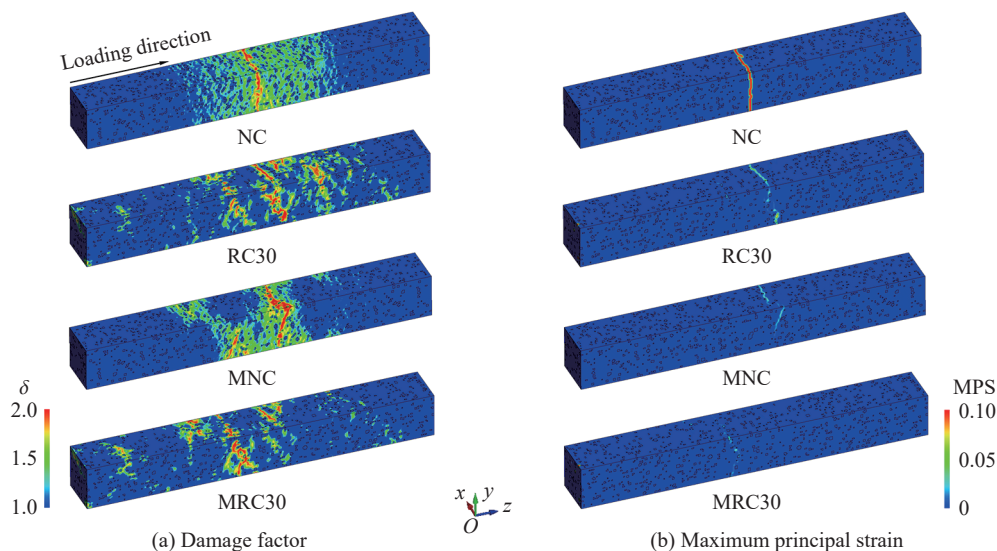


图 16 1.0 ms 时不同试件的损伤情况

Fig. 16 Damage of different specimens at 1.0 ms

从图 16(a) 可以看出, RC30 的损伤形式不同于 NC 的脆性损伤,其损伤区域较为“分散”,表明能量在试件内部耗散,使损伤区域呈现出明显的扩展趋势。如图 16(b) 所示, RC30 的损伤区域虽因能量分耗而扩展,但其损伤程度远低于 NC,体现橡胶骨料在抑制裂纹持续扩展方面的积极作用。MRC30 的损伤区域不仅拥有 RC30 的损伤特征,还保留了 MNC 的低损伤程度特性,继承了橡胶混凝土和超材料混凝土的动态性能优势,实现了抗冲击性能的进一步提升。

冲击荷载作用下,不同试件的中截面平均应力时程曲线如图 17 所示。与图 14(a) 对比,应力传播呈现明显的非周期性特征,这是由于试件内部损伤导致波能被消耗,应力传播路径受阻,进而使应力曲线出现幅值下降、周期缩短、振荡频繁等现象。根据试件损伤因子云图以及图 17 中应力幅值的变化情况, NC、RC30、MNC 和 MRC30 的破坏时刻以虚线标出,分别为 0.43、0.20、0.54 和 0.26 ms,其中,由于橡胶含量与试件强度呈负相关, RC30 和 MRC30 的破坏时刻相对靠前。通常而言,试件破坏时刻的提前意味着损伤程度的加剧,但是结合图 16(b) 中各试件的损伤程度可以看出, RC30 和 MRC30 并不遵循这一规律。

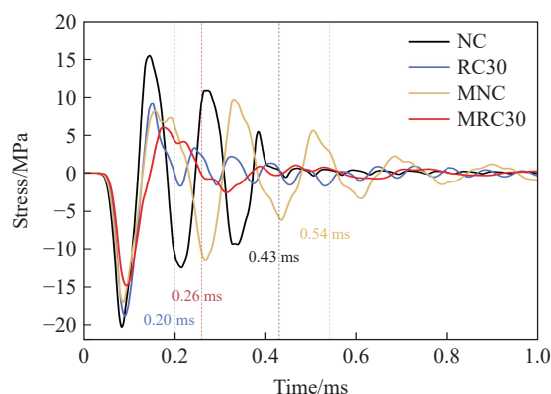


图 17 不同试件的应力时程曲线

Fig. 17 Stress-time curves of different specimens

不同时刻 NC 和 RC30 损伤区域的最大主应变云图如图 18 所示,其中, NC 的形变过程保持脆性特征,自 0.43 ms 形成横断破坏后,其损伤程度随时间的推移而逐渐加剧。与此不同, RC30 在 0.20 ms 发生横断破坏后,损伤程度随时间的推移而逐渐降低,这是由于裂纹在脆性基质内扩展时,橡胶骨料虽然

在试件开裂过程中产生极大形变,但是超弹性特征使其难以产生塑性损伤,具有恢复形变的能力,橡胶骨料抑制裂纹的持续扩张,致使试件的损伤程度降低。

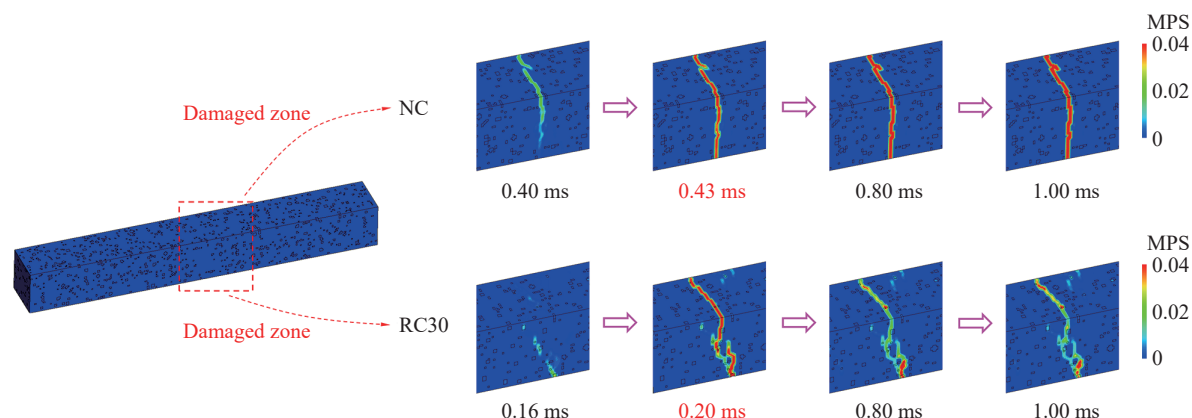


图 18 不同时刻 NC 和 RC30 的最大主应变云图

Fig. 18 Maximum principal strain contours of NC and RC30 at different time

图 19 显示, MRC30 在 0.26 ms 发生破坏后同样出现损伤程度降低的现象,说明橡胶骨料对超材料混凝土的韧性提升也起到积极作用。此外,由于谐振器采用线弹性材料,使 MNC 在一定程度上抑制损伤程度的加剧,并且抑制效果可在 MRC30 中与橡胶骨料的作用相叠加,从而进一步改善 MRC30 的韧性和功能完整性,提升其抗爆炸冲击能力。

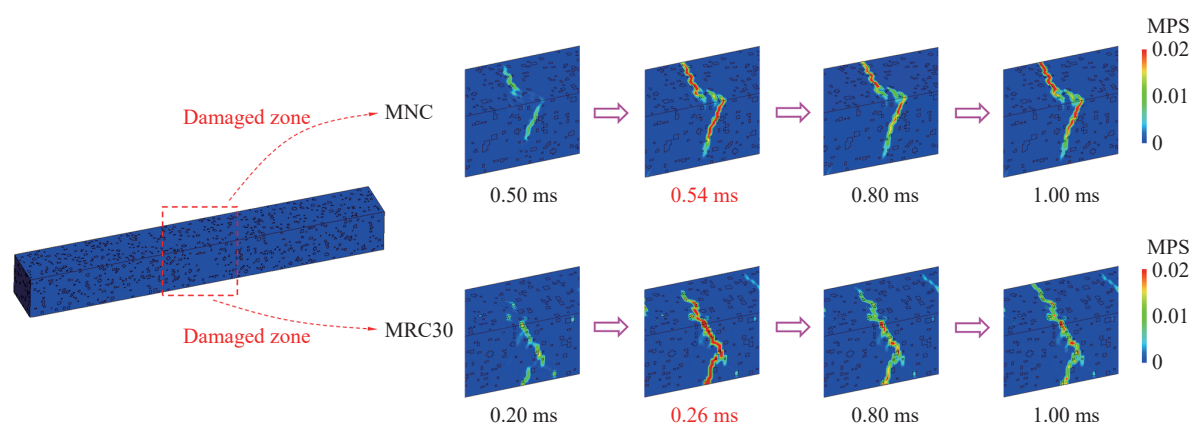


图 19 不同时刻 MNC 和 MRC30 的最大主应变云图

Fig. 19 Maximum principal strain contours of MNC and MRC30 at different time

3 参数分析

橡胶骨料对类混凝土的动态性能提升具有积极作用,本研究将对橡胶骨料的几何参数和物理参数进行分析,以揭示橡胶骨料的含量和粒径对橡胶超材料混凝土动态性能的影响,为确定橡胶骨料在橡胶超材料混凝土中的最佳含量和最优粒径提供依据。

3.1 橡胶骨料含量

为研究橡胶骨料含量对橡胶超材料混凝土动态性能的影响,新增 MRC15 和 MRC45 试件,其天然骨料替换率分别为 15% 和 45%。参考前述方法,将冲击荷载的峰值应力提升至 30 MPa,输出不同试件的损伤因子和最大主应变云图,如图 20 所示。

如图 20(a) 所示,橡胶骨料有效地使谐振器周围区域形成“分散”损伤效应,且损伤区域的“分散性”与橡胶含量呈正相关。从图 20(b) 可以看出,尽管 MRC15、MRC30 和 MRC45 的损伤程度均低于 MNC,

但橡胶超材料混凝土的损伤程度与橡胶含量之间并无明显规律,说明橡胶含量与试件强度之间的负相关性在一定程度上对试件的损伤程度造成影响,形成“韧性上升”与“强度下降”之间的冲突。

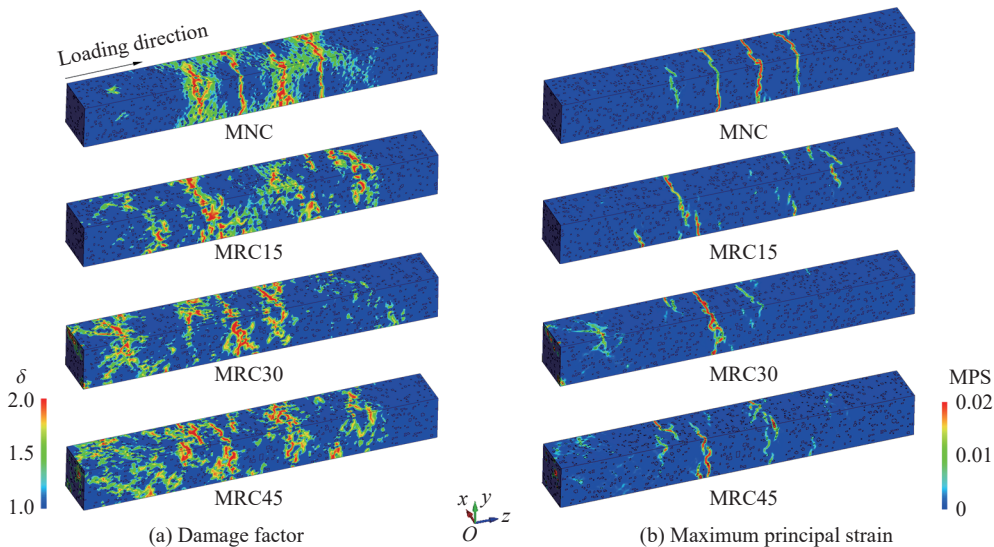


图 20 不同橡胶含量的超材料混凝土损伤

Fig. 20 Damage of metaconcrete with varying rubber contents

不同试件的纵截面损伤因子云图如图 21 所示。随着强度的下降, MRC30 和 MRC45 内部加载端出现不同程度的损伤, 其中 MRC45 的中部区域甚至出现局部破坏, 如图 21 中红色虚线框选区域所示, 说明“强度”在试件整体损伤中占主导地位。相较之下, MRC15 在保持较低损伤程度的同时, 损伤区域并未明显扩展, 在韧性与强度之间达到平衡。因此, 建议将超材料混凝土中天然骨料总体积的 15%~30% 替换为橡胶骨料, 以优化其动态力学性能, 提升抗冲击能力。

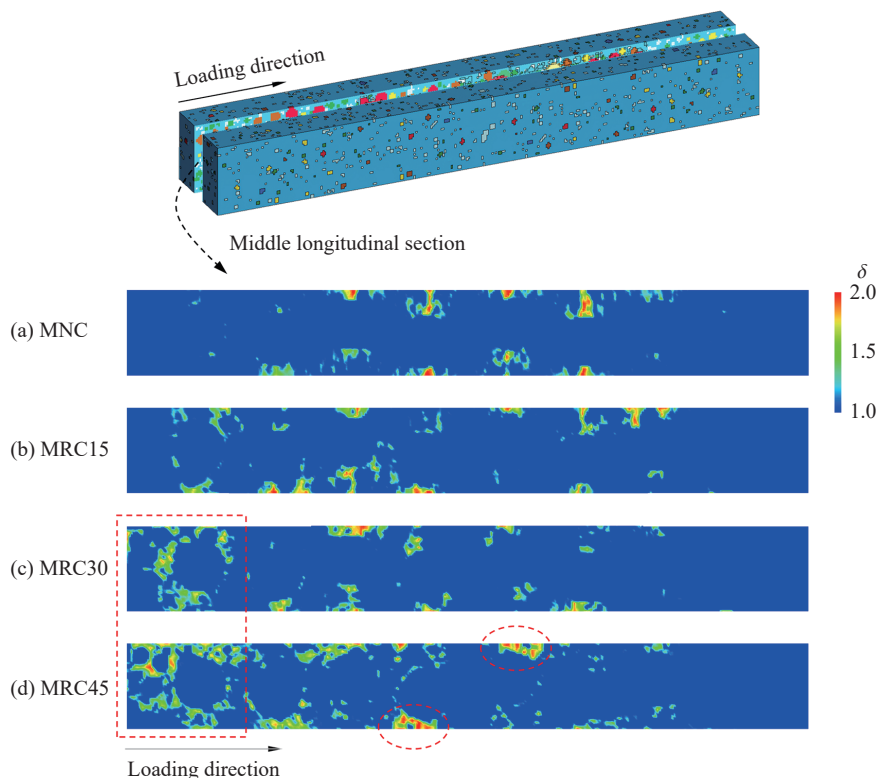


图 21 不同橡胶含量的超材料混凝土中部纵截面损伤云图

Fig. 21 Damage contour of the longitudinal cross-section at the center of metaconcrete with different rubber contents

3.2 橡胶骨料粒径

为研究橡胶骨料粒径对橡胶超材料混凝土动态性能的影响,选取 3.1 节中动态性能较优异的 MRC15 作为研究对象。如图 22 所示,在橡胶骨料体积分数不变的前提下,将其粒径分别控制为 8、5 和 2 mm,并依次命名为 MRC15b、MRC15m 和 MRC15s。对含不同橡胶粒径的试件施加与 3.1 节相同的冲击荷载,输出其损伤因子和最大主应变云图,如图 23 所示。

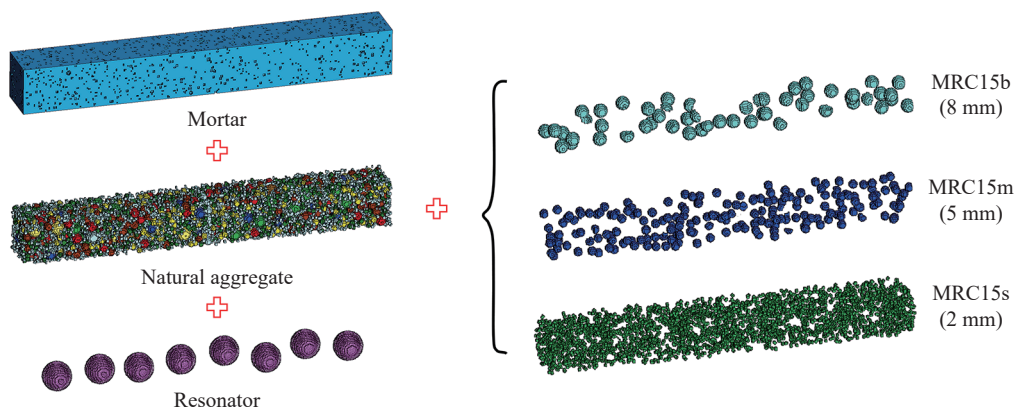


图 22 含不同橡胶骨料尺寸的超材料混凝土数值模型示意图

Fig. 22 Schematic diagram of the numerical model of metaconcrete with different rubber aggregate sizes

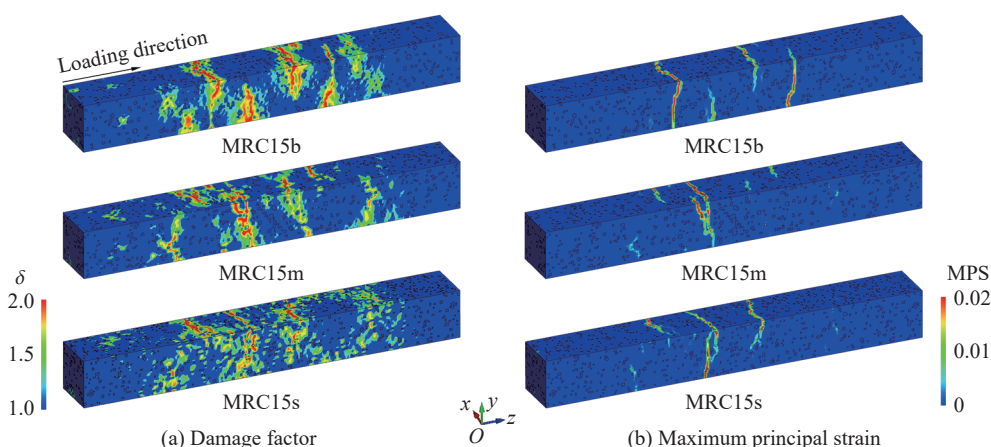


图 23 含不同橡胶骨料尺寸的超材料混凝土的损伤

Fig. 23 Damage of metaconcrete with varying rubber aggregate sizes

损伤区域的“分散性”作为类橡胶混凝土的损伤特征,对试件的损伤程度具有抑制作用。如图 23(a)所示,在相同体积含量下,MRC15s 内橡胶骨料的数量优势使其表面损伤区域明显“分散”,表明橡胶骨料的密集分布有助于抑制损伤扩展,但数量差异造成的骨料分布不均同样导致试件的局部强度发生变化。如图 23(b)所示,MRC15b 的骨料密集度较低,导致损伤区域的韧性下降,损伤程度加剧;MRC15s 的骨料密集分布,但局部强度较低,损伤程度较大;而 MRC15m 则通过适中的橡胶粒径实现了骨料密集度与局部强度之间的相对平衡,使损伤程度降至三者中最低。

MRC15b 和 MRC15s 中由于橡胶粒径相差较大,导致其内部骨料分布的疏密程度存在一定差异,出现不同程度的塑性损伤,如图 24 中红色虚线框所示。因此,对于橡胶含量已确定的橡胶超材料混凝土,动态调控橡胶粒径,使橡胶超材料混凝土在局部强度与韧性之间达到平衡,是提升其抗冲击性能的关键所在。

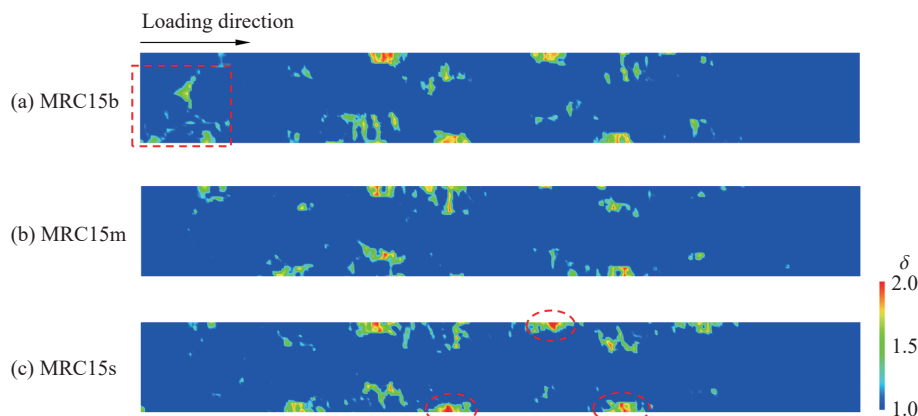


图 24 不同橡胶粒径试件中部纵截面损伤因子云图

Fig. 24 Damage contour of the longitudinal cross-section at the center of metaconcrete with different rubber aggregate sizes

4 结 论

通过在超材料混凝土基质中加入橡胶骨料,探索了一种新型抗冲击复合材料——橡胶超材料混凝土,利用有限元软件建立其细观数值模型,研究了冲击荷载下其动态性能优势,得到如下主要结论。

(1) 橡胶骨料的加入有效地增强了超材料混凝土的衰波能力,对其动态性能的提升有积极作用。

(2) 橡胶材料的超弹性使类橡胶混凝土的损伤区域呈现“分散”特征,既降低了损伤程度,又提升了韧性和功能完整性。

(3) 橡胶含量与试件强度的负相关性导致试件的损伤程度与橡胶含量之间呈现非线性关系,建议将骨料总体积的 15%~30% 替换为橡胶骨料,以提升试件的抗冲击性能。

(4) 在橡胶体积含量确定的情况下,其粒径变化造成“局部强度”与“韧性”的对立,需要从宏观上调控橡胶骨料粒径对试件整体动态性能的影响,平衡骨料分布与损伤程度之间的关系,以确定橡胶骨料的最终应用粒径。

参考文献:

- [1] HERNÁNDEZ-OLIVARES F, BARLUENGA G, BOLLATI M, et al. Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(10): 1587–1596.
- [2] LI G Q, STUBBLEFIELD M A, GARRICK G, et al. Development of waste tire modified concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(12): 2283–2289.
- [3] TOPÇU I B, AVCULAR N. Analysis of rubberized concrete as a composite material [J]. *Cement and Concrete Research*, 1997, 27(8): 1135–1139.
- [4] ELDIN N N, SENOUCI A B. Observations on rubberized concrete behavior [J]. *Cement, Concrete and Aggregates*, 1993, 15(1): 74–84.
- [5] TOPÇU I B. The properties of rubberized concretes [J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(2): 304–310.
- [6] TOUTANJI H A. The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates [J]. *Cement and Concrete Composites*, 1996, 18(2): 135–139.
- [7] ZHENG L, HUO X S, YUAN Y. Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(5): 939–947.
- [8] SEGRE N, JOEKES I. Use of tire rubber particles as addition to cement paste [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(9): 1421–1425.
- [9] XUE J, SHINOZUKA M. Rubberized concrete: a green structural material with enhanced energy-dissipation capability [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 42: 196–204.
- [10] LIU Z Y, ZHANG X X, MAO Y W, et al. Locally resonant sonic materials [J]. *Science*, 2000, 289(5485): 1734–1736.

- [11] MITCHELL S J. Metaconcrete: engineered aggregates for enhanced dynamic performance [D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2016.
- [12] 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): 063301.
ZHANG E, LU G Y, YANG H W, et al. Band gap features of metaconcrete and shock wave attenuation in it [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(6): 063301.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] KETTENBEIL C, RAVICHANDRAN G. Experimental investigation of the dynamic behavior of metaconcrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 111: 199–207.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] FENG W H, CHEN B Y, YANG F, et al. Numerical study on blast responses of rubberized concrete slabs using the Karagozian and Case concrete model [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 33: 101610.
- [20] THILAKARATHNA P S M, BADUGE K S K, MENDIS P, et al. Mesoscale modelling of concrete: a review of geometry generation, placing algorithms, constitutive relations and applications [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 231: 106974.
- [21] OLLIVIER J P, MASO J C, BOURDETTE B. Interfacial transition zone in concrete [J]. *Advanced Cement Based Materials*, 1995, 2(1): 30–38.
- [22] WRIGGERS P, MOFTAH S O. Mesoscale models for concrete: homogenisation and damage behaviour [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2006, 42(7): 623–636.
- [23] CHEN G, HAO Y F, HAO H. 3D meso-scale modelling of concrete material in spall tests [J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(6): 1887–1899.
- [24] PHAM T M, CHEN W S, KHAN A M, et al. Dynamic compressive properties of lightweight rubberized concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 238: 117705.
- [25] CUI J, HAO H, SHI Y C. Numerical study of the influences of pressure confinement on high-speed impact tests of dynamic material properties of concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 171: 839–849.
- [26] PAN L, HAO H, CUI J, et al. Numerical study on dynamic properties of rubberised concrete with different rubber contents [J]. *Defence Technology*, 2023, 24: 228–240.
- [27] MALVAR L J, SIMONS D. Concrete material modeling in explicit computations [C]//Proceedings of Workshop on Recent Advances in Computational Structural Dynamics and High Performance Computing. Vicksburg: USAE Waterways Experiment Station, 1996: 165–194.
- [28] ZHOU R X, SONG Z H, LU Y. 3D mesoscale finite element modelling of concrete [J]. *Computers & Structures*, 2017, 192: 96–113.
- [29] ZHOU R X, LU Y. A mesoscale interface approach to modelling fractures in concrete for material investigation [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 608–620.
- [30] CUI J, HAO H, SHI Y C. Discussion on the suitability of concrete constitutive models for high-rate response predictions of RC structures [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 1016: 202–216.
- [31] CRAWFORD J E, WU Y C, MAGALLANES J M, et al. The importance of shear-dilatancy behaviors in RC columns [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2013, 4(3): 341–377.
- [32] ABEDINI M, ZHANG C W. Performance assessment of concrete and steel material models in LS-DYNA for enhanced numerical simulation, a state of the art review [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2021, 28(4): 2921–2942.
- [33] CUI J, HAO H, SHI Y C. Study of concrete damage mechanism under hydrostatic pressure by numerical simulations [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 160: 440–449.
- [34] MALVAR L J, CRAWFORD J E, WESEVICH J W, et al. A plasticity concrete material model for DYNA3D [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(9/10): 847–873.
- [35] MOONEY M. A theory of large elastic deformation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1940, 11(9): 582–592.

- [36] RIVLIN R S, SAUNDERS D W. Large elastic deformations of isotropic materials VII. experiments on the deformation of rubber [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1951, 243(865): 251–288.
- [37] AYHAN B, LALE E. Modeling strain rate effect on tensile strength of concrete using damage plasticity model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2022, 162: 104132.
- [38] LI Q M, MENG H. About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(2): 343–360.
- [39] ERZAR B, FORQUIN P. Experiments and mesoscopic modelling of dynamic testing of concrete [J]. *Mechanics of Materials*, 2011, 43(9): 505–527.
- [40] GROTE D L, PARK S W, ZHOU M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: I. experimental characterization [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(9): 869–886.
- [41] Federation Internationale du Beton. FIB model code for concrete structures 2010 [M]. Berlin: Ernst & Sohn, 2013.
- [42] HAO Y, HAO H, ZHANG X H. Numerical analysis of concrete material properties at high strain rate under direct tension [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 39(1): 51–62.
- [43] HAO Y F, HAO H. Numerical evaluation of the influence of aggregates on concrete compressive strength at high strain rate [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2011, 2(2): 177–206.
- [44] Standards Australia Committee on Methods of Testing Concrete. Methods of testing concrete: method 2: preparation of concrete mixes in the laboratory: AS 1012.2—1994 [S]. Australia, 1994.
- [45] VALAPPIL S V, ARAGÓN A M, GOOSEN H. Phononic crystals' band gap manipulation via displacement modes [J]. *Solid State Communications*, 2023, 361: 115061.

Numerical Simulation of Rubberized Metaconcrete under Impact Load

ZHOU Rongxin, LIU Ye

(School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230000, Anhui, China)

Abstract: To enhance the dynamic performance of existing concrete-like materials, rubber aggregates were incorporated into a metaconcrete matrix to create a novel impact-resistant material, and the dynamic response of its mesoscopic mechanical model under impact load was simulated. Initially, the content, gradation, distribution, and appropriate material models of the specimen components were systematically calibrated and validated. Subsequently, the wave-damping capacity and the interaction patterns of the components in rubber-based metaconcrete under impact load were analyzed. In particular, the effect of rubber aggregates on the failure modes, damage zones, and extent of damage in metaconcrete under high-amplitude loads was thoroughly examined, and a parameter analysis of the rubber content and particle size was conducted. The numerical results showed that the addition of the rubber aggregates not only makes the damaged area of the concrete show dispersed characteristics, but also effectively reduces the degree of specimen damage. Rubber aggregates enhance the specimen's toughness and suppress the intensification of damage. However, high rubber content has a detrimental effect on the specimen's strength, and leads to a trade-off between damage suppression and damage exacerbation. To balance these two effects, it is recommended that rubber aggregates make up 15% to 30% of the total volume of aggregates. These findings demonstrate that incorporating rubber aggregates into metaconcrete can significantly improve its dynamic performance, providing a reference for the design and engineering application of impact-resistant materials in the future.

Keywords: impact-resistant materials; rubber; metaconcrete; dynamic behavior; damage; resonator