

文章编号:1006-9941(2025)07-0751-15

混凝土非均质性对 RC 梁冲击响应尺度效应的影响机制

金 浏,吴少雄,张仁波,李 健,杜修力

(北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室,北京 100124)

摘 要: 钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)结构在服役过程中常遭受冲击荷载作用,导致其动力响应十分复杂,往往难以预测。为了系统分析混凝土非均质性这一特征对几何相似 RC 梁冲击响应及尺度效应的影响,基于对照分析的方法,建立了均质 RC 梁(Homogeneity, HMG)与两种非均质 RC 梁(Heterogeneity- I, HTG- I 和 Heterogeneity- II, HTG- II)模型。在冲击荷载作用下分别对比分析位移、冲击力及支反力响应,并进一步从损伤模式、挠度曲线及能量吸收角度探讨其尺度效应的内在机理。研究结果表明,混凝土非均质性这一特征是导致几何相似 RC 梁位移响应产生尺度效应的原因之一,但其对冲击力和支反力响应的影响较小。造成上述现象的内在机理可能是非均质性会引起不同的损伤路径,结合挠度曲线和能量吸收角度分析,进而发现非均质性增强了 RC 梁的局部响应。同时,冲击速度在 $3.6\sim 7.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 内,冲击速度越大,位移响应的尺度效应会越显著。

关键词: 钢筋混凝土梁;非均质性;尺度效应;冲击荷载;损伤模式

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2025066

0 引 言

钢筋混凝土(reinforced concrete, RC)结构在服役过程中常遭受不可预知的冲击荷载,如车辆撞击、落石冲击、爆炸冲击及水流冲击等。对于特殊需求的建筑结构,在进行结构设计时,其抗冲击性能更需精确考虑。尽管原型试验可提供最可靠的结构动力响应数据,但因构件成本高、试验设备受限等因素,往往难以开展。因此,缩尺试验成为研究结构抗冲击性能与动力响应的主要手段^[1-4]。

在结构工程研究中,研究者通常依据一些相似准则理论分析几何相似构件的动力响应^[2-6],其中量纲分析法^[2-4]是缩尺试验中最常用的理论基础。从构件几何相似性出发,可确定缩尺模型与原型的几何长度(长、宽和高)比例,即 $\lambda=l_m/l_p$, m 和 p 分别表示模型和

原型,其中 λ 为尺度因子,根据量纲分析中的 Π 定理,可推导出其他物理量的理论相似比,即经典相似律^[2-4]。然而,在动力学问题中,即便构件的几何尺寸满足经典相似律,但其动力响应的相似性可能会偏离理论相似比^[2-3,7-11]。研究者针对几何相似构件的动力响应进行了大量的试验和模拟。刘艳辉等^[2]研究 $\lambda=1/10$ 的钢管混凝土构件在横向冲击下的跨中位移,发现未开裂前响应基本符合相似律,开裂后最大偏差超过 15%;郑刚等^[7]研究 $\lambda=1/2, 1/4$ 和 $1/8$ 的构件也发现归一化位移随尺寸增大而增大。他们均认为是应变率效应引起不同尺寸构件的动力强度不能很好的遵循相似准则。此外,Wang 等^[8]和刘子超等^[9]在爆炸荷载作用下,研究了几何相似 RC 板的挠度及损伤响应,Zhang 等^[10]研究了几何相似 RC 梁的跨中位移响应,均表明几何相似构件的损伤模式保持一致,但损伤程度与位移响应并不完全遵循经典相似律。当构件系统在严格满足几何相似比 λ 的条件下,其动力学行为与经典相似律系统产生偏离,称几何相似构件的动力响应存在尺度效应现象^[7-11]。总而言之,探究构件动态响应产生尺度现象的主要原因依旧是有待深入研究的复杂问题。

研究混凝土在动力荷载下的力学性能时,通常将其简化为均质材料进行分析,这是为了降低模型复杂

收稿日期:2025-04-15;修回日期:2025-05-12

网络出版日期:2025-07-03

基金项目:国家自然科学基金(52308130);北京市自然科学基金(JQ22025)

作者简介:金浏(1985-),男,教授,主要从事混凝土结构防灾减灾研究。e-mail: jinliu@bjut.edu.cn

通信联系人:张仁波(1989-),男,副研究员,主要从事混凝土结构多灾效应研究。e-mail: zhangrenbo99@126.com

引用本文:金浏,吴少雄,张仁波,等.混凝土非均质性对 RC 梁冲击响应尺度效应的影响机制[J].含能材料,2025,33(7):751-765.

JIN Liu, WU Shao-xiong, ZHANG Ren-bo, et al. Influence Mechanism of Concrete Heterogeneity on Scaling Effect of RC Beam Impact Response[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(7):751-765.

度并提高计算效率,但这一假设忽略了混凝土实际存在的非均质性特征,可能限制了对其实力学行为的深入理解。因此,考虑混凝土非均质性的细观模型已广泛用于模拟其力学响应。在细观层面,混凝土由粗骨料、砂浆及界面过渡区(interface transition zone, ITZ)组成,其裂缝萌生、扩展及断裂等损伤演化行为可通过细观模型有效捕捉与预测^[12-13]。也就是说,混凝土及其组分在受力过程中的裂纹演化与破坏模式可通过细观建模进行合理呈现^[14-15]。Cui等^[16]研究了初始缺陷分布对混凝土力学性能的影响,模拟不同初始裂缝以反映实际试样的初始缺陷,结果显示峰值强度在13.1~16.7 MPa之间呈现明显离散性。进一步分析表明,这种离散性源于混凝土内部结构的非均质性,包括骨料的形状、尺寸与分布的随机性^[17],以及ITZ强度的差异^[18]。

混凝土作为典型非均质复合材料,其内部组成和结构的随机性导致其力学性能呈现出明显的各向异性与尺寸依赖性。尽管现有研究已关注到非均质性对混凝土准静态性能的影响规律^[19-21],但在冲击荷载作用下,这种细观非均质性如何影响结构动力响应,特别是与几何尺寸耦合的交互作用机制,仍是当前固体力学领域的认知盲区。因此,本研究构建了均质模型(Homogeneity, HMG)和两种非均质模型(Heterogeneity-I, HTG-I和Heterogeneity-II, HTG-II),系统对比了不同尺寸RC梁在冲击作用下的位移、冲击力和支反力响应,并从损伤模式、挠度曲线和能量吸收方面探索其内在的机理。该发现不仅为修正经典相似理论提供了理论依据,同时为缩尺冲击试验设计、抗冲击结构多尺度优化等工程实践提供理论参考。

1 有限元模型建立与试验验证

1.1 非均质RC梁模型

在细观层面上,混凝土是由砂浆基质、粗骨料以及ITZ组成的三相复合材料^[22]。其中,砂浆基质是由混凝土中的添加剂、砂以及粒径小于5 mm的粗骨料混合而成。本研究采用随机骨料模型^[22]来生成与实际混凝土结构相似的非均质RC梁模型。根据Naderi等^[19]的研究,骨料形状对混凝土材料静态应力-应变曲线软化段的影响较小。因此,为了提高模型的计算效率,本研究假设骨料为随机分布的球体,采用经典的“取-放”方法将骨料放入砂浆基质中,同时保证骨料之间不发生重叠^[23-24]。此外,骨料的粒径分布根据Fuller曲线^[25]确定,从而得到密实的混凝土结构。

ITZ实质上是砂浆基质与骨料之间的薄弱层,实际厚度约为50 μm ^[20],根据Jin等^[26]及Song和Lu^[27]的研究,当ITZ的厚度处于0.5~2 mm范围内时,应力-应变曲线的峰值应力基本保持一致。本研究在考虑计算效率和结果精度的前提下,采用2 mm作为ITZ的厚度。

基于Fujikake等^[28]开展的落锤冲击试验,本研究设计了基准RC梁模型。基准梁的尺寸为1700 mm×150 mm×250 mm(长×宽×高);梁的配筋采用对称布置,底部和顶部各使用两根D16的纵向钢筋,配筋率为1.26%;箍筋采用D10钢筋,箍筋间距75 mm,配箍率为1.39%;落锤形状为圆柱形。如图1所示,采用有限元软件ABAQUS并使用Fortran语言程序建立非均质的RC梁模型。在模型中,RC梁与垫块之间通过“Tie”进行绑定约束;约束落锤仅能沿竖直方向运动,并设置落锤与梁顶垫块的接触面为“面-面接触”。梁下部的垫块禁止竖向移动,并设置为简支约束;通过“Predefined Field”对落锤赋予初速度;本研究暂忽略钢筋与混凝土之间的相对滑动作用,将钢筋与混凝土之间设置为完好的粘结接触^[29-31]。

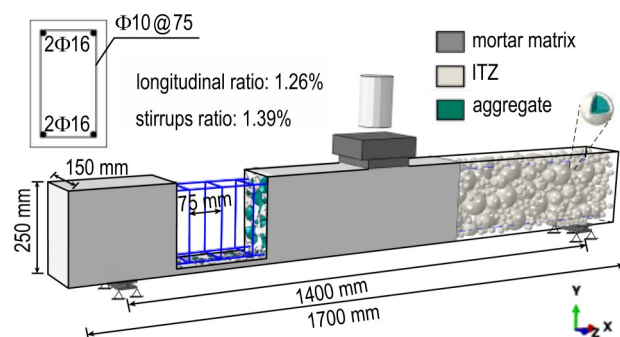


图1 基准梁有限元模型

Fig.1 Finite element model of the reference beam

1.2 材料本构及应变率效应

在混凝土细观层面的研究中,研究者通常采用塑性损伤本构模型^[32]来模拟砂浆基质和ITZ的力学行为^[33]。该模型通过受压损伤因子 d_c 和受拉损伤因子 d_t 来描述混凝土裂缝扩展过程及其引起的刚度退化,单轴加载下的塑性损伤本构曲线如图2a所示。同样,本研究采用塑性损伤模型作为砂浆基质和ITZ的本构模型。由于骨料具有较高的强度,在静力问题下通常将其视为弹性体材料。然而,在较大的荷载加载速率下,骨料可能会发生破碎,裂缝可能会穿过骨料延伸^[34]。因此,按照对ITZ相同的处理方法,将骨料视为力学性能较强的砂浆基质,并同样采用塑性损伤本构来描述骨料的力学行为。为了缓解网格敏感性,本研

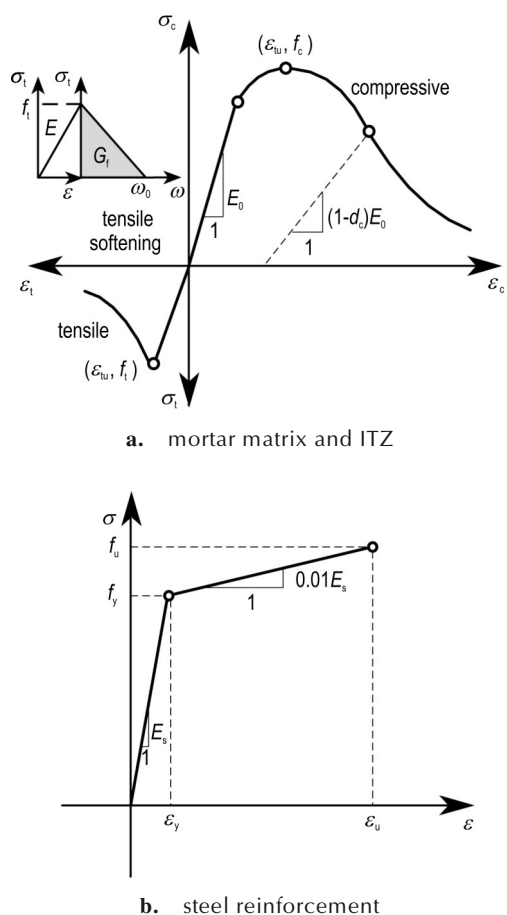


图2 混凝土和钢筋的本构模型

Fig.2 Constitutive models of concrete and steel reinforcement

究采用基于断裂能的线性准则来描述三相材料的拉伸软化行为^[35],最终根据反演法确定各材料的断裂能。

$$CDIF_{agg} = \begin{cases} 0.0187 \lg \dot{\varepsilon}_c + 1.2919, & 1 \text{ s}^{-1} < \dot{\varepsilon}_c \leq 220 \text{ s}^{-1} \\ 1.8547 (\lg \dot{\varepsilon}_c)^2 - 7.9014 \lg \dot{\varepsilon}_c + 9.6674, & 220 \text{ s}^{-1} < \dot{\varepsilon}_c \leq 1000 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

$$TDIF_{agg} = \begin{cases} 0.0598 \lg \dot{\varepsilon}_t + 1.3588, & \dot{\varepsilon}_t \leq 0.1 \text{ s}^{-1} \\ 0.5605 (\lg \dot{\varepsilon}_t)^2 + 1.3871 \lg \dot{\varepsilon}_t + 2.1256, & 0.1 \text{ s}^{-1} < \dot{\varepsilon}_t \leq 50 \text{ s}^{-1} \\ 6.1, & \dot{\varepsilon}_t > 50 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

钢筋的 DIF 增强因子公式采用 Malvar^[41]的研究:

$$DIF_s = \left(\dot{\varepsilon}_s / 10^{-4} \right)^{0.074 - 0.04f_y/414} \quad (5)$$

式中, DIF_s 表示钢筋的动力增强系数; $\dot{\varepsilon}_s$ 为钢筋的动态应变率; f_y 为钢筋的屈服强度, MPa。

在模型中, 垫块和落锤等其他部件被视为刚性体, 且不考虑应变率敏感性。

1.3 模型验证

1.3.1 混凝土强度验证

本研究旨在探究混凝土非均质性对几何相似 RC

钢筋材料被视为线弹性材料, 并采用双折线本构描述其力学行为^[29,36], 如图 2b 所示。落锤和垫块等部件则采用弹性材料本构模型。

混凝土和钢筋材料均具有应变率敏感性^[37], 因此需讨论应变率对混凝土细观三相材料和钢筋力学参数的影响。许多研究表明, 混凝土强度对应变率的敏感性显著高于其他力学参数^[38]。为简化计算, 本研究仅考虑应变率对细观组分的抗压和抗拉强度的增强效应。大多数研究中获得的混凝土动力增强系数 (dynamic increase factor, DIF) 计算模型考虑了结构效应, 可能导致动态强度偏高^[39]。Hao 等^[39-40]根据试验和模拟总结的 DIF 计算模型有效地扣除了惯性约束效应, 对于给定的应变率, 砂浆基质的 DIF 计算公式如式 (1) 所示:

$$CDIF_m = \begin{cases} 0.0419 \lg \dot{\varepsilon}_c + 1.2165, & \dot{\varepsilon}_c \leq 30 \text{ s}^{-1} \\ 0.8988 (\lg \dot{\varepsilon}_c)^2 - 2.8255 \lg \dot{\varepsilon}_c + 3.4907, & \dot{\varepsilon}_c > 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

$$TDIF_m = \begin{cases} 0.26 \lg \dot{\varepsilon}_t + 2.06, & \dot{\varepsilon}_t \leq 1 \text{ s}^{-1} \\ 2 \lg \dot{\varepsilon}_t + 2.06, & 1 \text{ s}^{-1} < \dot{\varepsilon}_t \leq 2 \text{ s}^{-1} \\ 1.4433 \lg \dot{\varepsilon}_t + 2.2276, & 2 \text{ s}^{-1} < \dot{\varepsilon}_t \leq 150 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $CDIF_m$ 和 $TDIF_m$ 分别为砂浆基质的压缩和拉伸强度的动力增强系数; $\dot{\varepsilon}_c$ 表示动态压缩应变率, $\dot{\varepsilon}_t$ 表示动态拉伸应变率; C 和 T 分别表示压缩和拉伸状态。ITZ 同样使用砂浆基质的 DIF 公式。

对于骨料颗粒的 DIF 模型, Hao 等^[39-40]通过消除横向惯性约束效应, 得到了骨料抗压和抗拉强度的动力增强系数 $CDIF_{agg}$ 和 $TDIF_{agg}$, 具体公式如下:

梁动力响应尺度效应的影响。考虑到混凝土非均质性可能在动力作用下对 RC 梁的响应产生显著影响, 并且基于不同的建模方法可能导致混凝土强度不同^[41], 使得对比分析失去意义, 因此, 本研究建立了 3 种 RC 梁模型: 均质 RC 梁模型 (HMG) 作为对照组; 其次, 为研究混凝土非均质性这一特征的影响, 建立考虑混凝土细观三相特征的非均质 RC 梁模型 (HTG)。其中, HTG 进一步细分为两种类型: HTG-I (骨料视为弹性体) 和 HTG-II (赋予骨料塑性损伤本构), 以探究骨料

是否发生破坏对尺度效应的影响。为了控制混凝土非均质性这一变量,避免强度差异的干扰,尺度效应研究需在混凝土强度相同的前提下开展。

参考 Zhang 等^[42]对普通混凝土进行的压缩试验,本研究分别建立了 HMG、HTG- I 和 HTG- II 3 种混凝土立方体模型。通过在垫块顶部施加位移荷载进行单轴压缩,得到趋势相近的应力-应变曲线,以确保混凝土强度相等。试验中,混凝土的密度为 $2403\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,粗骨料使用粒径范围在 $4\sim12\text{ mm}$ 的天然砾石,其他材料参数可参考 Zhang 等^[42]的试验数据。骨料的材料属性根据文献[43-44]确定,ITZ 的材料属性由反演法获得。

首先进行网格敏感性分析,图 3 展示了 3 种混

土模型的应力-应变结果具有较好的网格收敛性,为了兼顾模型计算效率,统一选取 5 mm 网格尺寸。图 4 展示了非均质混凝土立方体破坏时的损伤发展情况,相较于均质混凝土,非均质混凝土立方体破坏时的损伤路径发展更为曲折,而均质混凝土的破坏基本呈对称形态。两者均在混凝土块的边缘中心形成剥落区,这与试验吻合较好。同时,三种建模类型混凝土的应力-应变曲线趋势基本一致,峰值应力的最大误差不超过 3.8% ,证实它们的混凝土强度基本相等^[42]。当满足 3 种混凝土模型的宏观强度近似相等时,混凝土细观组分的具体力学参数见表 1 所示,垫块设为弹性体材料。

1.3.2 低速冲击试验

Fujikake 等^[28]开展的落锤冲击试验中,落锤的下落高度分别为 $0.15, 0.3, 0.6\text{ m}$ 和 1.2 m 。本研究取 0.15 m 和 1.2 m 的试验结果进行验证,对应落锤的冲击速度分别为 $1.72\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $4.85\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。落锤重量为 400 kg ,梁的数值模型如图 1 所示。其中,混凝土的抗

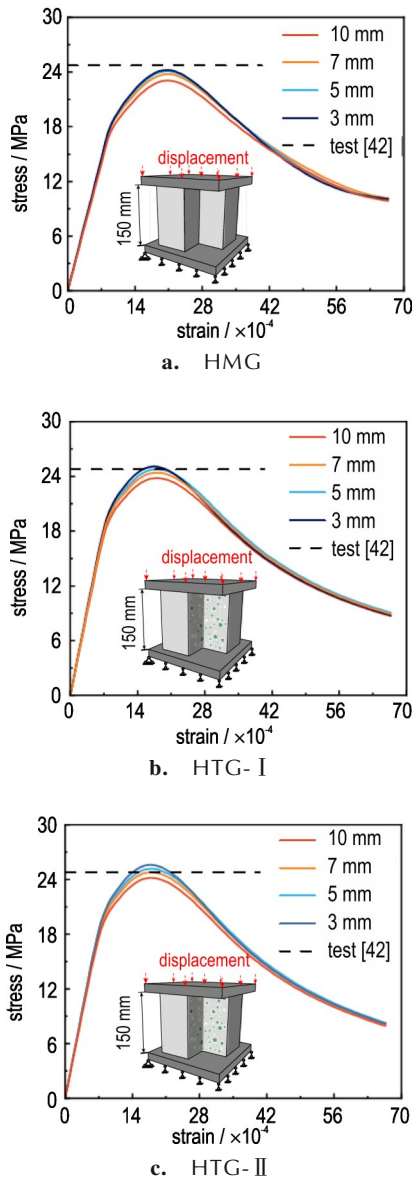


图 3 应力-应变结果的网格敏感性分析
Fig.3 Mesh convergence analysis of stress-strain results

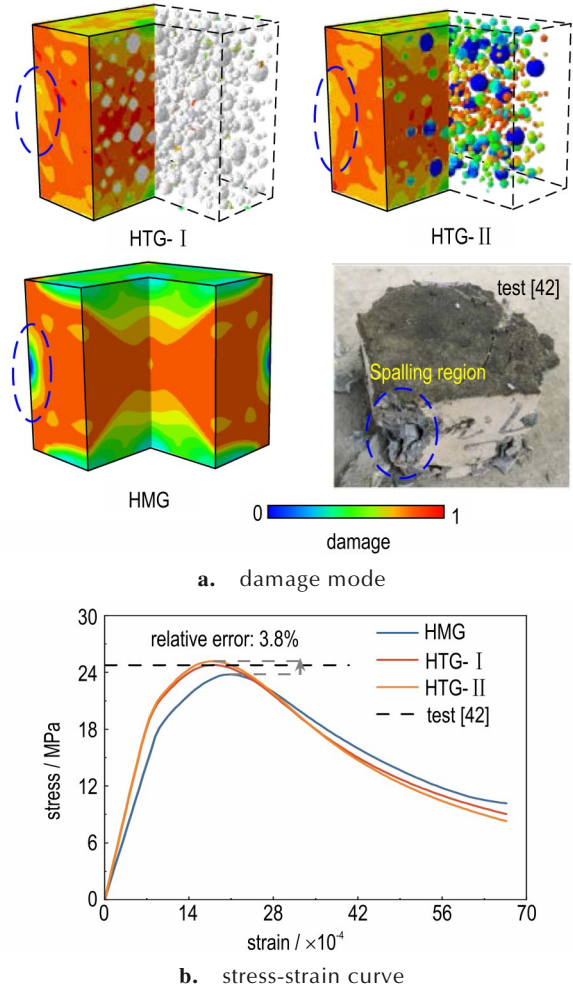


图 4 混凝土立方体强度验证
Fig.4 Verification of cubic strength of concrete

表 1 混凝土的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of concrete

mechanical property	ρ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	E / GPa	f_c / MPa	f_t / MPa	G_f / $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
mortar matrix	2403 ^[42]	21.42 ^[42]	24.96 ^[42]	2.08	90.26
HTG-I ITZ	2150	20.34	18.02	1.80	65.84
aggregate	2750	60 ^[43]	—	—	—
HTG-II aggregate	2750	70 ^[44]	80 ^[44]	6 ^[44]	141.67
HMG	2403 ^[42]	21.42 ^[42]	24.96 ^[42]	2.08	90.26

Note: ρ is density, E is the initial elastic modulus, f_c is the compressive strength, f_t is the tensile strength, G_f is the fracture energy.

压强度为 42.0 MPa,纵向钢筋和箍筋的屈服强度分别为 426 MPa 和 295 MPa。根据 Zhang 等^[45]的研究,砂浆的强度取为宏观混凝土强度,骨料的相关参数参考 Yan 和 Lin^[44]的试验实测值,由于 ITZ 的力学性能弱于砂浆基质^[24],本研究通过折减砂浆基质强度来确定 ITZ 的力学性能参数,当混凝土整体的抗压强度与试验相近时,确定 ITZ 的力学参数信息,如图 5 所示。具体的力学性能参数见表 2 所示。

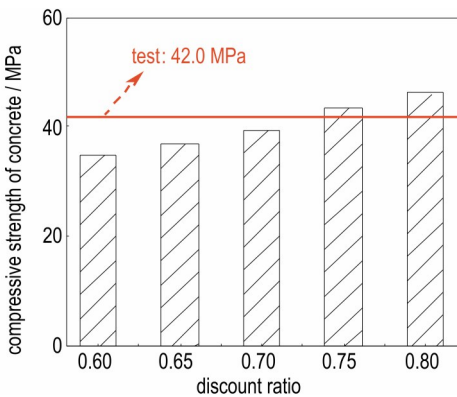


图 5 不同 ITZ 与砂浆基质强度比值下混凝土的强度

Fig.5 Compressive strength of concrete with different ratios of ITZ to mortar

表 2 混凝土细观组分及钢筋的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of meso-component in concrete and steel reinforcement

mechanical property	E / GPa	ν	f_c / MPa	f_t / MPa	f_s / MPa	ρ_s / %
mortar matrix	32.5	0.2	42 ^[28]	4.2	—	—
ITZ	29.8	0.2	31.05	3.05	—	—
aggregate	70 ^[44]	0.16	80 ^[44]	6 ^[44]	—	—
longitudinal reinforcement	200 ^[28]	0.25	—	—	426 ^[28]	1.26
stirrups reinforcement	200 ^[28]	0.25	—	—	295 ^[28]	1.39
hammer and plate	200	0.3	—	—	—	—

Note: E is the initial elastic modulus, ν is the Poisson ratio, f_c is the compressive strength, f_t is the tensile strength, f_s is the yield strength, ρ_s is the reinforcement ratio.

在验证 RC 梁模型之前,进行网格敏感性分析,将混凝土细观组分、落锤和垫块等采用八节点六面体单元(C3D8)进行网格划分,钢筋采用梁单元(B31)。对落锤高度为 1.2 m 的试验工况,采用 6 种不同的网格尺寸进行模拟。如图 6 所示,RC 梁的跨中位移时程曲线具有较好的网格收敛性,综合计算效率和结果精度,最终选取 7 mm 网格尺寸,对于其他尺寸梁网格尺寸的确定方法与试验梁相同,首先确定网格尺寸在结果收敛时的最优尺寸,然后进行仿真计算。

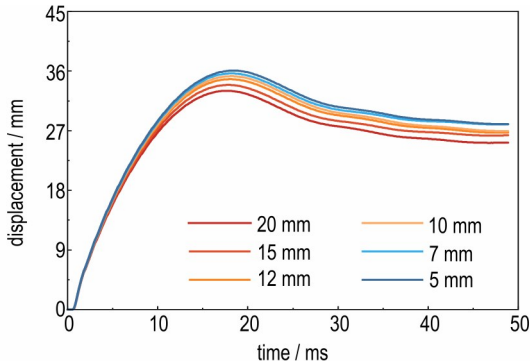


图 6 RC 梁位移结果网格敏感性分析

Fig.6 Mesh convergence analysis of displacement of RC beam

图 7 展示了两种冲击速度下 RC 梁损伤、冲击力时程和跨中位移时程的模拟结果与试验结果的对比。可以发现,在 $1.72 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冲击速度下,模拟的损伤模式主要以弯曲破坏为主,损伤路径由梁底部开始向上延伸,当冲击速度增加到 $4.85 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,RC 梁的模拟损伤模式仍然表现为整体弯曲破坏,损伤路径由梁底开始向冲击点方向扩展。模拟得到的损伤模式整体与试验结果较为吻合。此外,通过对比两种冲击速度下冲击力和位移的时程曲线可以看出,模拟获得的冲击力和位移时程曲线趋势基本与试验保持一致,且数值误差不超过 $\pm 10\%$ 。综上所述,本研究建立的非均质 RC 梁数值模型能够有效预测冲击荷载下的动力响应。

1.3.3 几何相似构件工况设计

本研究中,将基准梁的几何尺寸(长、宽和高)按尺度因子 λ 等比例缩小,得到其他尺寸的几何相似 RC 梁。本研究共设置了 5 个尺度因子:1/5、2/5、3/5、4/5 和 1。对于几何相似 RC 梁,它们的材料属性、配筋率、配箍率以及边界条件均保持一致,箍筋间距根据尺度因子 λ 进行缩放,具体混凝土的材料力学参数见表 1,钢筋的材料力学参数见表 2。表 3 列出了几何相似 RC 梁的尺寸设置,其中 $\lambda=1$ 的数据来源于文献[28],其

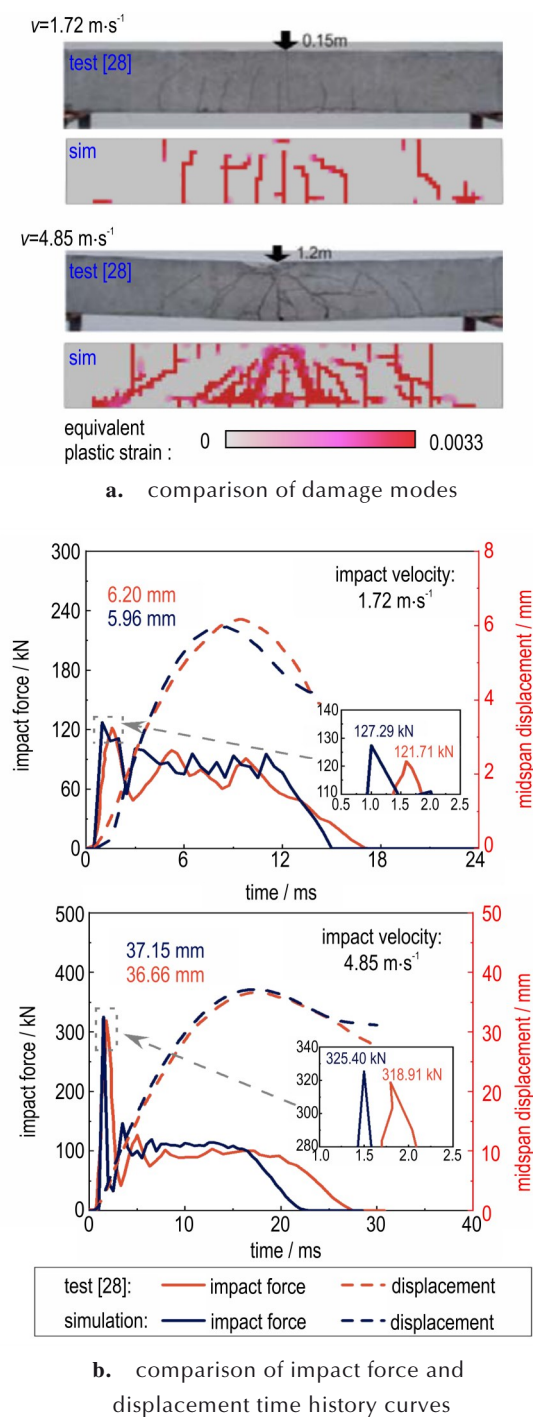


图7 数值模型验证
Fig.7 Validation of numerical models

余按照 λ 进行缩放。冲击速度的设置,设定基于基准梁在静力加载下的能量吸收特性。首先,通过计算基准梁荷载-位移曲线下的积分面积,确定其静力吸能为 $E_0=2662.7\text{ J}$,如图8所示。然后,根据能量守恒定理 $E=0.5\times m\times v^2$ 计算冲击速度,其中冲击质量设定为 100 kg ,对应基准工况的冲击速度为 $v_0=7.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

表3 几何相似RC梁的尺寸细节
Table3 Dimensional details of geometrically similar RC beams

scale factor λ	beam span /mm	beam width /mm	beam height /mm	stirrup spacing /mm
1/5	340	30	50	15
2/5	680	60	100	30
3/5	1020	90	150	45
4/5	1360	120	200	60
1	1700 ^[28]	150 ^[28]	250 ^[28]	75 ^[28]

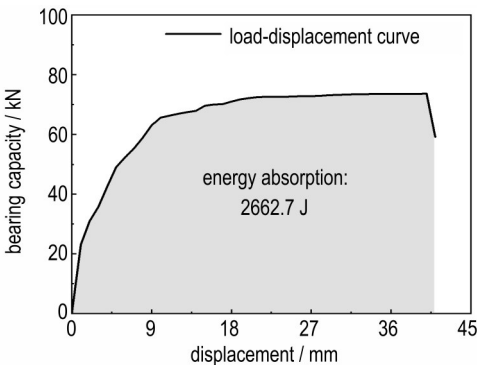


图8 基准梁的静态吸能 E_0
Fig.8 Static energy absorption E_0 of the reference beam

2 冲击响应结果

本研究讨论几何相似RC梁在冲击荷载下的位移、冲击力和支反力响应的尺度效应规律,同时,探讨混凝土非均质性对这些动力响应规律的影响,以揭示其在冲击荷载作用下的作用机制。为确保对比分析的合理性与可比性,所有工况均采用基准梁静态吸能所对应的冲击速度 v_0 进行计算与分析,使研究聚焦于几何尺寸及材料非均质性的影响。

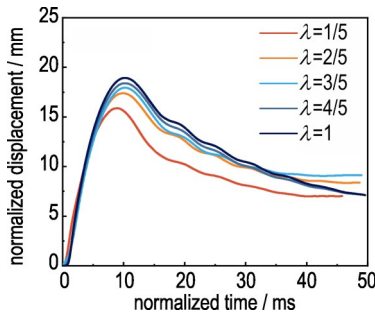
2.1 跨中位移

根据量纲推导可得出冲击响应物理量的理论相似比,如表4所示^[2-4]。通过根据表4中的相似律对3种几何相似RC梁的跨中位移时程曲线进行归一化,可以研究RC梁跨中位移的尺度效应规律。分别提取几何相似RC梁跨中的位移时程曲线,并对位移和时间进行归一化,即 $w/\lambda, t/\lambda$,如图9所示。可以发现,均质几何相似RC梁(HMG)和非均质几何相似RC梁(HTG-I和HTG-II)的归一化位移时程曲线在上升前期阶段基本重合,在这一阶段内位移响应近似符合相似律,然而,在时程曲线上升的后半段以及位移峰值处,几何相似RC梁归一化位移曲线明显发生偏差,出现尺度效应^[3]。

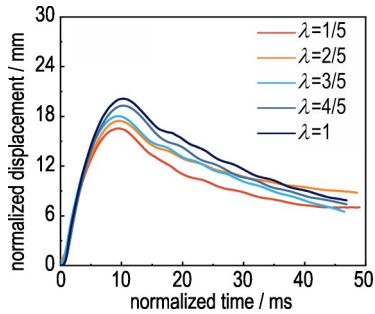
表 4 经典相似律

Table 4 Classical similarity law

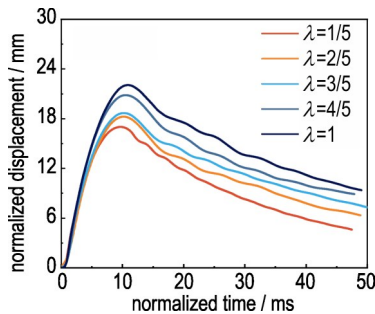
quantities	units	theoretical scale factor
geometric length	m	1
elastic modulus E	Pa	1
density ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1
volume V	m^3	λ^3
mass m	kg	λ^3
time t	s	λ
velocity v	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1
force F	N	λ^2
stress σ	Pa	1
strain ε	1	1



a. HMG



b. HTG-I



c. HTG-II

图 9 不同几何相似 RC 梁模型的归一化位移时程曲线

Fig.9 Normalized displacement time history curves of geometrically similar RC beam models

为了定量描述不同几何相似 RC 梁模型位移的尺度效应强弱,本研究计算了三种几何相似 RC 梁归一化位移峰值的增长率,如图 10 所示。图 10 展示了不同尺寸下三种 RC 梁的归一化位移峰值。可以发现,在相同尺寸下,非均质 RC 梁(HTG-I 和 HTG-II)的位移峰值高于均质 RC 梁(HMG),且梁的尺寸越大,位移峰值的差距越明显,即非均质性对大尺寸 RC 梁的位移影响更为显著。这可能与非均质 RC 梁在冲击荷载作用下的破坏程度和能量吸收特性有关^[46-47]。相同的冲击能量下,非均质 RC 梁会比均质下损伤更严重,吸收更多的能量。

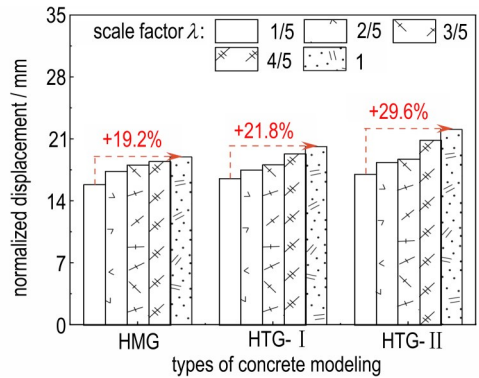


图 10 不同几何相似 RC 梁模型的归一化位移峰值

Fig.10 Normalized peak displacement of geometrically similar RC beam models

此外,图 10 还显示,当骨料的材料属性为塑性损伤时,RC 梁的位移峰值大于骨料为弹性体时的位移峰值。三种几何相似 RC 梁(HMG、HTG-I 和 HTG-II)归一化位移峰值的增长率为别为 19.2%、21.8% 和 29.6%。这表明,非均质 RC 梁的位移尺度效应要比均质 RC 梁更显著,且这一增强效果与骨料的材料属性密切相关。当骨料采用可发生破坏的塑性损伤材料时,位移的尺度效应表现得更加显著。综上所述,混凝土的非均质性会增强几何相似 RC 梁的位移尺度效应。

2.2 冲击力

按照表 4 所示的相似律对几何相似 RC 梁的冲击力进行归一化,即 F/λ^2 。图 11 展示了三种几何相似 RC 梁模型的归一化冲击力时程曲线。可以看出,在冲击点位置处加刚垫板时,不同尺寸 RC 梁在不同建模类型下的归一化冲击力时程曲线趋势基本一致,归一化后的冲击力峰值误差保持在 10% 以内,这表明几何相似 RC 梁的冲击力峰值近似满足相似比,即冲击力峰值响应近似符合表 4 中的相似律,与文献[4]的结论

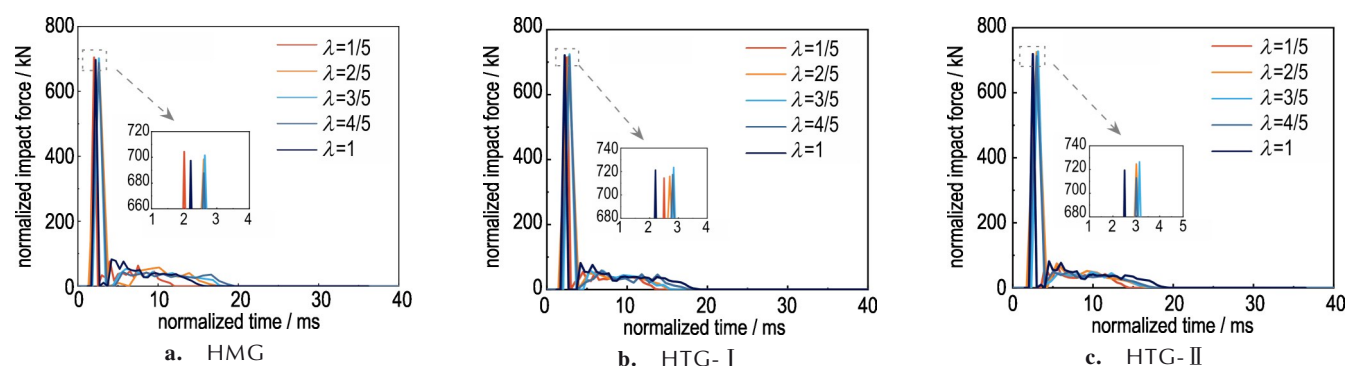


图 11 不同几何相似 RC 梁模型的归一化冲击力时程曲线

Fig.11 Normalized impact force time history curves of geometrically similar RC beam models

吻合。造成上述现象的原因可能与几何相似 RC 梁在冲击局部响应阶段的应力分布相关。

为了进一步探讨混凝土非均质性对 RC 梁冲击力响应的影响,本研究对三种几何相似 RC 梁的归一化冲击力峰值进行了对比,如图 12 所示。通过对比可以发现,非均质 RC 梁的冲击力峰值与均质 RC 梁基本相同,表明混凝土非均质性对 RC 梁冲击力峰值的影响较小,且可以近似忽略。

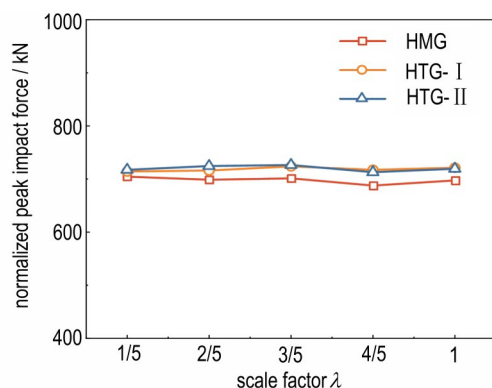


图 12 不同几何相似 RC 梁模型的归一化冲击力峰值

Fig.12 Normalized peak impact force of geometrically similar RC beam models

2.3 支反力

同样地,如图 13 所示,加刚垫板的三种几何相似 RC 梁模型的归一化支反力时程曲线趋势基本一致,且归一化后的支反力正峰值误差保持在 15% 以内,这也说明了几何相似 RC 梁的支反力正峰值近似满足相似律^[4]。

图 14 进一步展示了 3 种几何相似 RC 梁的归一化支反力正峰值对比结果。可以看出,非均质 RC 梁 (HTG-I 和 HTG-II) 的支反力正峰值低于均质 RC 梁 (HMG)。这一差异反映了混凝土的非均质性影响了冲击荷载能量在 RC 梁中的传递机制。具体而言,由于非均质 RC 梁内部复杂的细观结构,能量在传递过程中经历了更加复杂的扩展、衰减和局部损耗,从而导致更多的冲击能量在梁内部被吸收和耗散。因此,在相同冲击条件下,非均质 RC 梁向支座传递的动能相对减少,从而导致支反力正峰值的下降。这一趋势与已有研究^[48]关于非均质材料冲击响应的结论相一致。

2.4 非均质性在不同速度下的影响

综上所述,与冲击力和支反力相比,几何相似 RC 梁在冲击荷载作用下,位移响应的尺度效应对非均质

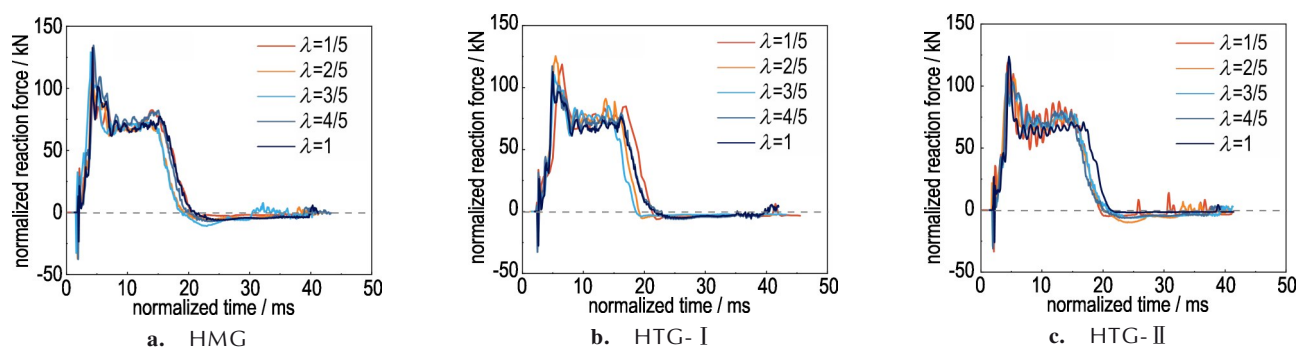


图 13 不同几何相似 RC 梁模型的归一化支反力时程曲线

Fig.13 Normalized reaction force time history curves of geometrically similar RC beam models

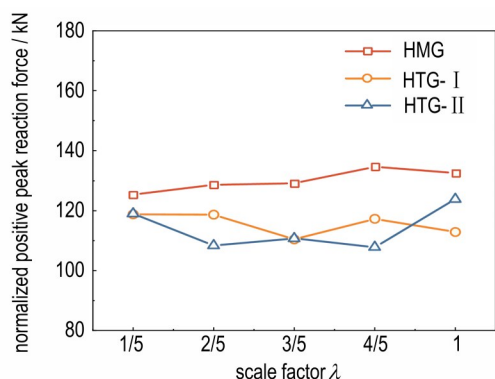


图14 不同几何相似RC梁模型的归一化支反力正峰值

Fig.14 Normalized positive peak reaction force of geometrically similar RC beam models

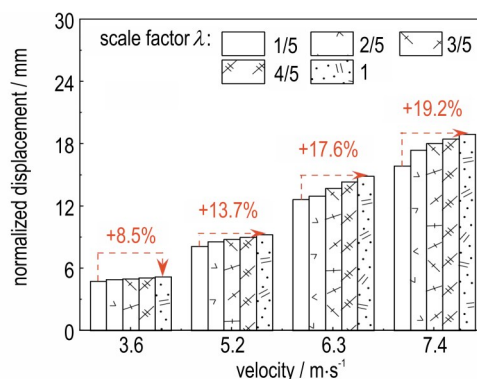
性较敏感。设置冲击能量 E 与静力吸能 E_0 的比值为 0.75、0.5 和 0.25, 并由此确定相应的冲击速度, 分别为 6.3 、 5.2 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 3.6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。然后, 对均质 RC 梁 (HMG) 和非均质 RC 梁 (HTG-II) 在不同冲击速度下进行了模拟分析, 并对各尺寸 RC 梁的跨中位移峰值进行归一化处理, 以揭示不同速度下的位移响应尺度效应变化规律, 如图 15 所示。结果表明, 随着冲击速度的降低, 几何相似 RC 梁的位移尺度效应显著减弱。具体而言, 当冲击速度从 7.4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降低至 3.6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, HMG 型 RC 梁的归一化位移增长率由 19.2% 下降至 8.5%; 而 HTG-II 型 RC 梁的增长率由 29.6% 下降至 10.4%。这表明在低应变率的情况下, RC 梁的非线性破坏行为受到抑制, 位移响应趋于线性, 尺度效应减弱。

进一步对比图 15a 和 b 可以发现, 在相同冲击速度下, 非均质 RC 梁的位移尺度效应始终大于均质 RC 梁, 且随冲击速度的增加, 两者之间的差异显著扩大。当冲击速度为 3.6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 两种模型位移尺度效应的差距增长率为 22.3%; 而在 7.4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 该增长率扩大至 54.2%, 说明非均质性和冲击速度会对位移尺度效应产生耦合影响, 即非均质性的影响随速度增大而作用更强。

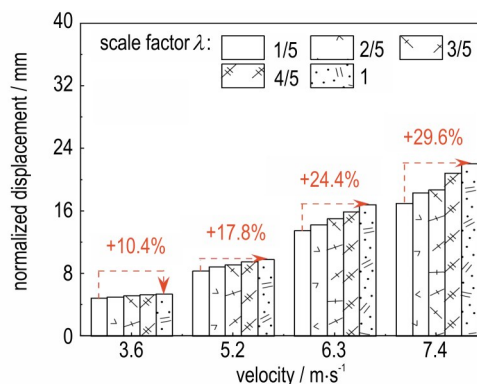
3 尺度效应机理分析

3.1 损伤模式

混凝土的细观结构在一定程度上决定其宏观力学性能。本研究通过对比几何相似 RC 梁模型 (HMG、HTG-I 和 HTG-II) 的损伤模式以及损伤路径的演化, 探讨尺度效应产生的内在机理, 同时探究混凝土非均质性这一特征对尺度效应影响的机制。



a. HMG



b. HTG-II

图15 不同速度下几何相似RC梁的归一化位移增长率

Fig.15 Normalized displacement growth rate of geometrically similar RC beams under different velocities

图 16 展示了 3 种不同尺寸 ($\lambda=1/5$ 、 $3/5$ 和 1) RC 梁的损伤模式。从图 16 可以看出, 非均质 RC 梁 (HTG-I 和 HTG-II) 的损伤最初发生在骨料与砂浆基质的交界处, 并沿着骨料周围的薄弱区域进行扩展延伸, 整体损伤模式表现为多个独立损伤路径从初始损伤位置开始演化, 并在发展过程中形成合并和交汇的损伤区域^[46]。相比之下, 均质 RC 梁 (HMG) 的损伤模式则表现为损伤区域从冲击点向梁两端扩散, 损伤分布更具连续性, 且损伤区域内呈现整体破坏。

尽管非均质 RC 梁的损伤路径更为复杂和扩展的距离更长, 但是损伤模式表现为损伤局限于冲击点附近, 而均质 RC 梁的损伤分布更为广泛。随着 RC 梁尺寸的增大, 这种局部化损伤在非均质 RC 梁中更为显著。这与 Fang 等^[49]得到的非均质性对混凝土的力学性能和裂缝分布有显著影响的结论一致。由于损伤的局部集中, 能量在较小范围内迅速耗散, 使得更大尺寸梁的有效受力区域相对变小, 从而导致位移响应产生

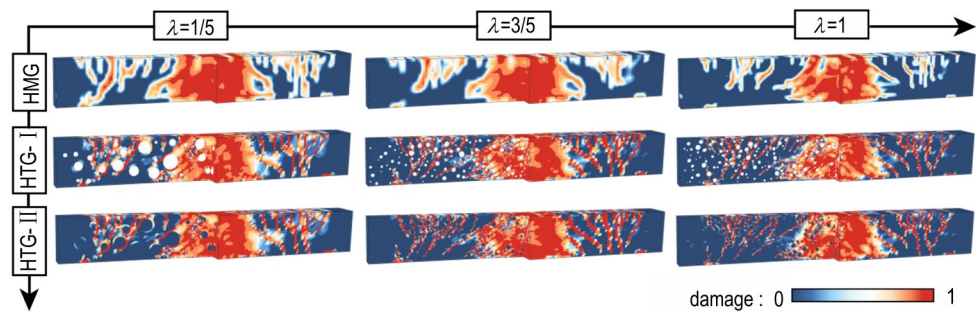


图 16 不同几何相似 RC 梁模型的损伤模式
Fig.16 Damage modes of geometrically similar RC beam models

尺度效应,同时非均质性会进一步增强 RC 梁位移的尺度效应。

骨料的材料特性进一步影响损伤路径和位移尺度效应。如图 17 所示,当骨料设置为弹性体时,HTG- I 的 RC 梁损伤主要沿骨料周围的薄弱区发展,而骨料

本身不发生破坏。反之,当骨料的材料属性为塑性损伤时,部分粒径较小的骨料发生损伤甚至破坏,损伤路径会穿过骨料进行扩展。

3.2 挠度曲线

挠度曲线是衡量结构变形的重要方法之一,本研究通过对比不同 RC 梁模型的挠度曲线来分析混凝土非均质性对其变形能力的影响。如图 18 所示,选取梁底部中间跨长作为挠度曲线的测量线,将不同尺寸 RC 梁的跨度和挠度进行归一化,从而得到不同几何相似 RC 梁的归一化挠度曲线。RC 梁的理论挠度曲线是通过求解简支梁的挠度微分方程获得^[50-51]。

通过对比不同几何相似 RC 梁模型的归一化挠度曲线,可以发现,在靠近支座两端区域,不同尺寸 RC 梁的挠度曲线基本重合。然而,随着测点位置逐渐接近跨中,不同尺寸 RC 梁挠度曲线之间的偏差逐渐增大,尤其是在冲击点附近,梁跨中出现局部塌陷变形。

通过反算法,假设 P 值,当理论挠度曲线与实际挠度曲线在支座附近范围内重合时,那么由此可以推出整个理论挠度曲线。图 18 显示,在梁跨中塌陷变形范围内,实际挠度值均高于理论预测值,且这一偏差随着梁尺寸的增大而显著增加。例如,对于均质 RC 梁,小尺寸梁($\lambda=1/5$)梁的跨中挠度比理论值高 34.3%;而

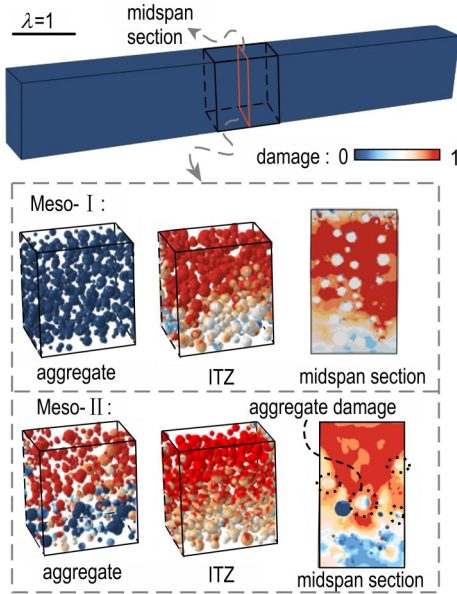


图 17 非均质 RC 梁细观组分的损伤模式
Fig.17 Damage modes of meso-component in heterogeneous RC beams

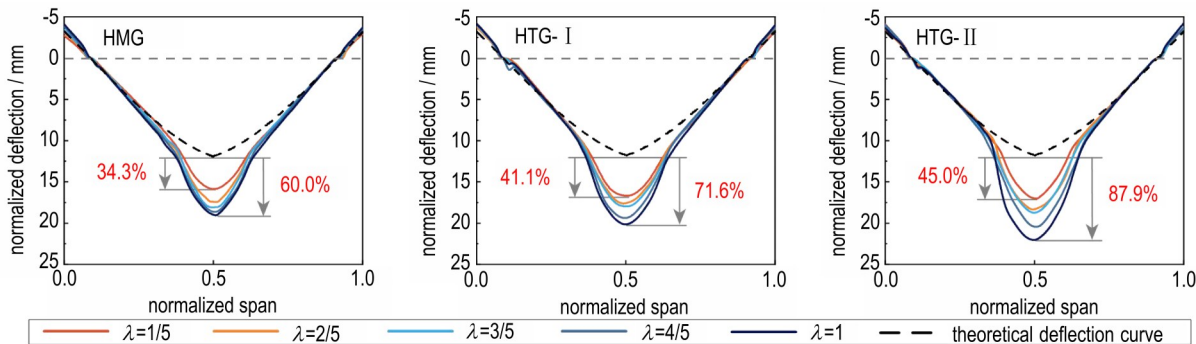


图 18 几何相似 RC 梁实际挠度曲线与理论挠度曲线对比
Fig.18 Comparison between practical and theoretical deflection curves of geometrically similar RC beams

大尺寸梁($\lambda=1$)则提高了 60%。这一结果表明,尽管 RC 梁的归一化挠度在不同尺寸下存在一定的相似性,但随着梁尺寸的增大,局部变形的程度增强,且主要集中在冲击点附近的局部区域。

进一步分析发现,尽管三个系列梁的实际挠度曲线趋势基本一致,但是在跨中塌陷变形的程度存在明显差异,非均质 RC 梁(HTG-I 和 HTG-II)的跨中局部变形更为明显,尤其是在与理论挠度曲线的差距上。对于小尺寸 RC 梁($\lambda=1/5$),HMG、HTG-I 和 HTG-II 的实际挠度曲线跨中挠度值分别比理论值高 34.3%、41.1% 和 45.0%;而大尺寸 RC 梁($\lambda=1$)中,三种 RC 梁的跨中挠度比理论值分别高 60.0%、71.6% 和 87.9%。

综上所述,混凝土非均质性增强了 RC 梁冲击点处的局部变形,且这种影响在大尺寸梁中表现得尤为明显^[52]。导致上述结果的原因可能与非均质 RC 梁的损伤模式有关,非均质 RC 梁由于损伤路径演化更加复杂,局部损伤的演化更加离散,从而导致其局部变形更为显著,进而影响了整个梁的变形和位移响应。

为进一步探究混凝土非均质性对几何相似 RC 梁变形尺度效应的影响,分别计算三种大尺寸($\lambda=1$)与小尺寸($\lambda=1/5$)RC 梁在相同归一化跨度处的归一化挠度值的绝对差值,如图 19 所示。该差值能够反映不同尺寸 RC 梁在归一化挠度上的偏差程度,从而揭示

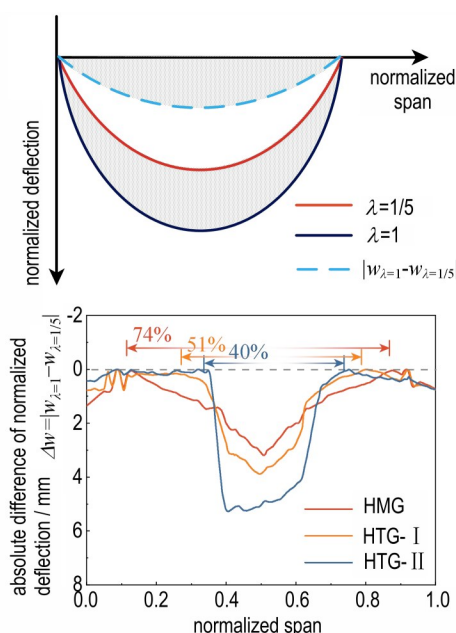


图 19 不同尺寸 RC 梁归一化挠度的绝对差值 Δ_w
Fig.19 Absolute difference of normalized deflection (Δ_w) for geometrically similar RC beams

混凝土非均质性对尺度效应的影响。从图中可以发现,对于均质 RC 梁,归一化挠度曲线在大尺寸与小尺寸之间的偏差范围覆盖了整个梁的 74%;相比之下,非均质 RC 梁的偏差区域明显缩小,其中 HTG-I 和 HTG-II 的偏差范围分别占整个梁的 51% 和 40%。这表明,混凝土非均质性影响了 RC 梁的变形分布特征,使得大尺寸与小尺寸梁在归一化挠度上的偏差主要集中在局部区域,而非整体范围内。

此外,由图 19 还可以看出,非均质几何相似 RC 梁的最大归一化挠度差值的绝对值要比均质 RC 梁更高,由此说明了混凝土非均质性增强了不同尺寸 RC 梁跨中局部变形的差异。这一现象可能源于非均质混凝土内部的复杂损伤路径和局部化变形特征,使得不同尺寸 RC 梁在跨中区域的局部响应差异更加显著,从而进一步放大了位移尺度效应。这一结果与前述关于损伤模式对位移尺度效应的解释分析相吻合。

3.3 能量吸收

根据前文分析,几何相似 RC 梁的挠度曲线发生偏差主要集中在梁跨中位置。为进一步解释混凝土非均质性会增强 RC 梁局部范围内的尺度效应,本研究统计了 RC 梁不同体积占比下对冲击能量的吸收情况。根据宋春明等^[46]的研究,RC 梁发生剪切破坏的模式为裂缝从梁底开始呈 45° 夹角向冲击点位置扩展,所以选取梁中间 30% 和 20% 的体积占比进行统计,如图 20 所示。

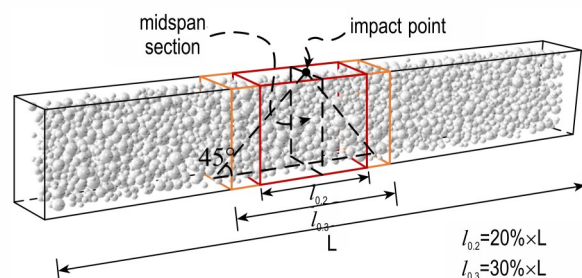


图 20 RC 梁能量吸收位置占比示意图

Fig.20 Schematic diagram of energy absorption distribution in RC beam

图 21 展示了两个尺寸 RC 梁在不同体积占比下的能量吸收情况。结果表明,在 20%、30% 和整个梁范围内,非均质 RC 梁所吸收的能量始终高于均质 RC 梁,且当骨料的材料属性为塑性损伤时,RC 梁吸收的能量最大。这可能与 RC 梁的损伤模式密切相关,非均质 RC 梁中由于损伤扩展路径更为复杂,且在骨料和砂浆基质界面处可能会发生偏转和分支,从而增加

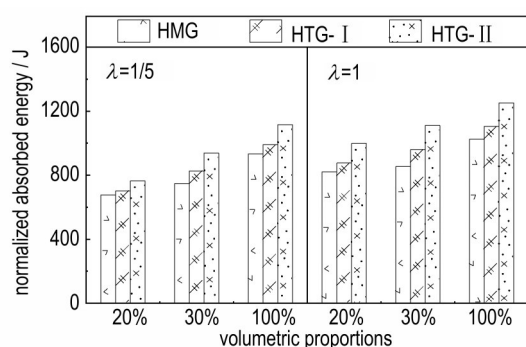


图 21 不同 RC 梁模型在不同体积比例下吸收的能量

Fig.21 Energy absorption of RC beam models under varying volumetric proportions

了能量的耗散。同时由于混凝土细观组分材料力学性能(弹性模量和强度)存在差异,使得在冲击载荷作用下可能导致应力分布不均匀,从而吸收更多的能量^[53]。

进一步分析表明,当骨料材料属性为塑性损伤时,部分骨料会发生损伤,损伤路径可能穿过骨料(如图 17 所示),使得更多的能量被骨料内部的塑性变形和损伤所消耗,因此导致 HTG-II 型 RC 梁吸收的能量最多。同时,还可以看出相同模型大尺寸 RC 梁要比小尺寸归一化吸收能量高。

为了进一步对比不同尺寸 RC 梁的能量吸收情况,本节计算了 20% 和 30% 梁体积所吸收能量占整个梁吸收能量的比例,如图 22 所示。可以发现,大尺寸梁 RC 梁在 20% 和 30% 体积范围内所吸收的能量占比均高于小尺寸梁。这表明,随着 RC 梁尺寸的增大,能量吸收的区域逐渐向梁跨中集中,即能量吸收呈现出更明显的局部化趋势。具体而言,对于 HMG 型 RC 梁,20% 体积吸收的能量占比由小尺寸到大尺寸增长了 10%,而对于 30%,小尺寸到大尺寸能量吸收占比增长了 3.7%,同样可以说明 RC 梁尺寸越大,能量吸收

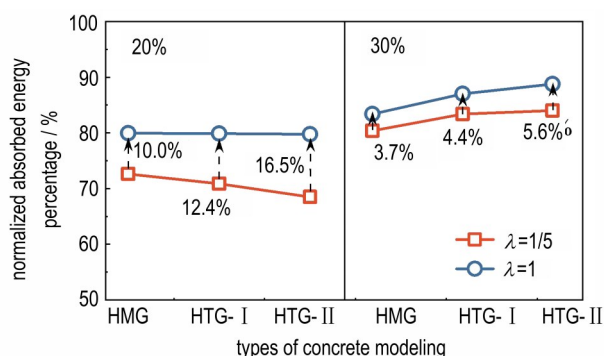


图 22 不同几何相似 RC 梁模型能量吸收占比的增长率

Fig.22 Growth rate of energy absorption proportions in geometrically similar RC beam models

越局部化。

在统计 RC 梁 20% 体积范围内的能量吸收比例时,HTG-I 型和 HTG-II 型从小尺寸到大尺寸 RC 梁的能量吸收占比增长率分别为 12.4% 和 16.5%,而 HMG 型的增长率为 10%,这表明,混凝土的非均质性显著增强了能量吸收的局部化趋势。这种能量吸收局部化效应意味着,在较大尺寸 RC 梁中,吸收的能量更集中地分布在跨中区域,导致局部变形和损伤加剧,进而放大了尺寸之间的响应差异。由此可见,几何相似 RC 梁在冲击载荷作用下存在明显的尺度效应,而非均质混凝土由于其复杂的细观结构与裂缝扩展机制,使得其尺度效应表现得更为显著。这一结论进一步揭示了混凝土非均质性是造成 RC 梁动力响应尺度效应的原因之一。

4 结论

本研究基于细观建模方法,建立了考虑混凝土非均质性的几何相似 RC 梁模型,系统研究了混凝土的非均质性对 RC 梁冲击响应及尺度效应的影响。通过对比不同 RC 梁模型(均质 RC 梁 HMG、非均质 RC 梁 HTG-I 和 HTG-II)在冲击荷载下的位移、冲击力和支反力响应,并分析了这些响应的尺度效应机制。在本研究范围内,得到以下主要结论:

(1)混凝土非均质性的特征增强了几何相似 RC 梁位移响应的尺度效应,且骨料材性为塑性损伤时比弹性体增强的程度更大,较均质梁提高了 10.4%。然而冲击力峰值和支反力正峰值的尺度效应可近似忽略。三种 RC 梁的冲击力峰值和支反力正峰值响应基本符合相似律,原因可能与几何相似 RC 梁在冲击局部响应阶段的应力分布相关。

(2)冲击速度在 $3.6 \sim 7.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 内,随着冲击速度的增加,位移的尺度效应更加显著,HMG 型的几何相似 RC 梁由 8.5% 增加到 19.2%,HTG-II 型则由 10.4% 增加到 29.6%。非均质性与冲击速度对位移尺度效应存在耦合影响,即冲击速度越大,非均质性的影响越强。

(3)非均质 RC 梁的损伤主要起始于 ITZ,并沿薄弱区域扩展,呈现出多路径、局部集中的发展特征。随着梁尺寸的增大,非均质模型中的损伤更趋于局部化,跨中变形范围缩小。同时通过对不同尺寸 RC 梁归一化挠度差值的分析,混凝土非均质性会导致跨中局部变形增强。因此,损伤演化与变形机制是非均质 RC

梁位移尺度效应增强的原因之一。

(4)从能量吸收角度分析表明,非均质RC梁在冲击荷载下的总吸能能力高于均质RC梁,且能量分布更集中于冲击点区域。随着梁尺寸的增大,局部吸能比例会进一步提高,如HMG型的增长率为10%。同时混凝土非均质性会进一步强化这种吸能局部化特征,如HTG-II型的增长率为16.5%。这种能量吸收的尺寸敏感性,与非均质材料损伤局域化特征形成力学响应闭环,印证了尺度效应增强的机理。

尽管本研究探讨了混凝土非均质性对几何相似RC梁冲击响应尺度效应的影响,但仍有进一步拓展的空间。未来研究可考虑引入更广泛的冲击速度范围,以覆盖更全面的名义应变率范围,从而增强结果的适用性。此外,当前模型简化了骨料形状,粘结-滑移,后续工作可引入更加真实的骨料几何特征,并考虑钢筋与混凝土之间的滑移,以提升结构响应模拟的准确性。在边界条件方面,本研究模型在冲击点设置了刚垫板,后续可进一步探索落锤直接撞击梁体、不同落锤形状等复杂工况下的响应规律,从多维角度深入揭示非均质性对尺度效应的影响机制。

参考文献:

- [1] 钱德玲, 李元鹏, 刘杰. 高层建筑结构振动台模型试验与原型对比的研究[J]. 振动工程学报, 2013, 26(3): 436-442.
QIAN De-ling, LI Yuan-peng, LIU Jie. Contrast study of shaking table model test with prototype for high-rise building structures [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2013, 26 (3): 436-442.
- [2] 刘艳辉, 慈伟主, 赵一超, 等. 横向冲击作用下圆钢管混凝土构件挠度尺寸效应研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(3): 103-111+128.
LIU Yan-hui, CI Wei-zhu, ZHAO Yi-chao, et al. Size effects of deflection of concrete-filled circular steel tubular members under lateral impact [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(3): 103-111+128.
- [3] LI J, ZHANG R B, JIN L, et al. A unified impact displacement prediction model for geometrically similar RC beams: from test specimen to prototype component[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 181: 104731.
- [4] LI J, ZHANG R B, JIN L, et al. Scaling laws of low-velocity impact response for RC beams: Impact force and reaction force. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 186: 104887.
- [5] SADEGHI H, DAVEY K, DARVIZEH R, et al. A scaled framework for strain rate sensitive structures subjected to high rate impact loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125: 229-245.
- [6] 李肖成, 徐绯, 杨磊峰, 等. 薄板在冲击载荷下线弹性理想塑性响应的相似性研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(11): 67-78.
LI Xiao-cheng, XU Fei, YANG Lei-feng, et al. Study on the similarity of elasticity and ideal plasticity response of thin plate under impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(11): 67-78.
- [7] 郑刚, 肖建春, 郭华, 等. 基于相似理论的冲击模型试验结果修正-钢管混凝土柱的研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(20): 140-149.
ZHENG Gang, XIAO Jian-chun, GUO Hua, et al. Correction of impact model test results using the similarity theory-study on steel tube concrete columns [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(20): 140-149.
- [8] WANG W, ZHANG D, LU F Y, et al. Experimental study on scaling the explosion resistance of a one-way square reinforced concrete slab under a close-in blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 49: 158-164.
- [9] 刘子超, 吴俊, 喻君, 等. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土构件缩尺效应的数值模拟研究[J]. 结构工程师, 2022, 38(4): 16-28.
LIU Zi-chao, WU Jun, YU Jun, et al. Numerical study on the scaling effect of reinforced concrete members under blast load [J]. *Structural Engineers*, 2022, 38(4): 16-28.
- [10] ZHANG D, YAO S J, LU F, et al. Experimental study on scaling of RC beams under close-in blast loading [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2013, 33: 497-504.
- [11] FU T Q, ZHANG M, ZHENG Q C, et al. Scaling the response of armor steel subjected to blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 153: 103863.
- [12] GUO H, OOI E T, SAPUTRA A A, et al. A quadtree-polygon-based scaled boundary finite element method for image-based mesoscale fracture modelling in concrete [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 211: 420-441.
- [13] WANG Z M, KWAN A K H, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete I: generation of random aggregate structure and finite element mesh [J]. *Computers & Structures*, 1999, 70 (5): 533-544.
- [14] DAOUD A, MAUREL O, LABORDERIE C. 2D mesoscopic modelling of bar-concrete bond [J]. *Engineering Structures*, 2013, 49: 696-706.
- [15] WU M X, ZHANG C H, CHEN Z F. Determining the impact behavior of concrete beams through experimental testing and meso-scale simulation: II. Particle element simulation and comparison [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 135: 113-125.
- [16] CUI W, LIU M M, SONG H F, et al. Influence of initial defects on deformation and failure of concrete under uniaxial compression [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 234: 107106.
- [17] EL-DIEB A S. Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers [J]. *Materials & Design*, 2009, 30(10): 4286-4292.
- [18] ROCCO C G, ELICES M. Effect of aggregate shape on the mechanical properties of a simple concrete [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2009, 76(2): 286-298.
- [19] NADERI S, TU W L, ZHANG M Z. Meso-scale modelling of compressive fracture in concrete with irregularly shaped aggregates [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 140: 106317.
- [20] 崔激, 魏杰, 李国栋. 考虑粗骨料破碎的混凝土力学特性细观模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(1): 50-56.
CUI Wei, WEI Jie, LI Guo-dong. Meso-simulation of mechani-

- cal properties of concrete considering coarse aggregate crushing [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(1): 50–56.
- [21] ZHOU X Q, HAO H. Mesoscale modelling of concrete tensile failure mechanism at high strain rates [J]. *Computers & structures*, 2008, 86(21): 2013–2026.
- [22] LIAO K Y, CHANG P K, PENG Y N, et al. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(6): 977–989.
- [23] 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.
- [24] 金浏, 杨旺贤, 余文轩, 等. 骨料粒径对混凝土动态拉伸强度及尺寸效应影响分析 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(9): 24–34.
- JIN Liu, YANG Wang-xian, YU Wen-xuan, et al. Influence of aggregate size on the dynamic tensile strength and size effect of concrete [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(9): 24–34.
- [25] FULLER W B, THOMPSON S E. The laws of proportioning concrete [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1907, 59(2): 67–143.
- [26] JIN L, WANG T, JIANG X A, et al. Size effect in shear failure of RC beams with stirrups: Simulation and formulation [J]. *Engineering Structures*, 2019, 199: 109573.
- [27] SONG Z H, LU Y. Mesoscopic analysis of concrete under excessively high strain rate compression and implications on interpretation of test data [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 46: 41–55.
- [28] FUJIKAKE K, LI B, SOEUN S. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(8): 938–950.
- [29] LI J, ZHANG R B, JIN L, et al. Effect of stirrup ratio on impact response of BFRP-reinforced concrete beams under different energy levels [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 173: 104472.
- [30] LI H W, CHEN W S, PHAM T M, et al. Analytical and numerical studies on impact force profile of RC beam under drop weight impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 147: 103743.
- [31] 刘飞, 罗旗帜, 蒋志刚. 低速冲击下 RC 梁的动态响应和破坏机理研究 [J]. *工程力学*, 2015, 32(5): 155–161.
- LIU Fei, LUO Qi-zhi, JIANG Zhi-gang. Dynamic responses and failure mechanism of RC beams to low velocity impact [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(5): 155–161.
- [32] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(8): 892–900.
- [33] GENIKOMSOU A S, POLAK M A. Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS [J]. *Engineering Structures*, 2015, 98: 38–48.
- [34] WANG X H, ZHANG S R, WANG C, et al. Experimental investigation of the size effect of layered roller compacted concrete (RCC) under high-strain-rate loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 45–57.
- [35] RASOOLINEJAD M, DÖNMEZ A A, BAŽANT Z P. Fracture and size effect suppression by mesh reinforcement of concrete and justification of empirical shrinkage and temperature reinforcement in design codes [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, 146(10): 04020120.
- [36] NASRIN S, IBRAHIM A. Numerical study on the low-velocity impact response of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams [J]. *Structures*, 2019, 20: 570–580.
- [37] CARTA G, STOCHINO F. Theoretical models to predict the flexural failure of reinforced concrete beams under blast loads [J]. *Engineering Structures*, 2013, 49: 306–315.
- [38] BISCHOFF P H, PERRY S H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates [J]. *Materials and Structures*, 1991, 24: 425–450.
- [39] 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.
- [40] HAO Y F, HAO H, LI Z X. Influence of end friction confinement on impact tests of concrete material at high strain rate [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 60: 82–106.
- [41] MALVAR L J. Review of static and dynamic properties of steel reinforcing bars [J]. *Materials Journal*, 1998, 95(5): 609–616.
- [42] ZHANG J T, ZHANG G L, SUN X J, et al. Analysis of compressive dynamic behaviors of plain concrete and lightweight aggregate concrete [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 15: e00557.
- [43] 毕巧巍. 玄武岩纤维混凝土的微结构及 BFRP 碳纤维混凝土梁斜截面承载力试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- BI Qiao-wei. Experimental research on the micro-structure of basalt fiber reinforced concrete and the oblique section bearing capacity of the bfrp bars reinforced fiber concrete beams [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [44] YAN D M, LIN G. Dynamic properties of concrete in direct tension [J]. *Cement and Concrete Research*, 2006, 36(7): 1371–1378.
- [45] ZHANG Y H, CHEN Q Q, WANG Z Y, et al. 3D mesoscale fracture analysis of concrete under complex loading. *Engineering fracture mechanics*, 2019, 220: 106646.
- [46] 宋春明, 钟家和, 徐吉威, 等. 钢筋混凝土梁冲击动力响应和破坏模式转化试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(1): 132–150.
- SONG Chun-ming, ZHONG Jia-he, XU Ji-wei, et al. Experimental study on dynamic response and failure mode transformation of reinforced concrete beams under impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(1): 132–150.
- [47] 赵武超, 钱江, 张文娜. 冲击荷载下钢筋混凝土梁的性能及损伤评估 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(1): 111–122.
- ZHAO Wu-chao, QIAN Jiang, ZHANG Wen-na. Performance and damage evaluation of RC beams under impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(1): 111–122.
- [48] GENG K Q, CHAI J R, QIN Y, et al. Exploring the brittleness and fractal characteristics of basalt fiber reinforced concrete under impact load based on the principle of energy dissipation [J]. *Materials and Structures*, 2022, 55(2): 78.
- [49] FANG J Y, YUAN Z L, LIANG J Y, et al. Research on compressive damage mechanism of concrete based on material heterogeneity [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 79: 107740.
- [50] 老大中, 赵宝延. 基于简支梁挠度方程展开的傅里叶级数 [J]. *北京理工大学学报*, 2010, 30(1): 1–4+54.
- LAO Da-zhong, ZHAO Bao-yan. Fourier series based on the

- deflection equation expansion of simple beam[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(1): 1-4+54.
- [51] 单建, 吕令毅. 结构力学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2022: 389.
- DAN Jian, LV Ling-yi. Structural mechanics [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2022: 389.
- [52] 杜宇翔, 贾永胜, 孙金山, 等. 落锤冲击作用下钢筋混凝土短梁响应及破坏试验研究[J]. 爆破, 2023, 40(4): 115-123.
- DU Yu-xiang, JIA Yong-sheng, SUN Jin-shan, et al. Experimental study on response and failure of short reinforced concrete beams under impact load by drop hammer[J]. *Blasting*, 2023, 40(4): 115-123.
- [53] 宋敏, 王志勇, 张杰, 等. 冲击荷载下钢筋混凝土缺口梁破坏模式的试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(13): 126-134.
- SONG Min, WANG Zhi-yong, ZHANG Jie, et al. Tests for failure mode of RC notched beam under impact load[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(13): 126-134.

Influence Mechanism of Concrete Heterogeneity on Scaling Effect of RC Beam Impact Response

JIN Liu, WU Shao-xiong, ZHANG Ren-bo, LI Jian, DU Xiu-li

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Reinforced concrete structures are frequently subjected to impact loads during their service life, leading to complex dynamic responses that are often difficult to predict. To systematically investigate the influence of concrete heterogeneity on the impact response and scaling effect of geometrically similar RC beams. Using a comparative analytical approach, three numerical models were established: a homogeneous RC beam (Homogeneity) and two heterogeneous RC beams (Heterogeneity-I and Heterogeneity-II). The displacement, impact force, and reaction force were compared. Furthermore, damage modes, deflection curves, and energy absorption characteristics were analyzed to explore the intrinsic mechanisms of scaling effect. The results indicate that the concrete heterogeneity is one of the factors contributing to the scaling effect in the displacement of geometrically similar RC beams, while its influence on impact force and reaction force is relatively minor. The intrinsic mechanism of the above-mentioned phenomenon may be the difference in damage modes due to heterogeneity, which enhances the local response of the RC beams with analysis of deflection curves and energy absorption. Additionally, within the scope of this study, higher impact velocities lead to more pronounced scaling effect in the displacement. These findings provide theoretical insights for impact-resistant design of concrete structures and for similitude analysis in scaled experimental studies.

Key words: reinforced concrete beam; heterogeneity; scaling effect; impact load; damage model

CLC number: TU375.1

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2025066

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No. 52308130); Beijing Natural Science Foundation of China (No. JQ22025)

(责编: 高毅)