

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2021.01.011

# 基于细观模拟的轻骨料混凝土破坏行为及尺寸效应研究\*

金 浏, 杨旺贤, 余文轩, 杜修力

(北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 轻骨料混凝土由于其轻质高强及保温隔热性能好等优点, 越来越多被应用于实际工程结构。从细观角度出发, 将混凝土材料看作由骨料颗粒、砂浆基质及界面过渡区组成的三相复合材料, 建立了考虑混凝土材料非均质性影响的二维细观数值分析模型, 模拟研究了轻骨料混凝土与普通混凝土压缩和劈拉破坏行为及尺寸效应的异同, 并揭示两者破坏机理。结果表明: 轻骨料混凝土压缩及劈拉破坏均造成骨料颗粒的断裂, 而普通混凝土破坏时骨料很少破坏; 轻骨料混凝土由于脆性较强, 与普通混凝土相比有更加明显的压缩强度尺寸效应现象; 轻骨料混凝土与普通混凝土存在相似的劈拉强度尺寸效应现象。

**关键词:** 轻骨料混凝土; 尺寸效应; 细观模拟; 压缩强度; 劈拉强度

**中图分类号:** TU528.2   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2021)01-0091-09

## Study on Failure Behavior and Size Effect of Lightweight Aggregate Concrete based on Meso-simulation

JIN Liu, YANG Wangxian, YU Wenxuan, DU Xiuli

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

**Abstract:** The lightweight aggregate concrete is widely applied to practical engineering structures due to its advantages of lightweight, high strength and good thermal insulation performance. From a microscopic standpoint, the concrete material is considered as a three-phase composite consisting of aggregate, mortar matrix and interfacial transition zones. A two-dimensional meso-numerical analysis model considering the effect of heterogeneity of concrete material was established. The similarities and differences of compression and splitting failure behavior and size effect between lightweight aggregate concrete and ordinary concrete were studied, and the failure mechanisms of both materials were revealed. The result shows that: the compression and splitting failure of lightweight aggregate concrete cause the fracture of aggregate particles, while the aggregate is intact when the ordinary concrete fails; compared with ordinary concrete, lightweight aggregate concrete has more significant size effect of

\* 收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-02-27

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFC1504302, 2016YFC0701100)、国家自然科学基金项目(51822801)资助

**作者简介:** 金浏(1985—), 男, 教授, 博导。主要从事混凝土材料与构件尺寸效应方面的研究。E-mail: jinliu@bjut.edu.cn

**通讯作者:** 杜修力(1962—), 男, 教授, 博导。主要从事建筑结构抗震、结构损伤诊断等方面的研究。

E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn

compressive strength due to its strong brittleness; the size effect of splitting tensile strength of lightweight aggregate concrete is similar to that of ordinary concrete.

**Keywords:** lightweight aggregate concrete; size effect; meso-scale simulation; compressive strength; splitting tensile strength

## 引言

轻骨料混凝土(Lightweight aggregate concrete)是指采用轻质骨料的混凝土,其表观密度不大于 $1950\text{ kg/m}^3$ 。轻骨料混凝土具有轻质、高强、保温和耐火性能好等特点,并且变形性能良好,弹性模量较低。近几十年以来,随着建筑节能要求的不断提高及建筑业的工业化、机械化和装配化的不断推广,以及超高层、大跨度建筑结构的不断涌现,材料性能的要求也越来越高,因此,轻骨料混凝土由于其性能特点成为了建筑行业不可或缺的建筑材料。

随着轻骨料混凝土的大量使用,越来越多的研究者开始从事轻骨料混凝土的研究,H.Z.Cui等<sup>[1]</sup>研究了轻骨料的体积分数和骨料性能对轻骨料混凝土力学性能的影响;O.Kayali等<sup>[2]</sup>研究了钢纤维对轻骨料混凝土力学性能的影响情况;M.V.C.Agnellini等<sup>[3]</sup>研究了丁苯胶乳(SBR)改性对轻骨料混凝土(LWAC)耐久性的影响;H.L.Ma等<sup>[4]</sup>系统研究了钢纤维加固轻骨料混凝土的力学性能,并探讨了这种混凝土材料对实际工程的应用价值。国内外研究者针对聚合物改性轻骨料、纤维增强轻骨料及高强轻骨料混凝土做了大量的试验及理论研究,然而这些研究工作还不足以全面深刻地认识轻骨料混凝土的力学行为,如尺寸效应行为。

尺寸效应,是指随着构件尺寸的增大,以强度为代表的力学性能指标不再为常数。混凝土材料是由粗细骨料、水泥砂浆以及各类添加剂组成的人工复合材料,混凝土属于准脆性材料的范畴<sup>[5]</sup>,其力学性能的非线性源于内部组成的非均质性<sup>[6-7]</sup>。混凝土尺寸效应问题实际上是一个复杂的材料科学问题,其主要受到骨料粒径、骨料分布、骨料形状、混凝土强度等级、初始缺陷等微—细观组成因素的影响<sup>[7]</sup>。目前,在材料层次,许多研究者基于试验研究结果已经建立了不同的尺寸效应理论,如经典的Bažant断裂力学尺寸效应律<sup>[8]</sup>、Weibull统计尺寸效应律<sup>[9]</sup>、Carpinteri多重分形尺寸效应律<sup>[10]</sup>等,然而,这些理论公式都有各自的适用范围,存在一定的局

限性。在构件层次,国内外学者对梁、柱、节点等构件进行了较为全面的尺寸效应研究<sup>[11-13]</sup>。

同样,轻骨料混凝土也存在尺寸效应,而轻骨料混凝土材料在内部结构、破坏形态及机理等方面都与普通混凝土有较大区别,因此,基于普通混凝土得到的尺寸效应结果不能直接套用在轻骨料混凝土上。Q.Y.Cao等<sup>[14]</sup>选取普通混凝土、轻骨料混凝土、纤维混凝土和聚合物改性混凝土为试件进行尺寸效应研究,结果表明轻骨料混凝土因脆性更大而具有更明显的尺寸效应现象;H.D.Basche等<sup>[15]</sup>研究了轻质混凝土和不加剪力筋剪力梁的尺寸效应情况;C.H.Wu等<sup>[16]</sup>研究了轻骨料和普通骨料全尺寸钢筋混凝土梁的尺寸效应问题。目前,国内外很少有学者针对轻骨料混凝土尺寸效应问题进行深入系统的研究,对轻骨料混凝土尺寸效应机理认识不足。

本文通过细观数值模拟的方法,将轻骨料混凝土看作由骨料颗粒、砂浆基质及界面过渡区组成的三相复合材料,通过与黄锦波<sup>[17]</sup>、王振宇等<sup>[18]</sup>开展的轻骨料混凝土试验研究进行对比,从而建立正确的二维细观数值分析模型,选取了合理的本构关系及材料参数。最后对轻骨料混凝土压缩和劈拉行为破坏模式及尺寸效应问题进行研究,并与普通混凝土进行对比分析,得出轻骨料混凝土的破坏机理及尺寸效应规律。

## 1 细观数值分析模型与方法

混凝土材料尺寸效应及其非线性力学行为源于其内部组成的非均质性<sup>[19]</sup>,本文通过细观数值分析方法探讨轻骨料混凝土材料的力学性能及尺寸效应行为。

### 1.1 细观数值模型的建立

采用基于Monte-Carlo法提出的经典的“取—放”方法<sup>[20]</sup>,建立二级配方形混凝土试件的随机骨料模型,如图1所示,试件截面宽度 $b$ 分别为100、150、200、300、450和600 mm,劈拉模型中垫块采用

刚性垫块,截面尺寸为 $h \times l$ (高度 $h=0.1l$ ,宽度 $l=0.06b$ )。实际工程或试验时,轻骨料混凝土中骨料颗粒大多数为圆形,如图1所示,因此,本模拟亦采用圆形骨料颗粒进行分析研究,至于骨料形状以及骨料级配对轻骨料混凝土力学性能的影响,将另文讨论。其中,20~40 mm 粒径的大骨料颗粒采用30 mm 的等效粒径,5~20 mm 粒径的小骨料颗粒采用

12 mm 的等效粒径。界面过渡区是介于骨料颗粒与砂浆基质之间的薄层,考虑到计算量的限制,界面过渡区厚度取为1 mm。此外,相关研究<sup>[21]</sup>表明:界面过渡区厚度在0.5~2 mm 时对计算结果影响很小。为简化起见,网格划分采用常应变三角形单元,网格平均尺寸为1 mm,该处理方法同文献<sup>[22-24]</sup>。

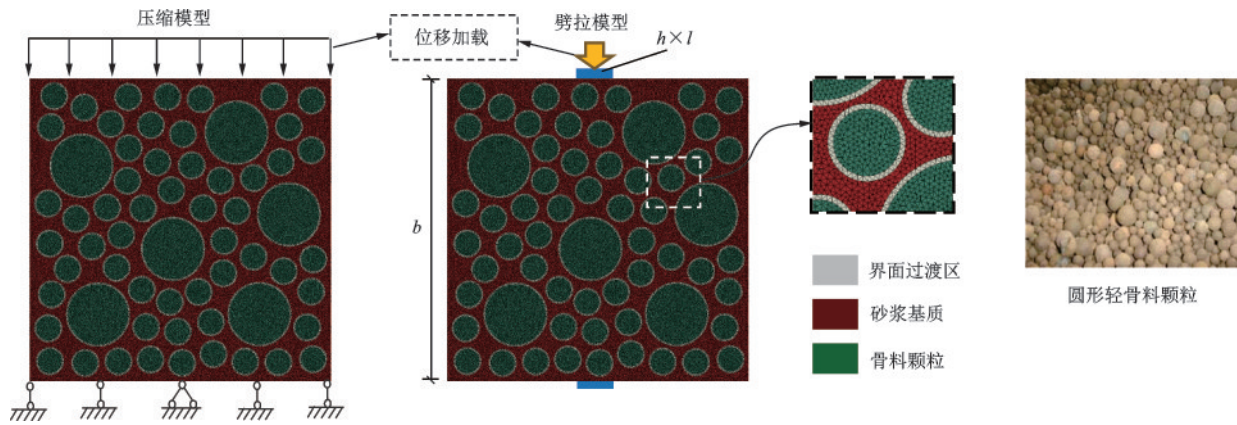


图1 二维细观数值模拟模型示意

Fig.1 Meso-scale simulation models of concrete specimens

压缩模型与劈拉模型均采用位移加载控制,加载方式如图1所示,压缩模型在试件上表面直接加载,底部采用竖向约束,两侧为自由边界,无约束作用;劈拉模型在上部垫块施加荷载,下部垫块固定,垫块与试件接触表面绑定约束。

## 1.2 材料参数及本构关系确定

本文将轻骨料混凝土看成由轻骨料颗粒、砂浆基质及两者之间的界面过渡区组成的三相复合材料,基于宏观层次本构关系模型的材料参数不再适用于细观分析,为此,本文对所用本构关系模型及材料参数进行探讨。

同L.Jin等<sup>[23-25]</sup>的工作,砂浆基质及界面过渡区的力学行为与混凝土类似,采用J.Lee等<sup>[26]</sup>提出的塑性损伤本构关系模型来描述其力学行为。而轻

骨料颗粒多孔的特性导致其质量轻且强度低,轻骨料混凝土的破坏形态不同于普通混凝土,并非只沿界面过渡区或者砂浆基质进行破坏,而常常是轻骨料颗粒本身的压碎或拉裂破坏,因此,骨料颗粒本构关系模型同砂浆基质一样,采用塑性损伤本构关系模型。

## 1.3 细观数值模型的验证

细观层次上对轻骨料混凝土力学性能的数值模拟中,必须首先确定砂浆基质、轻骨料颗粒及界面过渡区的材料参数。本文采用的轻骨料混凝土各细观组分的力学参数见表1,其中带“\*”的参数取自W.H.Dilger等<sup>[27]</sup>试验中的实测数据,带“’”的参数取自陈桂斌<sup>[28]</sup>以试验为基础的计算数据,与L.Jin等<sup>[23-24]</sup>的研究方法一样,带“~”的参数为反复试算获

表1 细观成分主要力学参数

Table 1 Mechanical parameters of meso components

	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E$	泊松比 $\nu$	剪胀角 $\psi/(^{\circ})$	抗压强度 $\sigma_c$	抗拉强度 $\sigma_t$
普通骨料	2 750*	73*	0.16*	18	80.0~	6.0~
轻骨料	1 400’	16’	0.22’	18~	18.0’	5.1’
砂浆基质	2 750*	38*	0.2*	18	25.0~	2.5~
界面过渡区	2 750*	26*	0.2*	15	16.0~	1.6~

注:\*取自文献<sup>[27]</sup>,’取自文献<sup>[28]</sup>,~为反复试算参数

得的选取值,反复试算也即反演法,是一种重复计算的过程。数值模拟中,通过反复试算并且与试验结果对比来获得某些材料参数,是一种重要且科学的研究方法。

同 Z.P.Bažant 等<sup>[29]</sup>的数值模拟验证方式,本文参考王振宇等<sup>[18]</sup>开展的轻骨料混凝土试验中轻骨料参数进行模拟对比分析。采用表 1 所示力学参数开展二维细观数值模拟,得到应力—应变曲线与王振宇等<sup>[18]</sup>试验结果进行对比,如图 2 所示。可以发现,轻骨料混凝土强度等级为 LC20 时,模拟与试验应力—应变曲线结果相近;强度等级为 LC30 时,上升段吻合较好,下降段由于试验机本身刚度不足导致试验比模拟应力—应变关系曲线下落更快<sup>[30]</sup>,总体上模拟结果与试验结果吻合良好,表明本文通过反演法得到的轻骨料混凝土二维细观数值模拟中各细观力学参数的合理性,初步验证了本文提出的细观力学方法的可行性。

为了进一步验证本文提出的细观力学方法的可行性及材料参数选取的准确性,本文参照黄锦波<sup>[17]</sup>开展的轻骨料混凝土轴心抗压试验,模拟其中截面尺寸为 100 mm×100 mm×300 mm 的立方体

轴心抗压试件,与试验中试件的破坏模式进行对比分析,发现破坏模式基本相同,如图 3 所示,为二维数值模型及模拟破坏结果同黄锦波<sup>[17]</sup>试验的对比情况,开展裂缝贯穿轻骨料颗粒,沿试件斜向贯通,形成斜向断裂带,进一步验证了本模拟的合理性及正确性。

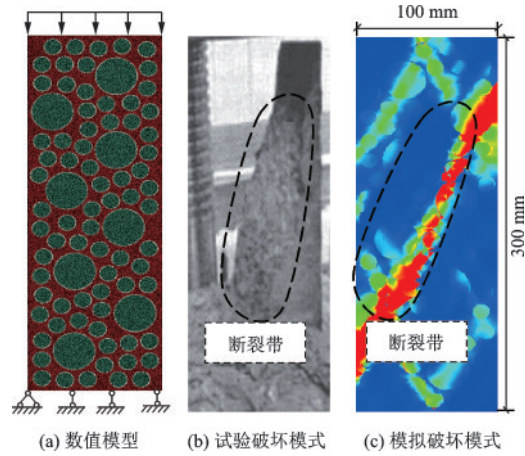


图 3 验证模型及模拟破坏结果与黄锦波<sup>[17]</sup>试验对比  
Fig. 3 Verification model and comparison between simulated failure results with Huang Jinbo's test results<sup>[17]</sup>

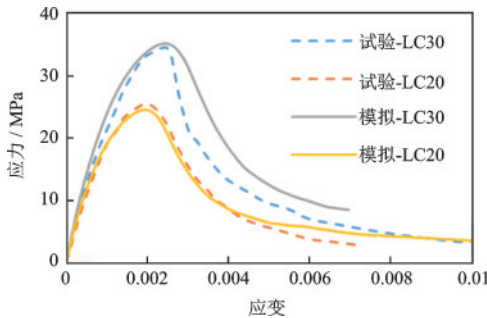


图 2 模拟应力—应变关系与王振宇<sup>[18]</sup>试验结果对比  
Fig.2 Comparison between simulated stress-strain relation and Wang Zhenyu's test results<sup>[18]</sup>

## 2 轻骨料混凝土压缩行为分析

混凝土压缩行为是混凝土力学性能中最基本且重要的一项力学指标,因此,本节将着重探讨轻骨料混凝土的压缩破坏模式、抗压强度及尺寸效应行为,并与普通混凝土的压缩行为进行对比。

### 2.1 轻骨料混凝土压缩破坏模式

图 4 为不同截面尺寸下轻骨料混凝土压缩破坏模式。可以看出,不同截面尺寸下轻骨料混凝土裂

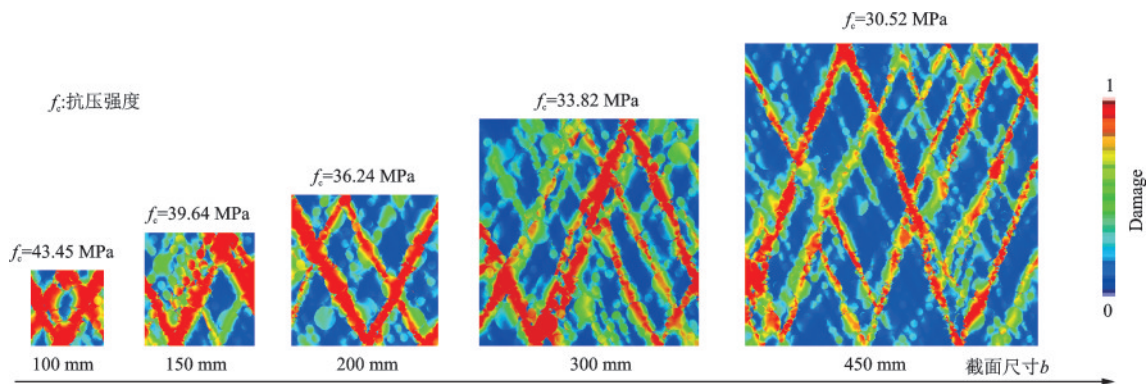


图 4 不同截面尺寸下轻骨料混凝土压缩破坏模式

Fig.4 Compressive failure modes of lightweight aggregate concrete under different cross-section sizes

缝带与混凝土试件边界夹角约为 $45^\circ$ ,出现明显的剪切破坏面,斜向裂缝带随着混凝土试件截面尺寸的增大而增多。混凝土材料在纵向压缩的同时也会发生横向膨胀,混凝土受压力作用时,纵向压缩小,横向膨胀也相应较小,产生的横向拉伸也较小。但是混凝土的抗拉强度极低,在混凝土内部的某些微元体上受到的压应力和拉应力合成的主拉应力(方向为 $45^\circ$ )首先超过混凝土的抗拉强度而开裂破坏。

轻骨料混凝土骨料颗粒弹性模量较低,受压时,积聚较多的能量,当试件内部产生裂纹开始破坏时,积聚的能量突然释放,导致骨料开裂,最后裂缝贯穿试件而发生破坏现象。因此,混凝土试件截面尺寸越大,试件内部积聚的能量也越多,试件破

坏时,内部裂缝的数量就明显增多以耗散更多的能量。

图5为轻骨料混凝土与普通混凝土压缩破坏模式对比。可以发现,轻骨料混凝土和普通混凝土破坏模式有明显的异同,相同点:两者破坏裂缝大致都沿 $45^\circ$ 斜向发展;不同点:轻骨料混凝土受压破坏以骨料开裂破坏为主,开展裂缝穿过骨料颗粒,最后贯穿混凝土试件;普通混凝土的破坏为裂缝绕着骨料颗粒开展而沿着力学性能比较薄弱的界面过渡区或砂浆基质进行开裂破坏。两种混凝土由于其内部结构及材料属性的不同,造成轻骨料混凝土与普通混凝土都有其各自的破坏形式及特点。

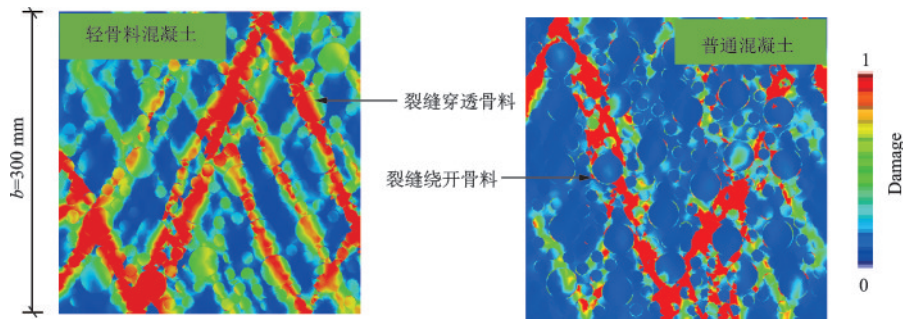


图5 轻骨料混凝土与普通骨料混凝土压缩破坏模式对比

Fig.5 Comparison of compression failure modes between lightweight aggregate concrete and ordinary aggregate concrete

## 2.2 轻骨料混凝土应力—应变关系曲线分析

如图6所示,为不同截面尺寸下轻骨料混凝土与普通混凝土应力—应变关系曲线。可以看出,轻骨料混凝土各截面尺寸下应力—应变关系曲线较为相似,上升段几乎重合,下降段近似平行,随着混凝土试件截面尺寸的增大,轻骨料混凝土峰值应力减小,峰值应变增加,表明轻骨料混凝土压缩强度具有明显的尺

寸效应现象,并且随着试件尺寸的增加,轻骨料混凝土的延性增强;普通混凝土峰值应力随着截面尺寸的增加而减小,同样表现出明显的尺寸效应现象,而峰值应变随着截面尺寸的增加几乎没有变化。

图7为LC30强度等级标准试件模拟应力—应变关系曲线结果与过镇海等<sup>[30]</sup>的理论曲线对比。过镇海提出LC10—LC45强度等级的轻骨料混凝土应力—应变曲线方程采用下列形式:

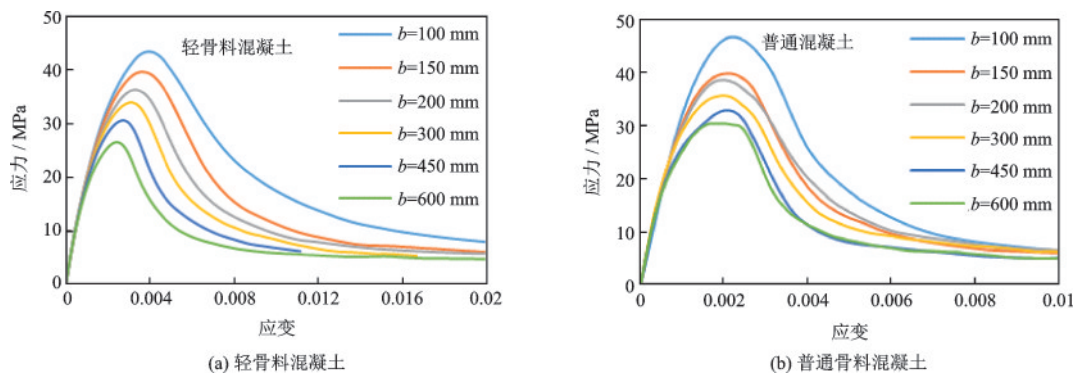


图6 不同截面尺寸下轻骨料混凝土与普通骨料混凝土应力—应变关系曲线

Fig.6 Stress-strain relationships of lightweight aggregate concrete and ordinary aggregate concrete under different cross-section sizes

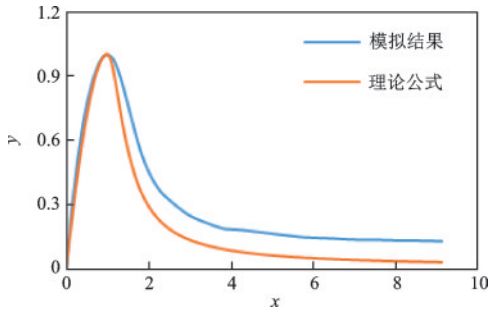


图7 模拟结果与文献[30]应力—应变关系曲线公式对比  
Fig.7 Comparisons between simulation results and the stress-strain formulas of the reference[30]

$$y = \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3 \quad x \leq 1 \quad (1)$$

$$y = \frac{x}{\alpha_{d1}(x-1)^2 + x} \quad x \geq 1 \quad (2)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_c}; y = \frac{\sigma}{f_c^*} \quad (3)$$

式中,  $\epsilon$  为混凝土试件压缩应变;  $\epsilon_c$  为峰值应变;  $\sigma$  为压缩应力;  $f_c^*$  为峰值应力;  $\alpha_a$ 、 $\alpha_{d1}$  为常数。

可以看出, 模拟结果与理论曲线上上升段吻合较好, 下降段由于试验机刚度不足, 而数值模拟不存在试验机刚度不足问题, 从而导致根据试验推导出的理论曲线比模拟结果下降更快。这种现象也表明了此模拟结果的合理性。

### 2.3 轻骨料混凝土压缩强度尺寸效应分析

图8为轻骨料混凝土与普通混凝土压缩强度随试件截面尺寸的变化规律。可以看出, 试件截面尺寸为  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ , 即标准立方体试件时, 轻骨料混凝土与普通混凝土试件压缩强度差别不大, 说明两者强度等级相同, 此时, 两种混凝土压缩强度均随着试件截面尺寸的增加而减小, 表现出尺寸效应现象; 另外, 轻骨料混凝土不同尺寸下压缩强度

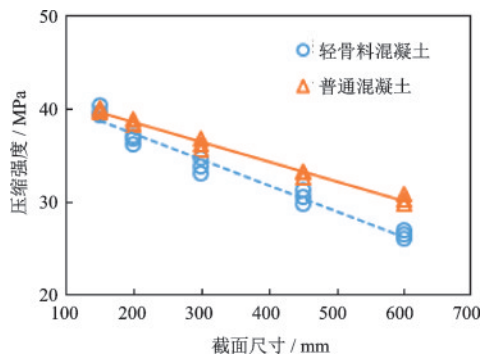


图8 轻骨料和普通混凝土强度随截面尺寸变化规律  
Fig.8 Variations of strengths of lightweight aggregate concrete and ordinary concrete with cross-section sizes

拟合趋势线斜率明显比普通混凝土大, 表明轻骨料混凝土比普通混凝土有更加明显的尺寸效应现象。

混凝土材料破坏时, 表现为试件内部裂缝的发展贯通, 轻骨料混凝土骨料颗粒强度及弹性模量都较低, 破坏时试件内部的骨料发生断裂, 而普通混凝土仅沿着力学性能比较薄弱的界面过渡区或者砂浆基质进行破坏。同 Weibull 统计尺寸效应理论<sup>[9]</sup>, 随着试件截面尺寸的增大, 试件中可能会有更多严重缺陷的区域出现, 表现出压缩强度随截面尺寸的增加而降低即尺寸效应行为。而普通混凝土破坏时, 骨料颗粒与裂缝间存在咬合力, 随着截面尺寸的增大, 这种咬合作用逐渐增多, 使压缩强度具有增强作用; 而轻骨料混凝土由于骨料的直接断裂破坏而几乎不存在咬合作用。所以随着混凝土试件截面尺寸的增加, 轻骨料混凝土压缩强度下降趋势比普通混凝土更加明显。综上所述, 轻骨料混凝土有比普通混凝土更加明显的尺寸效应现象。

图9为模拟结果与 Bažant 尺寸效应律理论 (Bažant SEL)、弹性断裂力学理论 (LEFM) 以及塑性强度 (Strength criterion) 进行拟合对比情况。可以看出, 轻骨料混凝土及普通混凝土模拟结果均与 Bažant 尺寸效应律曲线吻合较好。另外, 可以发现, 轻骨料混凝土模拟结果比普通混凝土更靠近弹性断裂力学理论曲线, 说明轻骨料混凝土破坏更具脆性, 尺寸效应行为比普通混凝土更为明显。

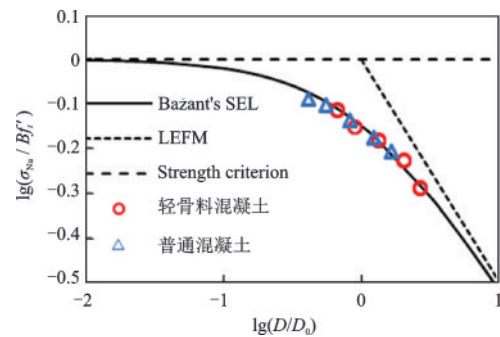


图9 模拟结果与 Bažant 尺寸效应理论对比  
Fig.9 Comparisons between simulation results and Bažant's size effect theory

## 3 轻骨料混凝土劈拉破坏行为分析

在实际工程中, 混凝土材料会受到各种各样的拉伸作用, 主要有直拉、劈拉及弯拉作用, 本节主要通过数值模拟来探究轻骨料混凝土劈拉破坏行为, 并与普通混凝土劈拉行为进行对比分析。

### 3.1 轻骨料混凝土劈拉破坏模式

图 10 为不同试件尺寸下轻骨料混凝土劈拉破坏模式。可以看出,在不同试件尺寸下,轻骨料混凝土均在试件中部产生竖向贯通裂纹,由于轻骨料颗粒强度较低,所以裂缝穿过骨料颗粒,同时,在混

凝土试件两侧也出现局部的受拉裂缝。在试件加载过程中,混凝土试件首先在垫块附近产生压应力,并伴随有应力集中发生,因此,在垫块附近产生许多细小裂纹,随着荷载的不断增加,试件中部产生横向的拉应力,随着拉应力增加,达到骨料颗粒的劈拉强度后,骨料被拉断,最后形成贯通的竖向裂缝。

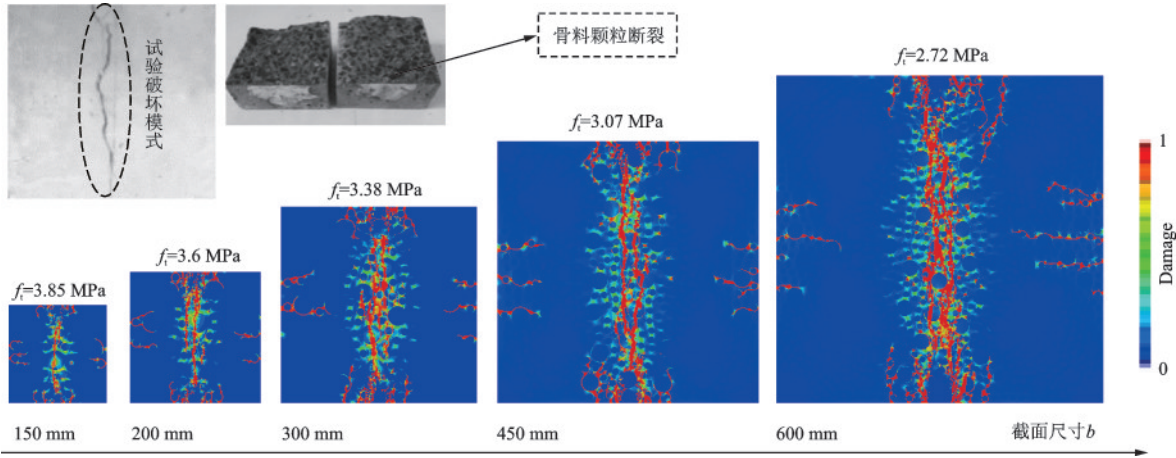


图 10 不同试件尺寸下轻骨料混凝土破坏模式

Fig.10 Failure modes of lightweight aggregate concrete under different specimen sizes

图 11 为轻骨料混凝土与普通混凝土劈拉破坏模式对比情况。可以看出,两种混凝土都在试件中部产生竖向裂缝。然而,细观层次上两种混凝土的劈拉破坏模式差别很大,普通混凝土的破坏形式为开展裂缝沿着拉伸强度比较薄弱的界面过渡区或砂浆进行开裂,绕开强度较高的骨料颗粒;而轻骨料混凝土的开展裂缝直接穿过强度较低的骨料颗粒进行破坏。另外,轻骨料混凝土弹性模量较低,在受到垫块的挤压作用时,试件中部产生较大的竖向压缩变形,导致试件两侧产生弯拉破坏,形成如图 11 所示的裂纹。

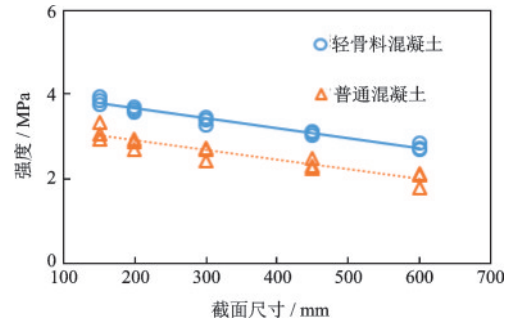
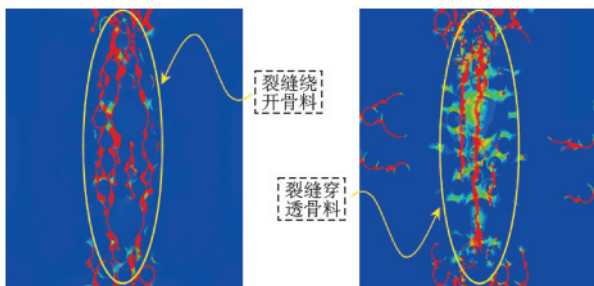


图 12 劈拉强度随截面尺寸变化规律

Fig.12 Variations of splitting tensile strengths with cross-section sizes



(a) 普通骨料混凝土 (b) 轻骨料混凝土

图 11 普通混凝土与轻骨料混凝土劈拉破坏模式对比

Fig.11 Comparison of splitting failure modes between ordinary concrete and lightweight aggregate concrete

### 3.2 轻骨料混凝土劈拉强度尺寸效应分析

图 12 为两种混凝土劈拉强度随截面尺寸的变化

化规律。可以看出,轻骨料混凝土和普通混凝土劈拉强度均随着试件截面尺寸的增大而减小,反映出两种混凝土具有的劈拉强度的尺寸效应现象;并且,两者的拟合直线基本平行,表明轻骨料混凝土劈拉强度尺寸效应与普通混凝土相比变化不大。

另外,在本文两种混凝土压缩强度等级相同的情况下,各截面尺寸轻骨料混凝土的劈拉强度均大于普通混凝土,主要是因为,轻骨料混凝土的劈拉破坏为轻骨料颗粒被拉断,而普通混凝土的破坏主要发生在界面过渡区或者砂浆基质,由于骨料颗粒的整体性较好,破坏时需要更多的能量,从而劈拉强度较高。

图 13 为两种混凝土劈拉破坏模拟结果与

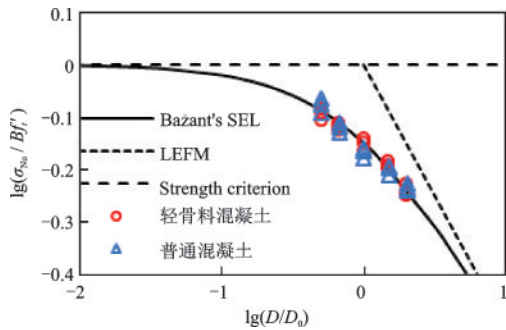


图13 模拟结果与Bažant尺寸效应理论对比

Fig.13 Comparisons between numerical results and Bažant's size effect theory

Bažant 尺寸效应律理论 (Bažant SEL)、弹性断裂力学理论 (LEFM) 以及塑性强度 (Strength criterion) 进行拟合对比情况。可以看出,轻骨料混凝土与普通混凝土均与 Bažant 尺寸效应律理论曲线吻合较好,并且两种混凝土数据点几乎重合,表明轻骨料混凝土与普通混凝土有相似的尺寸效应规律。

## 4 结 论

本文基于二维细观数值模拟分析方法,把混凝土看作由骨料颗粒、砂浆基质及界面过渡区组成的三相复合材料,通过对轻骨料混凝土和普通混凝土压缩及劈拉行为分析,得到如下结论:

(1) 轻骨料混凝土与普通混凝土破坏模式差别显著。轻骨料混凝土压缩及劈拉破坏均造成骨料颗粒断裂;普通混凝土压缩及劈拉破坏均绕开骨料颗粒,沿着力学性能比较薄弱的界面过渡区或砂浆基质进行破坏。

(2) 相同强度等级的轻骨料混凝土与普通混凝土相比,轻骨料混凝土有更加明显的压缩强度尺寸效应现象。

(3) 相同强度等级的轻骨料混凝土与普通混凝土相比,轻骨料混凝土有更高的劈拉强度;而轻骨料混凝土与普通混凝土劈拉强度尺寸效应差别不大。

### 参考文献:

[1] Cui H Z, Lo T Y, Memon S A, et al. Effect of lightweight aggregates on the mechanical properties and brittleness of lightweight aggregate concrete [J]. Construc-

tion & Building Materials, 2012, 35(10):149-158.

- [2] Kayali O, Haque M N, Zhu B. Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2003, 25(2):207-213.
- [3] Agnesini M V C, Rossignolo J A. Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2004, 26(4):375-380.
- [4] Ma H L, Cui C, Li X, et al. Study on mechanical properties of steel fiber reinforced autoclaved lightweight shell-aggregate concrete [J]. Materials & Design, 2013, 52: 565-571.
- [5] Bažant Z P, Planas J. Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials [M]. The Chemical Rubber Compang Press, 1997.
- [6] 杜修力, 金浏. 混凝土材料宏观力学特性分析的细观单元等效化模型 [J]. 计算力学学报, 2012, 29(5): 654-661.
- Du X L, Jin L. Meso-element equivalent model for macro-scopic mechanical properties analysis of concrete material [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(5):654-661.(in Chinese)
- [7] Du X, Jin L, Ma G. A meso-scale analysis method for the simulation of nonlinear damage and failure behavior of reinforced concrete members [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013, 22(6):878-904.
- [8] Bažant Z P, Planas J. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1984, 110(4):518-535.
- [9] Weibull W. The phenomenon of rupture in solids [J]. Proceedings of Royal Sweden Institute of Engineering Research, 1939, 153: 1-55.
- [10] Carpinteri A, Ferro G. Size effects on tensile fracture properties: a unified explanation based on disorder and fractality of concrete microstructure [J]. Materials & Structures, 1994, 27(10):563-571.
- [11] 车轶, 于磊. 剪力作用下钢筋混凝土大尺寸无腹筋构件安全性研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(2): 144-151.
- Che Y, Yu L. Safety of large reinforced concrete members without web reinforcement subjected to shear [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(2): 144-151. (in Chinese)
- [12] Li D, Jin L, Du X L, et al. Size effect tests of normal-strength and high-strength RC columns subjected to axial compressive loading [J]. Engineering Structures, 2016, 109:43-60.
- [13] 李振宝, 郭二伟, 周锡元, 等. 大尺度 RC 梁柱节点抗

- 震性能及尺寸效应试验研究[J]. 土木工程学报, 2012(7):39-47.
- Li Zh B, Guo E W, Zhou X Y, et al. Seismic behaviors and size effects of large-scale interior beam-column joints of RC frames [J]. China Civil Engineering Journal, 2012(7):39-47.(in Chinese)
- [14] Cao Q Y, Sun W, Hao T Y, et al. Size effect on flexural strength of various concrete[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(9):1311-1315.
- [15] Basche H D, Keller C. Shear strength of lightweight concrete without shear reinforcement [J]. Beton-Und Stahlbetonbau, 2009, 104(7): 399-405.
- [16] Wu C H, Kan Y C, Huang C H, et al. Flexural behavior and size effect of full scale reinforced lightweight concrete beam [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2011, 19(2): 132-140.
- [17] 黄锦波. 轻骨料混凝土和粉煤灰混凝土强度尺寸效应研究[D]. 北京:北京建筑工程学院, 2007.
- Huang J B. Study on strength size effect of lightweight aggregate concrete and fly ash concrete [D]. Beijing: Beijing Institute of Architectural Engineering, 2007.(in Chinese)
- [18] 王振宇, 丁建彤, 郭玉顺. 结构轻骨料混凝土的应力-应变全曲线[J]. 混凝土, 2005(3):39-41.
- Wang Zh Y, Ding J T, Guo Y Sh. Stress-strain curves of structural lightweight aggregate concretes [J]. Concrete, 2005(3):39-41.(in Chinese)
- [19] Du X L, Jin L, Ma G W. Meso-element equivalent method for the simulation of macro mechanical properties of concrete [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2013, 22(5): 617-642.
- [20] Grassl P, Grégoire D, Solano L R, et al. Meso-scale modelling of the size effect on the fracture process zone of concrete[J]. International Journal of Solids & Structures, 2012, 49(13):1818-1827.
- [21] Song Z, 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.
- [22] Zhou X Q, Hao H. Modelling of compressive behaviour of concrete-like materials at high strain rate [J]. International Journal of Solids & Structures, 2008, 45(17): 4648-4661.
- [23] Jin L, Xu C, Han Y, et al. Effect of end friction on the dynamic compressive mechanical behavior of concrete under medium and low strain rates [J]. Shock and Vibration, 2016, 2016:1-20.
- [24] Du X, Jin L, Ma G. Numerical simulation of dynamic tensile-failure of concrete at meso-scale [J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 66(4):5-17.
- [25] 金浏, 杜修力. 加载速率对混凝土拉伸破坏行为影响的细观数值分析[J]. 工程力学, 2015, 32(8):42-49.
- Jin L, Du X L. Meso-scale numerical analysis of the effect of loading rate on the tensile failure behavior of concrete [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(8):42-49. (in Chinese)
- [26] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [27] Dilger W H, Koch R, Kowalczyk R. Ductility of plain and confined concrete under different strain rates [J]. Journal Proceedings, 1984, 81(1): 73-81.
- [28] 陈桂斌. 轻骨料混凝土力学性能的细观数值模拟研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007.
- Chen G B. Meso-numerical simulation of mechanical properties of lightweight aggregate concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [29] Bazant Z P, Caner F C, Adley M D, et al. Fracturing rate effect and creep in micro-plane model for dynamics [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(9): 962-970.
- [30] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1982, 3(1):1-12.
- Guo Zh H, Zhang X Q, Zhang D Ch, et al. Experimental investigation of the complete stress-strain curve of concrete [J]. Journal of Building Structures, 1982, 3(1):1-12.(in Chinese)

(本文责编:周小潭)