

# 轻集料混凝土单轴加载动力性能试验研究

沈丽

南昌大学共青学院, 中国·江西九江 332020

**摘要:** 论文针对轻集料混凝土在不同加载应变率下的动力性能进行了系统的试验研究。选取三种强度等级 (C20、C40 和 C60) 的轻集料混凝土, 在四种不同的加载应变率 ( $10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$  和  $10^{-2}/s$ ) 下进行单轴受压、劈拉和剪切试验。通过分析试验结果, 探讨了加载应变率对轻集料混凝土力学性能的影响规律, 并从破坏形态和机理的角度进行了深入分析。研究表明: 随着加载应变率的增加, 轻集料混凝土的抗压强度、劈拉强度和剪切强度均呈现不同程度的提高; 不同强度等级的轻集料混凝土对加载应变率的敏感程度不同, 低强度混凝土的动力增强效应更为显著; 轻集料混凝土的破坏形态随加载应变率的增加而发生变化, 呈现出更为脆性的特征。本研究为轻集料混凝土在动力荷载作用下的工程应用提供了重要的理论依据和数据支撑。

**关键词:** 轻集料混凝土; 单轴加载; 动力性能; 加载应变率; 破坏机理

## Experimental Research on Uniaxial Loading Dynamic Performance of Lightweight Aggregate Concrete

Li Shen

Gongqing College of Nanchang University, Jiujiang, Jiangxi, 332020, China

**Abstract:** This paper conducts a systematic experimental study on the dynamic performance of lightweight aggregate concrete under different loading strain rates. Lightweight aggregate concrete of three strength levels (C20, C40 and C60) was selected at four different loading strain rates ( $10^{-5}/s$ ,  $10^{-4}/s$ ,  $10^{-3}/s$  and  $10^{-2}/s$ ) to carry out uniaxial compression, split tension and shear tests. By analyzing the test results, the influence of loading strain rate on the mechanical properties of lightweight aggregate concrete was discussed, and an in-depth analysis was conducted from the perspective of failure form and mechanism. The research results show that: with the increase of loading strain rate, the compressive strength, split tensile strength and shear strength of lightweight aggregate concrete increase to varying degrees; the sensitivity of lightweight aggregate concrete of different strength levels to loading strain rate Differently, the dynamic enhancement effect of low-strength concrete is more significant; the failure form of lightweight aggregate concrete changes with the increase of loading strain rate, showing more brittle characteristics. This study provides important theoretical basis and data support for the engineering application of lightweight aggregate concrete under dynamic loads.

**Keywords:** lightweight aggregate concrete; uniaxial loading; dynamic performance; loading strain rate; failure mechanism

## 0 前言

混凝土作为当前建筑工程中应用最为广泛的材料之一, 其力学性能直接影响着结构的安全性和耐久性。在实际工程中, 混凝土结构不仅承受静载荷, 还可能遭受地震、爆炸、冲击等动态荷载的作用。由于混凝土材料具有明显的应变率效应, 即其力学性能随加载速率的变化而发生显著改变, 因此研究混凝土的动力性能具有重要的理论意义和工程价值<sup>[1-3]</sup>。

轻集料混凝土作为一种新型混凝土材料, 由于其轻质、高强、保温隔热以及耐火性能优良等特点, 在建筑工程中得到了越来越广泛的应用<sup>[4]</sup>。然而, 目前关于轻集料混凝土动力性能的研究相对较少, 特别是在不同加载方式下的动力性能研究尚不充分。为了更好地发挥轻集料混凝土的优势, 并为其在动力荷载作用下的工程应用提供理论基础, 有必要对

轻集料混凝土的动力性能进行深入研究。

国内外学者对普通混凝土的动力性能已开展了大量研究。Watstein<sup>[5]</sup>最早对混凝土单轴受压动力性能进行了系统研究, 发现随着加载应变率的提高, 混凝土的抗压强度呈现出明显的增长趋势。Mellinger<sup>[6]</sup>对混凝土受拉动力性能进行了研究, 结果表明, 受拉加载方式下混凝土的动力增强效应比受压加载方式更为显著。李杰等<sup>[7-9]</sup>对混凝土受压动力性能的应力-应变全曲线进行了分析, 并深入研究了其破坏机理和本构关系。

然而, 上述研究主要集中在普通混凝土的受压和受拉动力性能方面, 对于轻集料混凝土的动力性能研究相对较少, 特别是在剪切加载方式下的动力性能研究几乎空白。鉴于此, 论文选取三种不同强度等级的轻集料混凝土, 在四种不同的加载应变率下进行单轴受压、劈拉和剪切试验, 系统

研究轻集料混凝土的动力性能,分析加载应变率对其力学性能的影响规律,并从破坏形态和机理的角度进行深入探讨,为轻集料混凝土在动力荷载作用下的工程应用提供重要的理论依据和数据支撑。

## 1 试验方案

### 1.1 试件设计

本研究选用三种强度等级的轻集料混凝土,分别为 C20、C40 和 C60。试件采用 100mm×100mm×100mm 的立方体。混凝土原材料选用普通硅酸盐水泥 P.O42.5,细骨料为河砂(细度模数 2.5,表观密度 2600kg/m<sup>3</sup>),粗骨料为连续级配的天然轻质陶粒(最大粒径 20mm)。对于 C40 和 C60 混凝土,添加了粉煤灰、矿粉和减水剂以提高强度和改善工作性。

根据 JGJ55—2011《普通混凝土配合比设计规程》,确定了三种强度等级轻集料混凝土的配合比,如表 1 所示。

表 1 不同强度等级轻集料混凝土配合比(质量比)

强度等级	水泥	水	细骨料	粗骨料	粉煤灰	矿粉	减水剂
C20	1	0.52	3.79	4.63	--	--	--
C40	1	0.65	3.18	4.14	0.23	0.31	0.014
C60	1	0.34	2.5	3.33	0.27	0.32	0.016

### 1.2 试验方法

考虑到地震荷载的作用特征,本研究选取了四种不同的加载应变率,分别为 10<sup>-5</sup>/s、10<sup>-4</sup>/s、10<sup>-3</sup>/s 和 10<sup>-2</sup>/s,其中 10<sup>-5</sup>/s 为静力加载应变率。试验采用液压伺服机和材料直剪仪进行加载,两种设备均配备独立的荷载传感器和位移传感器。

①受压试验:采用液压伺服机进行单轴受压试验,按照 GB/T50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》的要求进行。

②劈拉试验:采用专用劈拉模具结合液压伺服机进行劈拉试验,参照 GB/T50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》执行。

③剪切试验:采用材料直剪仪进行剪切试验,由于目前尚无统一的混凝土剪切试验标准方法,本研究参考文献的试验方案进行。剪切加载示意图如图 1 所示。

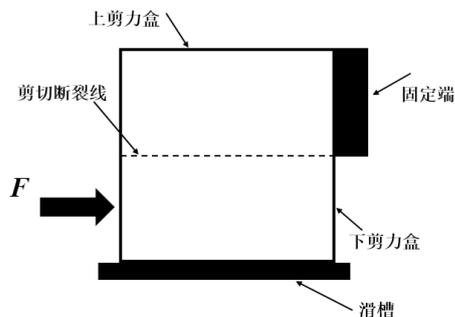


图 1 剪切加载示意图

剪切试验步骤如下:

A. 将混凝土试件放入剪力盒中,进行预加载以消除试件与剪力盒之间的间隙。预加载采用荷载控制方式,以 10kN/min 的速率加载至 15kN,然后卸载至 0kN,重复 3 次。

B. 完成预加载后,开始正式加载。采用位移控制方式,按照设定的应变率进行加载,直至试件破坏。

C. 考虑混凝土材料的离散性,每种工况制作 3 个平行试件,取其平均值进行分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 轻集料混凝土动力性能分析

#### 2.1.1 受压动力性能

表 2 给出了三种强度等级轻集料混凝土在不同加载应变率下的抗压强度测试结果。

表 2 不同加载应变率下轻集料混凝土抗压强度(MPa)

强度等级	10 <sup>-5</sup> /s	10 <sup>-4</sup> /s	10 <sup>-3</sup> /s	10 <sup>-2</sup> /s
C20	21.5	23.2	25.8	28.7
C40	42.3	44.8	48.6	52.9
C60	62.7	65.8	70.4	75.6

从表 2 可以看出,随着加载应变率的增加,三种强度等级轻集料混凝土的抗压强度均呈现出不同程度的增长。为了更直观地反映加载应变率对抗压强度的影响,定义动态增长因子(DIF)为动态抗压强度与静态抗压强度(10<sup>-5</sup>/s 下的强度)的比值。不同强度等级轻集料混凝土抗压强度 DIF 随加载应变率的变化关系:

①对于所有强度等级的轻集料混凝土,动态增长因子 DIF 均随加载应变率的增加而增大,表现出明显的应变率敏感性。

②低强度轻集料混凝土(C20) DIF 增长速率最快,中强度(C40)次之,高强度(C60)最慢。这表明低强度轻集料混凝土对加载应变率的敏感程度更高,其动力增强效应更为显著。

③在较低应变率范围(10<sup>-5</sup>/s 至 10<sup>-3</sup>/s),DIF 随应变率的增长呈现近似线性关系。而在高应变率(10<sup>-2</sup>/s)下,DIF 增长速率有所加快,呈现出非线性特征。

#### 2.1.2 劈拉动力性能

表 3 给出了三种强度等级轻集料混凝土在不同加载应变率下的劈拉强度测试结果。

表 3 不同加载应变率下轻集料混凝土劈拉强度(MPa)

强度等级	10 <sup>-5</sup> /s	10 <sup>-4</sup> /s	10 <sup>-3</sup> /s	10 <sup>-2</sup> /s
C20	1.8	2	2.3	2.7
C40	3.2	3.5	3.9	4.5
C60	4.5	4.8	5.3	6

从表 3 可以看出,随着加载应变率的增加,三种强度等级轻集料混凝土的劈拉强度均呈现出增长趋势。为了更好地分析劈拉强度的动态增长特性,同样定义动态增长因子

(DIF) 为动态劈拉强度与静态劈拉强度 ( $10^{-5}/s$  下的强度) 的比值。不同强度等级轻集料混凝土劈拉强度 DIF 随加载应变率的变化关系:

①劈拉强度的 DIF 随加载应变率的增加而增大, 表现出明显的应变率敏感性, 这与抗压强度的变化趋势类似。

②与抗压强度相比, 劈拉强度的 DIF 增长更为显著。在  $10^{-2}/s$  的应变率下, C20、C40 和 C60 轻集料混凝土的劈拉强度 DIF 分别达到了 1.50、1.41 和 1.33, 高于相应的抗压强度 DIF。

③低强度轻集料混凝土 (C20) 的劈拉强度 DIF 增长速率最快, 中强度 (C40) 次之, 高强度 (C60) 最慢。这一现象与抗压强度的变化规律一致, 进一步说明低强度轻集料混凝土对加载应变率的敏感程度更高。

④在整个应变率范围内 ( $10^{-5}/s$  至  $10^{-2}/s$ ), 劈拉强度 DIF 随应变率的增长呈现出更加明显的非线性特征, 特别是在高应变率下, DIF 增长速率明显加快。

### 2.1.3 剪切动力性能

表 4 给出了三种强度等级轻集料混凝土在不同加载应变率下的剪切强度测试结果。

表 4 不同加载应变率下轻集料混凝土剪切强度 (MPa)

强度等级	$10^{-5}/s$	$10^{-4}/s$	$10^{-3}/s$	$10^{-2}/s$
C20	3.6	3.9	4.4	5
C40	6.8	7.3	8.1	9.1
C60	9.7	10.3	11.2	12.4

从表 4 可以看出, 随着加载应变率的增加, 三种强度等级轻集料混凝土的剪切强度均呈现出增长趋势。为了更好地分析剪切强度的动态增长特性, 同样定义动态增长因子 (DIF) 为动态剪切强度与静态剪切强度 ( $10^{-5}/s$  下的强度) 的比值。不同强度等级轻集料混凝土剪切强度 DIF 随加载应变率的变化关系:

①剪切强度的 DIF 随加载应变率的增加而增大, 表现出明显的应变率敏感性, 这与抗压强度和劈拉强度的变化趋势一致。

②剪切强度的 DIF 增长幅度介于抗压强度和劈拉强度之间。在  $10^{-2}/s$  的应变率下, C20、C40 和 C60 轻集料混凝土的剪切强度 DIF 分别达到了 1.39、1.34 和 1.28。

③低强度轻集料混凝土 (C20) 的剪切强度 DIF 增长速率最快, 中强度 (C40) 次之, 高强度 (C60) 最慢。这一现象与抗压强度和劈拉强度的变化规律一致, 进一步验证了低强度轻集料混凝土对加载应变率的敏感程度更高。

④在整个应变率范围内 ( $10^{-5}/s$  至  $10^{-2}/s$ ), 剪切强度 DIF 随应变率的增长呈现出近似线性的关系, 这一特征与抗压强度和劈拉强度的非线性增长趋势有所不同。

## 2.2 破坏形态分析

通过观察试验过程中轻集料混凝土试件的破坏形态, 可以深入理解加载应变率对其力学性能的影响机理。以下分

别对受压、劈拉和剪切试验中的破坏形态进行分析。

### 2.2.1 受压破坏形态

在静力加载 ( $10^{-5}/s$ ) 条件下, 轻集料混凝土试件的破坏形态主要表现为垂直于加载方向的裂缝, 裂缝数量较少, 且裂缝宽度较大。随着加载应变率的增加, 试件的破坏形态发生了明显变化:

①裂缝数量增多, 但单条裂缝的宽度减小。这表明在高应变率下, 应力在试件内部分布更加均匀, 导致多条裂缝同时发展。

②裂缝走向逐渐由垂直于加载方向转变为斜向。这可能是由于高应变率下, 轻集料混凝土内部应力状态更加复杂, 剪切应力的作用更为明显。

③破坏表面更加粗糙, 且有更多的骨料断裂现象。这说明在高应变率下, 轻集料骨料与水泥砂浆之间的界面结合更加紧密, 骨料对混凝土强度的贡献增加。

### 2.2.2 劈拉破坏形态

在静力加载条件下, 轻集料混凝土试件的劈拉破坏主要沿着加载方向形成一条贯穿性裂缝。随着加载应变率的增加, 破坏形态呈现以下特征:

①主裂缝周围出现更多的微裂缝, 形成“裂缝带”。这表明在高应变率下, 应力集中现象减弱, 能量释放更加分散。

②裂缝路径变得更加曲折, 不再是简单的直线形态。这可能是由于高应变率下, 裂缝扩展速度增加, 导致裂缝更容易绕过强度较高的骨料。

③破坏表面更加平整, 骨料与砂浆界面脱粘现象减少。这说明在高应变率下, 轻集料骨料与水泥砂浆之间的界面结合强度提高。

### 2.2.3 剪切破坏形态

在静力加载条件下, 轻集料混凝土试件的剪切破坏主要表现为沿剪切面形成一条主裂缝。随着加载应变率的增加, 破坏形态发生了以下变化:

①剪切破坏面变得更加粗糙, 且出现更多的次生裂缝。这表明在高应变率下, 剪切应力的分布更加复杂, 能量释放方式更加多样化。

②剪切破坏面与加载方向的夹角略有增大。这可能是由于高应变率下, 轻集料混凝土的内摩擦角增大, 导致剪切破坏面倾角增加。

③破坏面上的骨料断裂现象增多。这说明在高应变率下, 轻集料骨料对混凝土剪切强度的贡献增加, 骨料与砂浆之间的界面结合更加紧密。

## 3 讨论

### 3.1 动力增强效应机理分析

通过上述试验结果和破坏形态分析, 可以从以下几个方面解释轻集料混凝土在高应变率下表现出的动力增强效应:

①惯性效应：在高应变率加载下，轻集料混凝土内部产生显著的惯性力，这种惯性力对裂缝的扩展起到了抑制作用，从而提高了混凝土的强度。

②应力波传播：高应变率加载会在混凝土内部产生应力波，应力波的传播和反射会导致应力分布更加均匀，减少应力集中现象，从而提高混凝土的承载能力。

③微裂缝效应：在高应变率下，轻集料混凝土内部会形成大量微裂缝，这些微裂缝可以吸收和消耗部分能量，延缓宏观裂缝的形成和扩展，从而提高混凝土的强度和韧性。

④自由水效应：轻集料混凝土内部的自由水在高应变率加载下会产生“Stefan 效应”，即液体在快速加载下表现出类似固体的特性，这种效应可以提高混凝土的强度和刚度。

⑤界面强化效应：高应变率加载会导致轻集料骨料与水泥砂浆界面的结合更加紧密，提高了界面传力效率，从而增强了混凝土的整体性能。

### 3.2 强度等级对动力增强效应的影响

试验结果表明，低强度轻集料混凝土（C20）的动力增强效应最为显著，而高强度轻集料混凝土（C60）的动力增强效应相对较弱。这一现象可以从以下几个方面进行解释：

①孔隙结构：低强度轻集料混凝土通常具有更高的孔隙率和更大的孔隙尺寸。在高应变率加载下，这些孔隙可以更有效地吸收和消耗能量，从而表现出更明显的动力增强效应。

②微裂缝发展：低强度轻集料混凝土内部存在更多的初始微裂缝。在高应变率加载下，这些微裂缝的扩展和相互连接需要消耗更多的能量，从而提高了混凝土的动力强度。

③界面特性：低强度轻集料混凝土中，骨料与砂浆之间的界面结合相对较弱。在高应变率加载下，界面强化效应更加明显，导致强度提升幅度更大。

④应变率敏感性：低强度轻集料混凝土中的水泥砂浆基体通常具有更高的应变率敏感性，这导致其高应变率下的强度增长更加显著。

### 3.3 不同加载方式下动力增强效应的比较

试验结果显示，轻集料混凝土在劈拉、剪切和受压三种加载方式下的动力增强效应存在差异，其中劈拉强度的动力增强效应最为显著，剪切次之，受压最弱。这一现象可以从以下几个方面进行解释：

①应力状态：劈拉试验中，试件处于单向拉伸应力状态；剪切试验中，试件主要承受剪应力；而受压试验中，试件处于三向压应力状态。不同的应力状态导致微裂缝的发展和扩展方式不同，从而影响动力增强效应的程度。

②缺陷敏感性：轻集料混凝土对拉伸应力最为敏感，微小缺陷容易导致应力集中和裂缝扩展。在高应变率下，这种敏感性被抑制，导致劈拉强度的动力增强效应最为显著。

③能量耗散机制：在不同的加载方式下，轻集料混凝土

内部的能量耗散机制不同。劈拉试验中，能量主要通过裂缝面的形成和扩展来耗散；剪切试验中能量通过剪切面的滑移和摩擦来耗散；而在受压试验中，能量主要通过材料的压缩变形来耗散。这些不同的能量耗散机制在高应变率下表现出不同的敏感性，从而导致动力增强效应的差异。

④惯性效应：在不同的加载方式下，惯性效应的影响程度不同。劈拉试验中，惯性效应对裂缝扩展的抑制作用最为明显；剪切试验中，惯性效应主要影响剪切面的相对滑移；而在受压试验中，惯性效应对整体变形的影响相对较小。

⑤材料内部结构：轻集料混凝土的内部结构（如骨料分布、孔隙分布等）在不同加载方式下发挥的作用不同。例如，在劈拉试验中，骨料对裂缝扩展的阻碍作用在高应变率下更加显著；而在受压试验中，骨料的支撑作用在不同应变率下的差异相对较小。

## 4 结论

本研究通过对三种强度等级（C20、C40 和 C60）的轻集料混凝土在四种不同加载应变率（ $10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$  和  $10^{-2}/s$ ）下进行单轴受压、劈拉和剪切试验，系统研究了轻集料混凝土的动力性能。主要结论如下：

①轻集料混凝土的抗压强度、劈拉强度和剪切强度均随加载应变率的增加而提高，表现出明显的动力增强效应。在  $10^{-2}/s$  的应变率下，C20、C40 和 C60 轻集料混凝土的抗压强度 DIF 分别达到了 1.33、1.25 和 1.21；劈拉强度 DIF 分别达到了 1.50、1.41 和 1.33；剪切强度 DIF 分别达到了 1.39、1.34 和 1.28。

②低强度轻集料混凝土（C20）的动力增强效应最为显著，中强度（C40）次之，高强度（C60）最弱。这一现象可能与低强度混凝土的孔隙结构、微裂缝发展、界面特性和应变率敏感性等因素有关。

③在三种加载方式中，轻集料混凝土劈拉强度的动力增强效应最为显著，剪切强度次之，抗压强度最弱。这一现象可能与不同加载方式下的应力状态、缺陷敏感性、能量耗散机制、惯性效应和材料内部结构等因素有关。

④轻集料混凝土的破坏形态随加载应变率的增加而发生变化。在高应变率下，受压破坏表现为裂缝数量增多、裂缝走向趋于斜向、破坏表面更加粗糙；劈拉破坏表现为裂缝带形成、裂缝路径更加曲折、破坏表面更加平整；剪切破坏表现为破坏面更加粗糙、剪切面倾角增大、骨料断裂现象增多。

轻集料混凝土的动力增强效应可以从惯性效应、应力波传播、微裂缝效应、自由水效应和界面强化效应等方面进行解释。这些机理在不同强度等级和不同加载方式下的作用程度不同，导致了轻集料混凝土动力性能的复杂性。

本研究的结果为轻集料混凝土在动力荷载作用下的工程应用提供了重要的理论依据和数据支撑。在实际工程中，

应充分考虑轻集料混凝土的动力增强效应,合理利用其在高应变率下的性能优势。同时,还需注意不同强度等级轻集料混凝土对动力荷载的敏感程度差异,在进行结构设计时应针对具体情况分析和优化。

未来的研究方向可以包括:

①进一步扩大应变率范围,研究轻集料混凝土在更高应变率下的动力性能,以满足爆炸、冲击等极端荷载工况的需求。

②深入研究轻集料混凝土的动力本构关系,建立考虑应变率效应的力学模型,为数值模拟和工程设计提供理论基础。

③探索不同类型轻集料(如膨胀页岩、陶粒、珍珠岩等)对混凝土动力性能的影响,优化轻集料混凝土的配合比设计。

④研究纤维增强、掺合料等改性措施对轻集料混凝土动力性能的影响,进一步提高其在动力荷载作用下的性能。

⑤开展轻集料混凝土结构构件的动力性能研究,建立从材料到构件的动力性能评估体系,为工程应用提供更加全面的指导。

#### 参考文献:

- [1] 孙吉书,窦远明,周戟,等.应变速率对混凝土抗压特性影响的试验研究[J].混凝土与水泥制品,2011,38(5):1-3.
- [2] 余振鹏,黄侨,任政.轻集料混凝土局部受压试验及动力本构分析

[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(3):18-25.

- [3] 张海,徐慎春,田慧.超高性能钢筋混凝土与普通钢筋混凝土柱结构抗爆性能的比较研究[J].混凝土与水泥制品,2014,41(7):44-46.
- [4] 刘加平,王铁成,张宏图.轻集料混凝土力学性能研究现状与展望[J].建筑结构学报,2019,40(S2):269-279.
- [5] Watstein D. Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete[J]. ACI Journal,1953,49(4):729-744.
- [6] Mellinger F M, Birkimer D L. Measurement of stress and strain on cylindrical test specimens of rock and concrete under impact loading[R]. Technical Report 4-46, U.S. Army Corps of Engineers, Ohio River Division Laboratories, Cincinnati, Ohio,1966.
- [7] 李杰,晏小欢,任晓丹.不同加载速率下混凝土单轴受压性能大样本试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(8):66-75.
- [8] 曾莎洁,李杰.混凝土单轴受压动力全曲线试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2013,41(1):7-10.
- [9] 李杰,任晓丹.混凝土静力与动力损伤本构模型研究进展述评[J].力学进展,2010,40(3):284-297.

作者简介:沈丽(1984-),女,副教授,从事建筑管理研究。

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目“轻集料混凝土单轴加载动力性能试验研究”,项目编号:GJJ2203802。