

# 混凝土单轴受压动力全曲线试验研究

曾莎洁<sup>1</sup>, 李杰<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**采用 MTS 815.04 岩石力学试验机对混凝土单轴受压动力本构关系进行系统试验研究。考虑五种不同加载速度, 在位移和应变率双重控制下, 得到动力加载条件下单轴受压应力—应变全曲线。根据试件的破坏特点, 讨论动力加载与静载条件下试件破坏形态的区别, 分析峰值应力、峰值应变以及弹性模量等力学参数的应变率效应, 并与已有试验结果进行对比。结果表明: 本次试验得到的结果揭示了混凝土在单轴受压条件下动力加载全过程的非线性性能, 为正确理解混凝土在动力加载条件下的破坏机理提供试验依据。

**关键词:** 混凝土; 动力加载; 应变率效应; 全曲线

**中图分类号:** TU313

**文献标志码:** A

## Experimental Study on Uniaxial Compression Behavior of Concrete Under Dynamic Loading

ZENG Shajie<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. The State Key Laboratory on Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A systematic experimental investigation was carried out on dynamic mechanical behaviors of concrete material subjected to uniaxial compression. The cylindrical specimens were tested with a hydraulic test machine named MTS Model 815.04 Rock and Concrete Mechanics Testing System. In the controlled condition of the displacement and the strain-rate, the dynamic fully stress-strain curves were obtained with five different loading rates. The difference of the failure modes between static loading condition and the dynamic loading conditions is also discussed. Strain-rate effects on the compressive strength, the peak strain, the elastic modulus and the fully stress-strain curves were investigated based on the experimental results. The study results reveal the nonlinear property of concrete material under uniaxial dynamic compression loading and provide a test basis for an understanding of the physical mechanisms during dynamic loading.

**Key words:** concrete; dynamic loading; strain-rate effect; fully stress-strain curve

混凝土是一种率敏感性材料, 在诸如地震、强风等动力荷载作用下, 混凝土表现出典型的非线性、随机性以及明显的率相关特性。因此, 对上述三个特性的合理描述, 构成了混凝土动力本构关系的研究核心。然而, 作为混凝土动力本构关系研究的重要基础, 混凝土动力加载试验仍处于强度参数的研究层面<sup>[1]</sup>, 对于混凝土在动力加载条件下全过程性质的考察尚缺乏足够的试验数据基础。

本文针对混凝土单轴受压动力本构关系进行系统的试验研究, 得到混凝土在动力荷载作用下应力—应变全曲线, 定量反映动力荷载作用下混凝土材料的非线性特性, 为建立考虑动力损伤的混凝土弹塑性本构关系模型提供试验基础。

## 1 试验概况

### 1.1 试件制备

试件设计强度等级为 C40, 采用普通硅酸盐混凝土材料, 骨料选用最大粒径 25 mm 的连续级配卵石, 试验配比为水泥: 水: 砂: 石 = 1.00 : 0.42 : 1.41 : 2.62。根据国际通用试件标准, 并为了与后续考虑围压的约束混凝土动力试验进行对比, 试件设计为圆柱体, 其设计尺寸为  $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。混凝土采用人工浇注, 机械振捣, 钢模成型, 24 h 后拆模, 标准养护 28 d。

### 1.2 试验设备

本次试验采用一套加载系统和两套测量系统。加载系统采用 MTS 815.04 岩石力学试验机, 试验机自带高精度荷载传感器和高精度位移传感器, 其

收稿日期: 2011-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(90715033)

第一作者: 曾莎洁(1983—), 女, 博士生, 主要研究方向为现代混凝土结构。E-mail: zsjfly@126.com

通讯作者: 李杰(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为现代混凝土结构及生命线工程。E-mail: lijie@tongji.edu.cn

作用在于构成闭环控制加载系统和本试验的主要测量系统,测量数据由试验机配套程序自动记录.另一套测量系统则由附加引伸计采集系统构成(见图1).

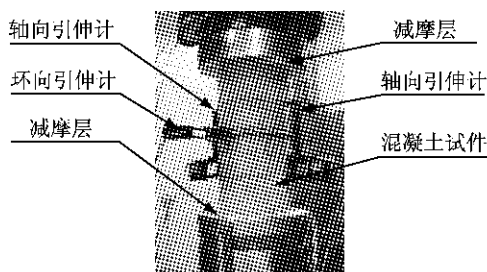


图1 加载示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment

### 1.3 附加变形标定

在混凝土受压试验中,混凝土试件和钢制加载板都会发生侧向变形.同时,由于两者泊松比的不同,加载板对试件会产生侧向约束效应,使试件的抗压强度大大增加.为消除侧向约束的影响,本次试验采用两层0.1 mm厚聚四氟乙烯薄膜作为减摩层,经试验证明效果较好.但由于减摩层本身刚度较小,在加载过程中会产生一定变形,并累加到最终的试验结果中.同时,由于试验机加载压盘由螺钉连接组成,其连接空隙在加载过程中会发生一定程度的变形,因而最终影响试验的测量结果.因此,为保证后期的试验数据处理精度,试验中统一标定了上述两种附加变形的力 $F$ 和变形 $\Delta$ 之间的关系,如图2所示.

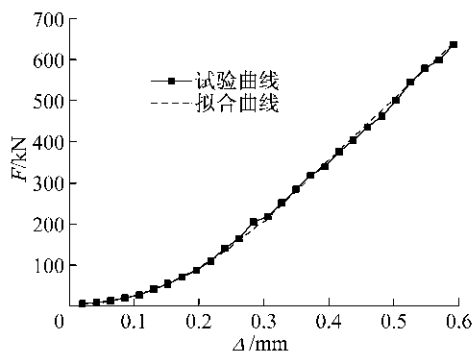


图2 附加变形测量曲线

Fig.2 Force-deformation curve of antifriction layer and machine

## 2 试验结果及分析

对强度等级为C40的混凝土试件在单轴静力和动力轴向压缩作用下的应力—应变全过程进行了系统的试验研究.本次试验共采用了五种加载速度,分别为0.002,0.020,0.200,1.000和7.000 mm·

s<sup>-1</sup>,其对应的应变率 $\dot{\epsilon}$ 分别为 $1.0 \times 10^{-5}$ , $1.0 \times 10^{-4}$ , $1.0 \times 10^{-3}$ , $5.0 \times 10^{-3}$ 和 $3.5 \times 10^{-2}$  s<sup>-1</sup>.相对于应变率为 $1.0 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup>的静力加载而言,动力加载主要考虑地震作用量级的加载速度,即应变率范围为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$  s<sup>-1</sup>,并根据加载速度将试验分为五组,详见表1.

表1 试件汇总表

Tab.1 Classification of specimens

试件编号	应变率/s <sup>-1</sup>	受力状态	试件个数
SPC401	$1.0 \times 10^{-5}$	单轴受压	9
SPC402	$1.0 \times 10^{-4}$	单轴受压	9
SPC403	$1.0 \times 10^{-3}$	单轴受压	9
SPC404	$5.0 \times 10^{-3}$	单轴受压	9
SPC405	$3.5 \times 10^{-2}$	单轴受压	9

### 2.1 应力—应变全曲线

应力—应变( $\sigma - \epsilon$ )全曲线能够全面地体现混凝土材料在加载过程中的力学性能,是进行其他力学参数分析的基础.将每组试验结果的平均值列于同一坐标系中,得到不同应变率作用下的混凝土应力—应变全曲线均值曲线,如图3所示.

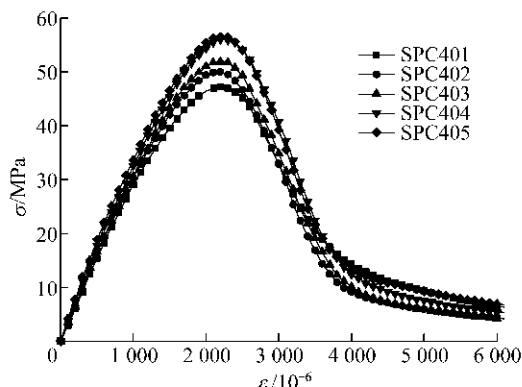


图3 不同应变率下应力—应变均值曲线

Fig.3 Stress-strain average curves at different strain rates

从图3可以看出:①动力加载条件下的单轴受压应力—应变曲线形状仍然符合经典单轴受压试验的基本描述;②试验数据的均值曲线具有较好的连续性和光滑性,说明试验曲线具有内在的一致性;③动力加载条件对试验结果的影响主要体现在混凝土抗压强度以及变形特性方面;④随着应变率的增加,混凝土吸能能力增加;⑤试件进入下降段后,尤其是裂缝发展较为充分以后(即拐点以后),应变率对曲线的影响规律不明显.本文经过初步分析认为,进入该区域以后,曲线发展主要是由试件裂缝的发展情况决定,而裂缝的发展又具有较大的随机性,从而导致该区域的规律不明显.

## 2.2 抗压强度

抗压强度是描述混凝土力学性能的重要力学参数,根据试验测得的全曲线数据,取在不同应变率条件下应力最大值为其对应的试件抗压强度值。从图3所示的不同应变率下应力—应变均值曲线可以发现:应变率对混凝土抗压强度的影响最为突出显著。为了进一步研究抗压强度的应变率效应,本文分别计算了不同加载条件下的动力提高系数(dynamic increase factor, DIF)随应变率的变化情况。

定义动力提高系数<sup>[1]</sup>

$$\alpha_{\text{DIF}} = \sigma_d / \sigma_s \quad (1)$$

式中: $\sigma_d$ 为动力加载条件下的峰值应力,本文中对应的应变率分别为 $1.0 \times 10^{-4}$ ,  $1.0 \times 10^{-3}$ ,  $5.0 \times 10^{-3}$ ,  $3.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ;  $\sigma_s$ 为静力加载条件下的峰值应力,本文中对应的应变率为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

将上式计算结果与已有试验结果<sup>[2-7]</sup>绘于同一坐标系中,如图4所示。

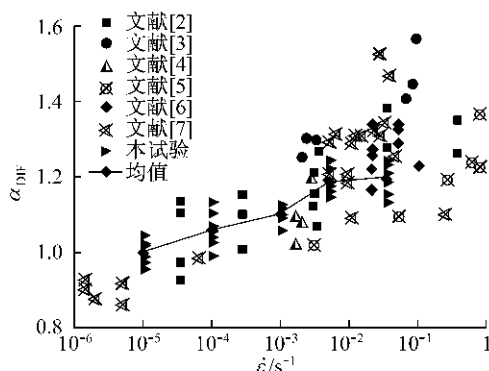


图4 强度提高系数随应变率变化情况

Fig.4 Effect of strain rates on compressive strength

从图4可以看出,随着应变率的增加,抗压强度呈明显增加趋势,这与其他研究者的结论基本一致<sup>[2-7]</sup>,并且材料随机性引起的峰值强度随机性会覆盖掉一部分应变率效应。

## 2.3 变形特性

应变率对混凝土性能的影响不仅体现在混凝土的抗压强度方面,对混凝土的变形特性也有着重要的影响。

### 2.3.1 弹性模量

弹性模量是描述混凝土材料本构特性的又一重要参数,且其值随着应变率的增加而增加的结论已经被广大研究者们所接受,但其增长趋势低于抗压强度的增长<sup>[4,6,8-10]</sup>。

为了定量地描述弹性模量随应变率的变化情况,本文采用45%峰值应力处的割线模量作为弹性模量的代表值

$$E = \frac{\sigma_{0.45} - \sigma_0}{\epsilon_{0.45} - \epsilon_0} \quad (2)$$

式中: $E$ 为45%峰值应力处的割线模量, $\sigma_{0.45}$ 为45%峰值应力处的应力, $\sigma_0$ 为初始应力值, $\epsilon_{0.45}$ 为 $\sigma_{0.45}$ 所对应的应变值, $\epsilon_0$ 为初始应变值。

计算结果表明,弹性模量随应变率的增加呈增加趋势(见表2)。

表2 弹性模量试验结果

试件编号	应变率/ $\text{s}^{-1}$	弹性模量均值/MPa	相对增量/%
SPC401	$1.0 \times 10^{-5}$	32 253	
SPC402	$1.0 \times 10^{-4}$	32 514	0.8
SPC403	$1.0 \times 10^{-3}$	32 772	1.6
SPC404	$5.0 \times 10^{-3}$	34 438	6.8
SPC405	$3.5 \times 10^{-2}$	35 829	11.1

### 2.3.2 峰值应变

对受压试验而言,应变率对峰值应变的影响一直没有明确的结论,主要存在三种观点:①随应变率增加,峰值应变减小<sup>[11-12]</sup>;②混凝土的峰值应变基本不变<sup>[3,5,13-14]</sup>;③随应变率增加,峰值应变增加<sup>[15-16]</sup>。一般情况下,在 $10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的应变率作用下,混凝土的峰值应变在减少30%到增加40%之间变化。

鉴于此,本次试验也重点对峰值应变随应变率的变化情况(应变提高系数, $\alpha_{\text{DIF-}\epsilon}$ )进行了系列对比研究,并将对比结果绘于图5中。本文试验结果表明,峰值应变随应变率的变化可以忽略不计,即随着应变率的增加,混凝土的峰值应变基本不变。同时,样本试验结果也表明,峰值应变的随机性掩盖了部分材料本身的率相关性。因此,不能忽略随机性与率相关性间的耦合效应。

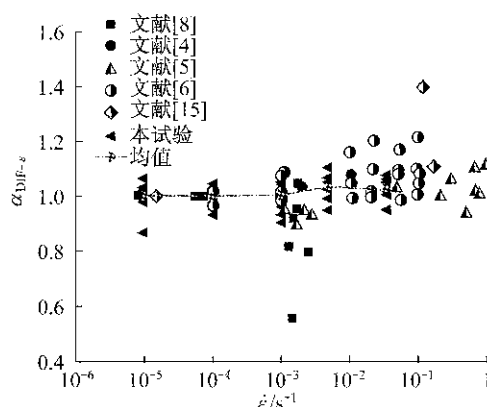


图5 峰值应变随应变率变化情况

Fig.5 Effect of strain rates on compressive peak strain

## 2.4 破坏形态

混凝土在不同应力状态和加载条件下的破坏形态有着显著的差别,而其破坏过程及形态对理解混凝土损伤和破坏机理有着指导性意义。

在单轴静载条件下,裂缝大部分沿粗骨料与砂浆之间的界面层发展,即黏结破坏,少量粗骨料被整

齐地劈开。相对于不同的应变率,试件的破坏形态存在以下区别:①静力加载条件下,裂缝多沿试件中部均匀分布;②动力加载条件下,试件的竖向裂缝基本上下贯通,并且一般有1~2条主裂缝;③随着应变率的增加,试件受压裂缝扩展速度增快,且裂缝逐步发展为斜向裂缝。经初步分析认为,在快速加载条件下,试验持续时间较短,试件内无法形成均匀的应力分布,裂缝得不到充分的发展,从而导致了不同应变率下破坏形态的区别。

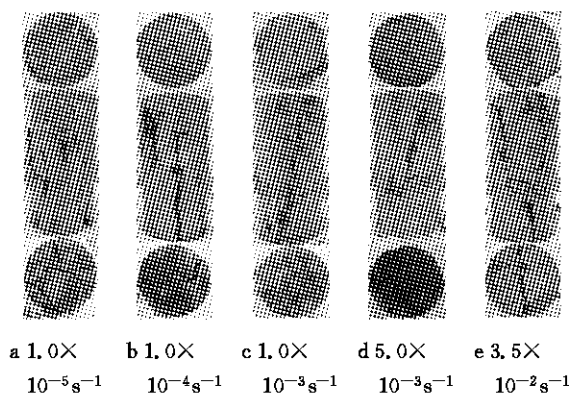


图6 不同应变率下单轴受压试件破坏形态

Fig.6 Failure modes under uniaxial compression at different strain rates

### 3 结论

(1)应力—应变全曲线的应变率效应主要表现在开始加载至裂缝充分发展阶段,裂缝发展较为充分以后(即下降段拐点以后),应变率对曲线的影响规律不明显。

(2)材料本身的随机性会覆盖掉一部分应变率效应,因此,在混凝土材料动力本构关系的研究中,需考虑非线性、随机性和率相关性的相互耦合。

(3)随着应变率的增加,混凝土峰值强度呈明显增加趋势,峰值应变基本不变,弹性模量增加,吸能能力增强。

(4)随着应变率的增加,试件受压裂缝扩展速度增快,且裂缝由竖向裂缝逐步发展成为斜向裂缝。

### 参考文献:

- [1] Bischoff P H, Perry S H. Compression behaviour of concrete at high strain rates [J]. Material and Structures, 1991, 144 (24): 425.
- [2] 董毓利, 谢和平, 赵鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程的实验研究及其本构模型[J]. 水利学报, 1997(7): 72. DONG Yuli, XIE Heping, ZHAO Peng. Experimental study and constitutive model on concrete under compression with different strain rate [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(7): 72.
- [3] Hatano T, Tsutsumi H. Dynamical compressive deformation and failure of concrete under earthquake load [C]// Proceedings of Second World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo: Science Council of Japan, 1960: 1963-1978.
- [4] Takeda J, Tachikawa H. The mechanical properties of several kinds of concrete at compressive, tensile, and flexural tests in high rates of loading [J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1962, 77: 1.
- [5] Cowell W L. Dynamic properties of plain Portland cement concrete [R]. Port Hueneme: US Naval Civil Engineering Laboratory, 1966.
- [6] Bresler B, Bertero V V. Influence of high strain rate and cyclic loading of unconfined and confined concrete in compression [C]// Proceedings of Second Canadian Conference on Earthquake Engineering. Hamilton: McMaster University, 1975: 1-13.
- [7] Kvirikadze O P. Determination of the ultimate strength and modulus of deformation of concrete at different rates of loading [C]// Proceedings of International Symposium on Testing In-Situ Concrete Structures. Budapest: RILEM, 1977: 109-117.
- [8] Ban S, Muguruma H. Behaviour of plain concrete under dynamic loading with straining rate comparable to earthquake loading [C]// Proceedings of Second World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo: Science Council of Japan, 1960: 1979-1993.
- [9] Mainstone R J. Properties of materials at high rates of straining or loading [J]. Materials and Structures, 1975, 8 (44): 102.
- [10] 肖诗云, 林皋, 遆静洲, 等. 应变率对混凝土抗压特性的影响 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(5): 35. XIAO Shiyun, LIN Gao, LU Jingzhou, et al. Effect of strain rate on dynamic behavior of concrete in compression [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2002, 35(5): 35.
- [11] Hughes B P, Gregory R. Concrete subjected to high rates of loading in compression [J]. Magazine of Concrete Research, 1972, 24(78): 25.
- [12] Dilger W H, Koch R, Kowalczyk R. Ductility of plain and confined concrete under different strain rates [J]. ACI Journal, 1984, 81(1): 73.
- [13] 吕培印, 宋玉普. 混凝土动态压缩试验及其本构模型[J]. 海洋工程, 2002, 20(2): 43. LÜ Peiyin, SONG Yupu. Dynamic compressive test of concrete and its constitutive model [J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(2): 43.
- [14] 闫东明, 林皋. 混凝土单轴动态压缩特性试验研究[J]. 水利学与工程技术, 2005(6): 8. YAN Dongming, LIN Gao. Experimental study on the uniaxial dynamic compression properties of concrete [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2005(6): 8.
- [15] Rostasy F S, Hartwich K. Compressive strength and deformation of steel fiber reinforced concrete under high rate of strain [J]. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 1985, 7(1): 21.
- [16] Ahmad S H, Shah S P. Behaviour of hoop confined concrete under high strain rates [J]. ACI Journal, 1985, 82(5): 634.