

文章编号: 1001-1455(2002)03-0242-05

冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系

胡时胜^{1,2}, 王道荣²

(1. 中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900;
2. 中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 利用改装的杆径为 74mm 的直锥变截面式大尺寸 Hopkinson 压杆对混凝土材料进行冲击压缩实验, 系统研究了混凝土的应变率硬化效应, 采用一种新的方法——“损伤冻结”法对混凝土材料在冲击载荷下的损伤软化效应进行了系统研究, 给出了冲击载荷下混凝土的损伤演化方程; 在对数据进行合理分析的基础上, 结合粘弹性本构理论, 得到混凝土材料的损伤型线性粘弹性本构关系。

关键词: 混凝土材料; Hopkinson 压杆; 动态本构关系

中图分类号: O347; O383 文献标识码: A

*

1 引 言

混凝土是一种应用极其广泛的建筑材料, 各种各样混凝土建筑物大多数承受着变化缓慢的准静态载荷, 但是也有些重要建筑物承受着各种变化剧烈的冲击载荷。从材料的组成成分来看, 混凝土是一种硅酸盐类复合材料, 其成分复杂, 变化因素多, 表现为非均质、非线性及脆性破坏等。人们对它的力学性能和破坏机理的认识远不如金属和高聚物, 而对它在冲击条件下动态力学性能的了解则更少, 因此, 开展这项研究工作可填补这方面的空缺, 具有十分重要的学术意义。

系统研究混凝土动态力学性能只是在最近 20 年才开始, 之前的研究大多数局限于准静态条件下, 或是利用液压(或气动)设备研究它们在低应变率下的动态力学性能或是利用落锤装置测量它的冲击抗压强度, 利用落锤使加载的应变率在一定程度上得到提高, 但由于落锤本身的惯性对加载的影响不能得到合理的处理, 从而使实验结果误差较大。为了较精确地测定混凝土材料的动态力学性能, 人们相继建起了 $\Phi 76\text{mm}$ 的大尺寸 SHPB^[1], $\Phi 50\text{mm}$ 和 $\Phi 100\text{mm}$ 的 SHPB^[2] 以及 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ ^[3] 的束型 SHPB 等, 并利用所测到的结果讨论了应变率效应, 骨料粒径的影响等, 有关材料的动态本构关系的讨论则不多。在本文中, 我们将利用改装的直锥变截面 $\Phi 74\text{mm}$ 的大尺寸的 Hopkinson^[4] 压杆, 对混凝土的应变率效应和损伤软化效应进行研究, 并进而给出它的损伤型粘弹性动态本构方程。

2 动态力学性能的实验研究

为了对混凝土材料进行冲击压缩实验, 一方面是适当减小骨料的尺寸, 试件材料的组成和配料如表 1 所示, 而骨料的粒径为 5 ~ 10mm; 另一方面则将实验室原有的 $\Phi 37\text{mm}$ SHPB 改装为直锥变截面式 $\Phi 74\text{mm}$ SHPB(见图 1)。

表 1 混凝土材料配料表

Table 1 Ingredient of concrete material

名 称	水 泥	砂 子	骨 料	水
质量配比	1.00	1.00	1.86	0.37

* 收稿日期: 2001-04-23; 修回日期: 2001-09-07

基金项目: 国防科技重点实验室试点基金项目(97JS75, 2, 2, ZK0102)

作者简介: 胡时胜(1945—), 男, 教授。

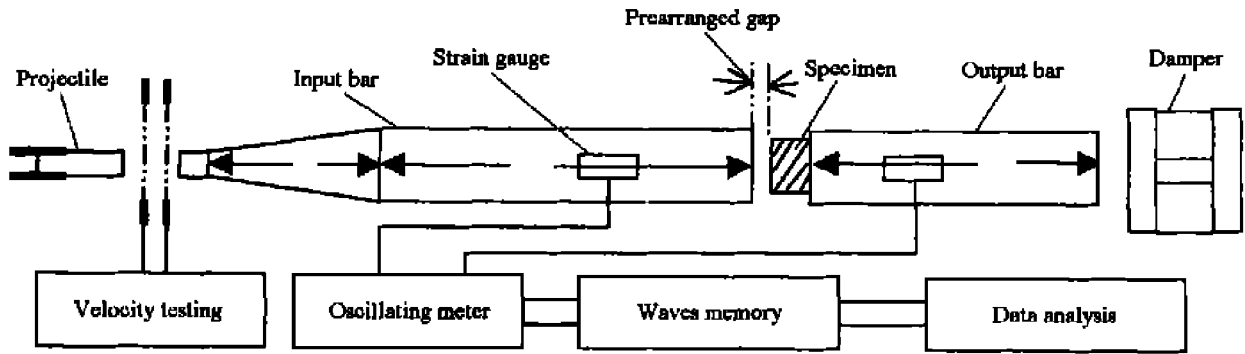


图 1 直锥变截面式 Φ74mm SHPB 示意图

Fig.1 Right cone Φ74mm SHPB set-up

鉴于混凝土材料呈现明显的脆性，其破坏应变很小，而作用于试件上的应力脉冲因波形弥散造成升时（约为 50μs）很大，因此，我们在实验中采用了预留间隙法，也就是在试件表面和入射杆端之间留一点间隙，改善了加载条件，提高了实验精度。

我们一共做了 5 组不同应变率的实验，每组做 5 个试件。图 2 为各组平均后的应力应变曲线，它表明混凝土材料的应变率效应是十分敏感的。

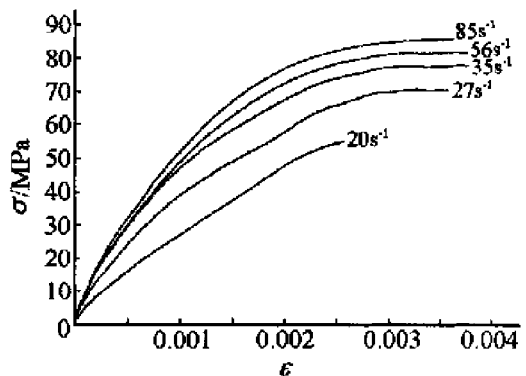


图 2 不同应变率的应力应变曲线

Fig.2 Stress-strain relation of different strain rate

3 损伤演化规律的实验研究

众所周知，微裂隙、微空洞等损伤的产生和演化将导致材料的软化，而在混凝土材料内部则表现得更为明显，因为对于混凝土材料来说，由于其组分的复杂性，它在成型过程中内部包含大量的微裂纹和微空洞，所以研究这些微缺陷的产生和演化过程是研究混凝土损伤软化的主要内容之一。然而这是一个很复杂的过程，而且对混凝土材料来说几乎是很难实现的事，因为这种材料内部的微裂隙和微空洞的分布太密集太复杂。

既然从微观角度研究损伤非常困难，我们从宏观的角度去对它进行研究，在宏观层次上定义损伤，用材料试件受损伤而引起的宏观力学性能参数（弹性模量、拉伸强度、密度等）的变化来度量损伤。这里采用弹性模量的减弱来表征损伤，即定义损伤因子^[5]

$$D = \Delta E / E_0 \tag{1}$$

式中： ΔE 是指材料损伤前后弹性模量的变化， E_0 是指材料损伤前的弹性模量。据此我们只要求出损伤后材料的弹性模量的减少，就可以确定损伤因子 D ，并进而求得混凝土材料的损伤演化方程，为此我们设计了损伤“冻结”实验。

所谓“冻结”是指让试件在冲击压缩过程中损伤的生成和发展被“固定”在某个确定的应变值上，从而使我们能够知道在此应变上的损伤值，这个确定的应变值主要是通过控制套在试件外面的一个钢环的高度来实现（参见图 3）。而应变率的大小主要是通过控制子弹的撞击速度来实现的。

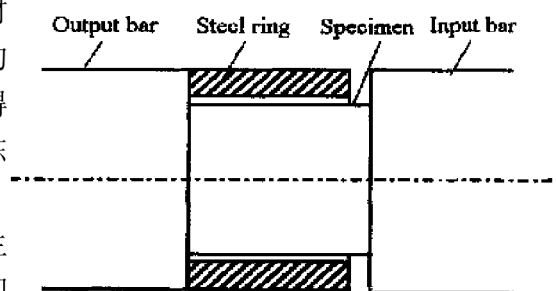


图 3 损伤“冻结”实验原理图

Fig.3 Damage “freezing in” test sketch

我们一共做了 4 组不同应变率的实验, 每一组做 5 个试件, 应变控制在 $1.8 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^{-3}$ 范围内, 应变率分别为 23, 35, 45, 60 s^{-1} 。损伤“冻结”实验后, 再把在“冻结”实验中有不同程度损伤的试件送到 MTS 材料试验机上做静压实验, 测得损伤后试件的模量。利用公式 (1), 就可以算出不同应变和应变率下的损伤因子 D , 损伤因子与应变和应变率的关系分别如图 4、图 5 所示。图 4 为 4 种不同应变率下损伤随应变的变化关系, 图 5 为在确定的应变 (2.332×10^{-3}) 下, 损伤随应变率的变化关系。

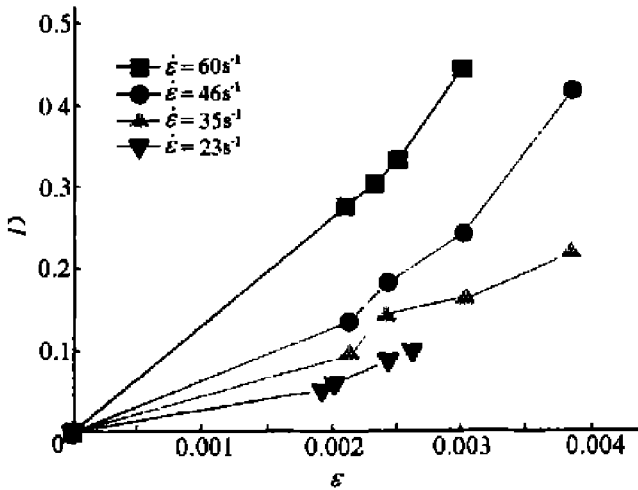


图 4 不同应变率下损伤与应变的关系

Fig.4 Damage-strain relation under different strain rates

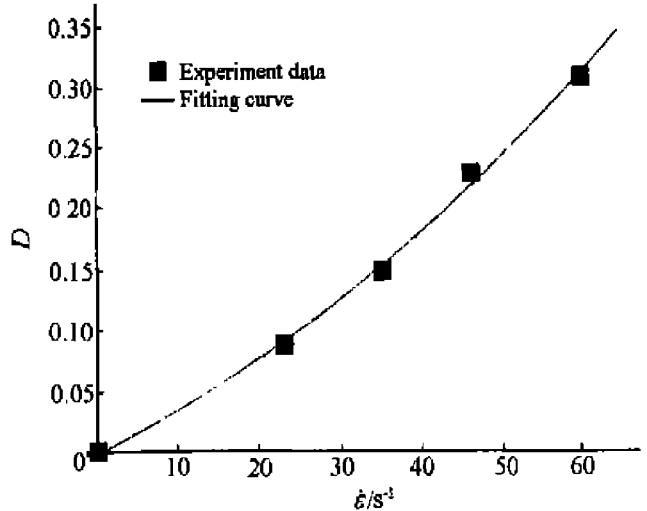


图 5 相同应变下损伤度与应变率的关系

Fig.5 Relation of damage and strain-rate in same strain

4 损伤型动态本构关系

4.1 本构模型的建立

从对混凝土材料实施应变率为 $10^{-4} \sim 10^2 \text{ s}^{-1}$ 大跨度范围的动静态压缩实验的实验结果分析表明, 混凝土材料呈现出明显的应变率效应, 而且在高应变率段显得更为敏感。如图 2 所示, 尽管 6 组应变率不存在量级上的差别, 但是它们各自的流动应力相差不少, 因此这样的应变率效应已不能用描述金属材料的 Seeger 模型或 Jhonson-Cook 模型来描述, 需要找出能同时描述高应变率响应和低应变率响应的新的本构关系。一种比较好的本构模型为朱-王-唐提出的非线性粘弹性本构方程^[6]

$$\sigma_r = \sigma_e + \sigma_{m1} + \sigma_{m2} = E_0 \epsilon + \alpha \epsilon^2 + \beta \epsilon^3 + E_1 \int_0^t \epsilon \exp\left(-\frac{t-\tau}{\varphi_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \epsilon \exp\left(-\frac{t-\tau}{\varphi_2}\right) d\tau \quad (2)$$

其物理模型如图 6 所示。

公式中后面两个积分式分别代表具有不同松弛时间的两个 Maxwell 体。其中松弛时间为 φ_1 的 Maxwell 体用于描述低应变率时的粘弹响应, 松弛时间为 φ_2 的 Maxwell 体则可用于描述高应变率的粘弹响应。

针对我们的实际情况, 尚需要对朱-王-唐方程作以下两点改进。第一, 在方程中第一部分 σ_e 是表示与应变率无关的平衡态应力, 其由三项组成, 它描述了材料的非线性的弹性。然而考虑到我们所讨论的混凝土材料的变形量很小, 而且在我们的准静态压缩实验中, 应力应变曲线几乎是线性, 因此平衡态应力 σ_e 可考虑只取一项, 即可把弹性部分看作线性的。第二, 损伤是我们研究混凝土材料力学性能时必须考虑的因素, 损伤因子 (或损伤度) D 是混凝土材料本构模型中一个非常重要的内变量。鉴于损伤对混凝土材料力学行为的影响是全方位的, 因此混凝土材料的动态本构关系应包含损伤因子 D 这个内变量, 其本构主程应写为

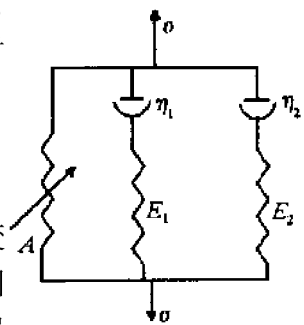


图 6 朱-王-唐非线性粘弹模型
Fig.6 Zhu-Wang-Tang nonlinear visco-elasticity model

$$\begin{aligned} \sigma_a &= \sigma_r(1 - D) = (1 - D)(\sigma_e + \sigma_{m1} + \sigma_{m2}) \\ &= (1 - D) \left[E_0 \varepsilon + E_1 \int_0^t \varepsilon \exp\left(-\frac{t - \tau}{\varphi_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^t \varepsilon \exp\left(-\frac{t - \tau}{\varphi_2}\right) d\tau \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中： σ_a 为表观应力， σ_r 为材料无损伤时的应力。

4.2 损伤演化方程的确定

在前面的讨论中，我们已经确认了损伤因子 D 应是应变和应变率的函数，即

$$D = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$$

如果引入量纲一应变率 $\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ ，此处 $\dot{\varepsilon}_0 = 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 是特征(准静态)应变率，则上式可写成量纲一形式

$$D = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)$$

为了求得上述关系的具体形式，我们需对前面的实验结果作进一步分析。从图 4 可以看出，在确定的应变率下，被“冻结”的损伤因子 D 与对应的应变 ε 之间的关系，可用幂函数来描述。而图 5 则表明在确定的应变下，损伤因子 D 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 也可用幂函数表示。据此，我们可以假定损伤因子

$$D = D_0 (\varepsilon/\varepsilon_0)^a \dot{\varepsilon}^b \quad (4)$$

式中： D_0, a, b 为待定参数。利用已有的 4 组不同应变率条件下的实验结果，拟合得到的 3 个参数值分别为

$$D_0 = 5.36 \times 10^{-6}, \quad a = 1.5, \quad b = 1.5$$

将(4)对 t 求导，有

$$D = D_0 [a (\varepsilon/\varepsilon_0)^{a-1} (\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0) + b \varepsilon_0 (\varepsilon/\varepsilon_0)^{a+1} \dot{\varepsilon}^{b-1}]$$

考虑到在 SHPB 上进行的冲击压缩实验可近似地认为是恒应变率实验，这种情况下损伤演化方程为

$$D = 8.04 \times 10^{-10} (\varepsilon/\varepsilon_0)^{2.5} \dot{\varepsilon}^{0.5} \quad (5)$$

需要说明的是，从数学的角度上看，公式(4)中损伤因子会随应变率和应变的增加而单调增加，直至 $D = 1$ 时材料丧失承载能力。从实验的实际情况来看，当 $D = 0.7$ 时，试件就已经破坏了，因此，在实际应用中， D 的最大值应小于或等于表征材料破坏的临界损伤 $D_c = 0.7$ 。

4.3 本构方程的拟合

将损伤因子 D 的表达式代入公式(3)，再考虑到在 SHPB 上进行的冲击压缩实验可近似认为是恒应变率实验，从而我们所研究的混凝土材料的本构方程可以写成

$$\begin{aligned} \sigma_a &= (1 - D) [E_0 \varepsilon + E_1 \varphi_1 \varepsilon (1 - e^{-\frac{\varepsilon}{\varphi_1}}) \\ &\quad + E_2 \varphi_2 \varepsilon (1 - e^{-\frac{\varepsilon}{\varphi_2}})] \end{aligned} \quad (6)$$

方程中需要拟合的参数为 E_0, E_1, E_2, φ_1 和 φ_2 。拟合所得的 5 个参数为

$$\begin{aligned} E_1 &= 16.7 \text{GPa} \\ \varphi_1 &= 0.31 \text{s}^{-1} \\ E_2 &= 56.2 \text{GPa} \\ \varphi_2 &= 7.67 \text{s}^{-1} \\ E_0 &= 2.83 \text{GPa} \end{aligned}$$

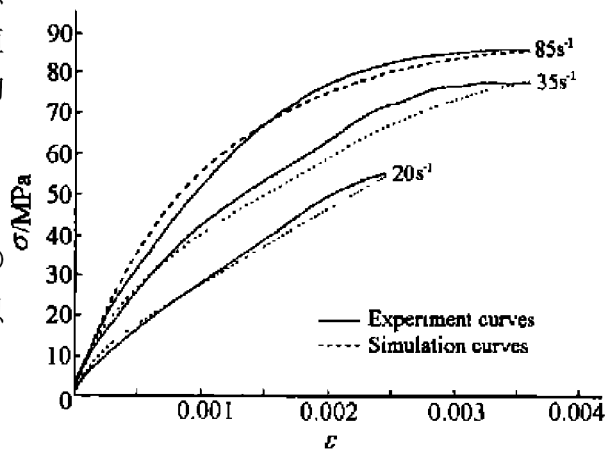


图 7 实验曲线与理论曲线的比较

Fig. 7 Comparison of experimental data and analysis results

图 7 同时画出了实验曲线和拟合曲线，表明上面拟合所得的本构方程能较好地描述我们所研究的混凝土材料的力学性能。

4 结 论

(1)混凝土是应变率敏感的材料,而且其高应变率的敏感性远大于低应变率(准静态实验)的敏感性,因此不能选择常用于描述金属材料的本构模型,我们采用的是朱-王-唐粘弹性模型。

(2)在混凝土材料中,损伤对其力学性能的影响必须考虑。尤其是在冲击加载条件下,损伤软化效应十分明显,并且很快超过应变硬化效应和应变率硬化效应,导致试件材料很快破裂。

(3)采用损伤前后弹性模量的减弱量来表征损伤因子,据此提出的损伤“冻结”实验及其随后的静压实验可有效地讨论混凝土材料的损伤演化过程,文中给出的损伤演化方程有牢固的实验基础。

(4)混凝土材料的破坏应变很小,在准静态下应力应变曲线几乎是线形,因此我们将引入的朱-王-唐本构关系改为线性粘弹性,再考虑到损伤的影响,最终提出了可描述混凝土材料力学性能的损伤型线性粘弹性本构关系。

参考文献:

- [1] Malvern L E, Tang T, Jenkins D A. Dynamic Compressive Strength of Cement Material [A]. Mindess S, et al. Cement-Based Composites; Strain Rate Effects on Fracture [C]. Pittsburg: Material Research Society, 1986, 64: 119-138.
- [2] Bhargava J, Rhrmstrom A. Dynamic Strength of Polymer Modified and Fiber-reinforced Concrete [J]. Cement Concr Res, 1977, 7: 199-208.
- [3] Albertini C, Cadoni E, Labibes K. Impact Fracture Process and Mechanical Properties of Plain Concrete by Means of an Hopkinson Bar Bundle [R]. Colloque C3, Supplement au Journal de Physique III d' aout 1997: 915-920.
- [4] 刘孝敏, 胡时胜. 应力脉冲在变截面 SHPB 锥杆中的传播特性[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(2): 110-114.
- [5] Loland L E. Continuum Damage Model for Load Response Estimation of Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1980, 10: 395-402.
- [6] 王礼立, 余同希, 李永池. 冲击动力学进展[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1992: 88-116.

Dynamic Constitutive Relation of Concrete under Impact

HU Shi-sheng^{1,2}, WANG Dao-rong²

(1. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China;

2. Department of Mechanics and Engineering USTC, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: Constitutive properties of concrete under dynamic loading play an important role in the analysis of concrete structures subject to impact loading. There are many defects such as micro-crack and micro-void inside the concrete material. Damage softening has a great influence on the mechanic behavior of concrete under impact. So a new experiment method called “freezing in” damage test is used to obtain the damage evolution equation. The impact compression tests are performed with a modified right cone 74-mm-diameter SHPB. The results of experiments show both strain rate stiffening effects and the damage softening effects. Based on ZWT visco-elasticity model a linear visco-elasticity according to damage evolution constitutive relation of concrete is obtained.

Key words: concrete; split Hopkinson pressure bar; dynamic constitutive relation