

文章编号: 1006 - 7051(2001)02 - 0001 - 04

含初始损伤的水泥砂浆材料的动态本构关系研究

崔新壮¹, 金青², 李卫民³, 陈士海²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 山东科技大学, 山东泰安 271019;
3. 山东建设建工集团, 济南 250014)

摘要: 建立了含初始损伤的水泥砂浆试件的两种动态损伤演化模型及本构模型, 然后通过霍普金森压杆对水泥砂浆试件进行了冲击压缩试验。结果表明, 正交异性损伤演化模型更适合描述实际介质的损伤, 从而建立了水泥砂浆材料的正交异性动态本构方程。

关键词: 水泥砂浆; 初始损伤; 霍普金森压杆; 动态本构方程

中图分类号: O346.5 **文献标识码:** A

RESEARCH TO DYNAMIC CONSTITUTIVE RELATION OF CEMENT MORTAR WITH INITIAL DAMAGE

CUI Xin-zhuang¹, JIN Qing²,
LI Wei-min³, CHEN Shi-hai²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;
2. Shandong University of Science and Technology, Tai'an, Shandong 271019, China;
3. Shandong Constructive Ltd Co., Jinan, Shandong 250014, China)

ABSTRACT: In this paper, two kinds of dynamic damage model, evolution model and constitutive model, for a cement mortar with initial damage are set up firstly and then the impacting experiments to the sample of cement mortar are done through the Hopkinson bars. The experimental results have shown that the damage evolution model for the orthogonal isomerism is more suitable to describe the damage of actual medium. Accordingly, the dynamic constitutive equation of orthogonal isomerism for the cement mortar is established.

KEY WORDS: Cement mortar; Initial damage; SHPB; Dynamic constitutive equation

1 引言

水泥砂浆作为一种重要的建筑材料被广泛地应用。然而, 往往由于种种原因如水泥水化

收稿日期: 2000 - 08 - 14

作者简介: 崔新壮, 基础室博士。

或温度变化,水泥砂浆结构中出现大大小小的裂缝,这些裂缝可视为初始损伤。初始损伤的存在,一方面使结构承载能力降低,特别是对一些承载动力载荷的结构,其力学性能将受到重大影响;另一方面,对该类结构实施爆破时,由于动态本构尚未弄清,增加了设计的困难。一般情况下,在动态载荷作用下材料的强度要提高,最大应变增大,而且随着应变率的提高,弹性模量也要增大。目前还很少有人对水泥砂浆材料的动态力学性能进行研究。本文将通过霍普金森压杆的冲击压缩实验对含初始损伤的水泥砂浆材料的动态本构关系及其损伤演化方程进行初步的研究。

2 实验设备、试件及参数计算

本实验中所用的主要实验设备有霍普金森压杆与声波测试仪。冲击压缩实验中,由于脉冲波长远大于试件长度,故在脉冲通过试件过程中,在试件内部发生多次折反射,迅速地建立了试件的应力平衡状态,从而可以略去试件中波的传播效应,并认为试件两侧的轴力相等。根据一维波动理论可得试件内应力、应变及应变率的表达式。声波测试仪是用来测定声速的,然后根据公式 $D = 1 - v^2 / V^2$ (其中 V 为不含损伤试件中的声波速度, v 为含损伤试件中的声速),得到试件的初始损伤值。

实验中用的水泥砂浆试件的形状为小圆柱体。采用 425# 水泥,所用砂粒直径不大于 1.5mm,其配合比为水泥 砂 水 = 1 3 0.7 (质量比),损伤模拟材料为塑料泡沫,将其做成细条形,长度一般不大于 15mm,据加入该材料的多少,可以得到含有不同损伤的试件。对含有不同损伤的试件进行实验,然后对实验结果进行整理,可得到动态损伤本构关系随初始损伤的变化规律,也就达到了实验目的。为消除试件端面摩擦及横向惯性力的影响,取试件直径与杆直径相同,都为 40mm,而取试件长度为 50mm。

3 损伤演化及本构模型的建立

应力随应变的变化过程,实质上是一个材料内部损伤不断积累直至破坏的过程。损伤的演化发展使本构关系呈现出非线性。目前,动态本构模型很多,但是只有最能体现损伤演化过程的本构模型才是最好的模型。

在对岩石、混凝土等脆性材料在单轴压缩下的研究中,用得最多的损伤演化模型是

$$D = m^n \quad (m, n \text{ 为材料常数}) \tag{1}$$

水泥砂浆也是脆性材料,为了体现该材料中的初始损伤 D_0 , 将上式修正为

$$D = D_0 + m^n \tag{2}$$

根据连续损伤力学的基本关系式,有: $\sigma = E(1 - D)$ (3)

式中 E 为无损伤材料的弹性模量。将式(2)代入式(3)中,得:

$$\sigma = E(1 - D_0 - m^n) \tag{4}$$

对 σ 求导,得: $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E[1 - D_0 - m(n+1)\varepsilon^n]$ (5)

在峰荷前(包括峰荷)应力应变关系图上有如下几何条件: $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$, $\sigma = \sigma_{max}$; $\varepsilon = \varepsilon_{max}$, $\sigma = \sigma_{max}$; $\varepsilon = \varepsilon_{max}$, $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$ 。其中, ε_{max} 为峰荷应变值, σ_{max} 为峰荷应力值。

由式(4)、(5)知,条件 $\sigma = \sigma_{max}$ 、 $\varepsilon = \varepsilon_{max}$ 自然满足。由条件 $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$ 及式(4)有:

$$\sigma_{max} = E_{max}(1 - D_0 - m^n_{max}) \tag{6}$$

对上式整理得：
$$m_{\max}^n = 1 - D_0 - \frac{\sigma_{\max}}{E_{\max}} \quad (7)$$

由条件 及式(5)有：
$$(1 - D_0) - m(n + 1) m_{\max}^n = 0 \quad (8)$$

将上式整理得：
$$m_{\max}^n = (1 - D_0) / (n + 1) \quad (9)$$

由式(7)、(9)得：
$$n = \frac{1}{1 - \{ \sigma_{\max} / [E_{\max} (1 - D_0)] \}} - 1 \quad (10)$$

由式(8)得：
$$m = (1 - D_0) / [(n + 1) m_{\max}^n] \quad (11)$$

由式(2)、(4)知,水泥砂浆材料的损伤演化方程及其损伤本构方程是由它的弹性模量、初始损伤、强度、峰荷应变及该点的应变决定的。

令 E_m 为峰荷点处的割线模量,则
$$E_m = \sigma_{\max} / \epsilon_{\max} \quad (12)$$

令 E_0 为含损伤岩体的初始弹性模量,则
$$E = E_0 / (1 - D_0) \quad (13)$$

将式(12)、(13)代入式(10)中,得
$$n = E_m / (E_0 - E_m) \quad (14)$$

将式(13)代入式(4)中,得
$$= \sigma_0 [1 - m^n / (1 - D_0)] \quad (15)$$

式中 m 、 n 分别如式(11)、(14)所示。

已知在动载作用下,弹性模量等力学参数与静载作用下相比较,将有很大变化,故在动载作用下,须对静载作用下的损伤本构模型做一修正:

$$\left. \begin{aligned} &= \sigma_{0d} [1 - m^n / (1 - D_0)] \\ n &= E_{md} / (E_{0d} - E_{md}) \\ m &= (1 - D_0) / [(n + 1) m_{\max}^n] \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中 E_{0d} 、 E_{md} 分别为动态压缩作用下的初始弹性模量和峰值割线模量。(16)式即为本文所要建立的含初始损伤岩石的动态损伤演化模型之一,而相应的动态损伤演化模型为:

$$\left. \begin{aligned} D &= D_0 + m^n \\ n &= E_{md} / (E_{0d} - E_{md}) \\ m &= (1 - D_0) / [(n + 1) m_{\max}^n] \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

但是需要指出的是,以上推导所用的损伤本构方程是基于一个假设,即:不仅岩石及初始损伤是各向同性的,而且损伤演化也是各向同性的。而在单轴压缩情况下,裂纹扩展方向往往平行于受力方向,即损伤演化近似于正交异性的。

在单轴压缩下,由损伤力学知,正交异性损伤本构方程为:

$$= (1 - D)^2 \quad (18)$$

本构方程里的有效弹性模量为：
$$\tilde{E} = (1 - D)^2 \quad (19)$$

故初始弹性模量为：
$$E_0 = (1 - D_0)^2 \quad (20)$$

令损伤演化模型仍如式(2)所示,以此类推,可得动态正交异性损伤本构模型为:

$$\left. \begin{aligned} &= \sigma_{0d} [1 - m^n / (1 - D_0)]^2 \\ n &= \sqrt{E_{md}} / [2 (\sqrt{E_{0d}} - \sqrt{E_{md}})] \\ m &= (1 - D_0) / [(1 + 2n) m_{\max}^n] \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

相应的损伤演化模型为:

$$\left. \begin{aligned} D &= D_0 + m^n \\ n &= \sqrt{E_{md}} / [2 (\sqrt{E_{0d}} - \sqrt{E_{md}})] \\ m &= (1 - D_0) / [(1 + 2n) m_{\max}^n] \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

设由上式求得的损伤为 D_1 , 另外两个正交方向的损伤为 D_2, D_3 , 则 $D_2 = D_3 = HD_1 (H > 1)$ 。无论对哪种损伤演化模型, 两边对 ϵ 求导, 都会得到:

$$\dot{D} = dD/d\epsilon = mn \epsilon^{n-1} \quad (23)$$

上式的物理含义是损伤演化的速度与应变的关系, 它在一定程度上反映了裂纹扩展速度或扩展裂纹的数目。反映在声发射特性上, 就是 \dot{D} 越大, 则声发射信号越强, 反之越弱; 但它们之间对应的具体关系, 笔者未做深入研究。

若对时间求导, 则得: $\dot{D}_t = dD/dt = (dD/d\epsilon) \cdot (d\epsilon/dt) = mn \epsilon^{n-1} \cdot \dot{\epsilon} \quad (24)$

式中 $\dot{\epsilon}$ 为应变率。(24) 式反映的是: 在应力波作用下, 损伤随时间的演化速度不仅与应变有关, 而且还与应变率有关。

4 动态损伤本构模型的实验验证

实验中首先用霍普金森压杆对水泥砂浆试件做了冲击压缩。通过数据的采集与处理, 画出了实测的动态本构曲线。然后利用两种动态损伤本构模型, 即式 (16) 与 (21) 分别进行了数值模拟, 绘出了模拟本构曲线, 数值模拟流程图如图 1 所示。

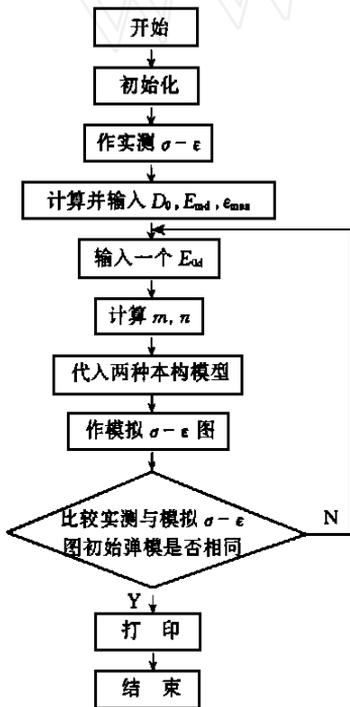


图 1 数值模拟流程

Fig. 1 Flow chart of the numeric simulation

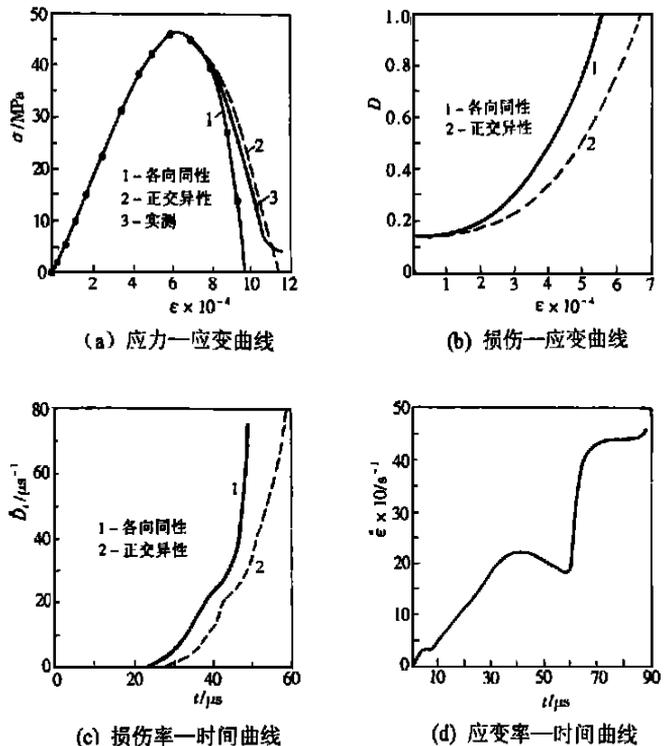


图 2 2# 试件模拟曲线

Fig. 2 Simulative curve of the 2# sample

图 2 为 2# 试件的模拟曲线, 其中 $\dot{D}_t - t$ 曲线是在实验得到 $\dot{\epsilon} - t$ 曲线后通过式 (24) 得到的。由图可见, 正交异性损伤本构曲线与实测曲线更接近, 说明实验中水泥砂浆的损伤演化是正交异性的。

(下转第 49 页)

着地部分的爆堆上,从而降低塌落震动对西侧民房的危害。

5.3 爆破飞石控制

爆破破碎介质后,过剩的炸药能量作用在爆破碎块上,使部分碎块具有一定初速度而向外飞散,这就产生了飞石。一定程度上可以通过控制炸药单耗来控制飞石,但是为了有利于结构顺利倒塌,关键缺口位置处立柱(底层立柱)中的混凝土必须脱离钢筋骨架,这就不可避免产生飞石。因此,对于这些位置采用了双层竹笆进行直接防护,尤其是楼层较高的南侧和西侧立柱,而且对西侧居民房的窗户用竹笆全封闭间接防护。

6 爆破效果

从人员进场到实施爆破共计 5 天,2000 年 8 月 26 日 16:00 准时起爆,楼房完全按照设计方向倒塌,通过录像资料和爆后梁的倒向可以看出,楼房的后半部产生了向北的倒塌趋势,配电房和民房等保护目标完好无损,爆破效果达到设计要求。具体倒塌范围为:向东 5.4m、楼房前半部向南 1.7m、向北 2.0m;中间拐角向北 5.5m(主要堆积物为楼梯和楼顶的水箱)、向南基本无侧向堆积、西侧后坐 2.5m、西南角立柱向西南方向后坐 0.3m,配电房旁的阳台基本原地落下。爆后清渣未发现一发拒爆的雷管。

由此可见,中间楼梯位置采用倾斜分段使楼房后半部产生了向北侧倒塌的趋势,减少了楼房西南角的后坐;西侧墙体和构造柱的爆破分段方式有效地控制了楼房的后坐。

7 结 论

通过对该楼的爆破效果分析,可以得出以下结论:

(1) 对于非规则形状的框架结构楼房,同层断面采用阶梯形分段方式可以使楼房朝一定方向倾斜倒塌,从而将一侧的侧向堆积高度控制在较狭小范围之内;

(2) 采用高差与时差相结合,使楼房在倒塌过程中有效地利用楼房的自重,有利于控制楼房的倒塌范围。

(3) 三维的非电导爆管起爆网络系统的可靠性高,适合闹市区拆除爆破的要求。

参考文献:

- [1] Henrych J. The Dynamics of Explosion and Its Use[M]. Elsevier Scientific Publishing Company, 1979, 342 ~ 352.
- [2] 龙 源,张冀峰. 砖混建筑物承重墙爆破拆除预处理计算模拟及优化设计. 工程爆破, 1998, 4(4): 6 ~ 9.
- [3] 冯叔瑜,吕 毅,等. 城市控制爆破[M]. 北京:铁道出版社, 1985.
- [4] 陈华腾,钮强. 爆破计算手册[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版社, 1991.

(上接第 4 页)

参考文献:

- [1] 章根德. 岩石对冲击载荷的动态响应[J]. 爆炸与冲击, 1982, (2): 1 ~ 9.
- [2] 余天庆,等. 损伤理论及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1993.
- [3] 吴 政,等. 单向载荷作用下岩石损伤模型及其力学特性研究[J]. 岩石与工程学报, 1996, 15(1): 55 ~ 61.
- [4] 崔新壮. 爆炸应力波与损伤岩体的相互作用及其应用[D]. 山东泰安:山东科技大学, 1999.