

文章编号: 1001-1455(2010)02-0119-06

# 平板撞击下 C30 混凝土中冲击波的传播特性\*

王永刚,王礼立

(宁波大学力学与材料科学研究中心,浙江 宁波 315211)

**摘要:** 采用 1 级气炮加载技术和锰铜应力计多点测试技术,开展了 C30 混凝土在平板撞击条件下的冲击压缩实验研究。基于锰铜应力计实测的应力波形,研究了混凝土中冲击波的传播特性,结果显示冲击波的应力峰值随传播距离呈现明显的衰减特性,衰减过程可分为 2 个阶段。在早期阶段,卸载波没有赶上前面传播的冲击波,冲击波应力峰值衰减较慢,主要是混凝土材料的本构粘性效应所引起的;而后期阶段应力峰值的快速衰减则归因于混凝土材料的本构粘性效应、后续的来自飞片自由面的反射波追赶卸载、边侧稀疏波卸载及波传播的几何弥散效应的共同作用;另外,冲击波在混凝土中传播的升时也随着传播距离逐渐增大,即由强间断波逐渐转化为弱间断波。

**关键词:** 爆炸力学;冲击波衰减;锰铜应力计;混凝土

**中图分类号:** O347.5;TU473

**国标学科代码:** 130·3520

**文献标志码:** A

## 1 引言

不论在民用建设还是国防建设中,现代混凝土结构经常要承受爆炸和冲击等强动载荷,例如,机场跑道要承受飞机降落时产生的强冲击载荷作用;常规战争中,由混凝土建造的指挥所、控制和通讯掩体要承受住敌方炸弹摧毁性地打击。因此,认识强动载荷下混凝土材料的力学响应特性,具有重要的工程应用背景和科学研究价值。

混凝土主要是由骨料和水泥砂浆组成,本质上可以看作是 1 种各向异性的复合材料,相比金属材料,深入认识其力学响应特性确实存在一定的困难,特别是在动载荷作用下。目前,采用分离式霍布金森压杆(SHPB)技术对混凝土材料在低静水压、高应变率下的动态力学性能已进行了较多的实验研究,认识到混凝土是 1 种应变率敏感材料,并建立了率相关的动态本构模型<sup>[1-4]</sup>。但用 SHPB 技术研究混凝土材料的动态力学性能主要存在 2 个难题:(1)混凝土材料断裂应变很小,试样断裂前,很难满足 SHPB 要求的应力均匀性假定;(2)研究混凝土这类非均匀性材料需要大尺寸的 SHPB,但大尺寸的 SHPB 较难满足 1 维应力加载的条件。

除了 SHPB 技术,平板撞击实验技术也是研究材料在强动载荷下力学响应的重要手段。D. L. Grote 等<sup>[5]</sup>采用反向平板撞击实验技术研究了混凝土材料在高静水压、高应变率下的冲击特性,发现 1 维应变条件下混凝土材料的流动应力高达 1.2 GPa,远高于其准静态的压缩强度 30 MPa。N. Gebbeken 等<sup>[6]</sup>采用反向平板撞击实验技术研究了混凝土材料的冲击 Hugoniot 特性。施绍裘等<sup>[7]</sup>采用 SHPB 被动围压实验技术和平板撞击实验技术对混凝土在准 1 维应变及 1 维应变下的动态力学响应进行了对比研究。然而至今对于爆炸载荷或强冲击所产生的冲击波在混凝土材料中的传播特性很少研究。

实际上,研究冲击波在混凝土材料中的传播特性,有助于认识混凝土动态本构特性在结构中的重要表现形式,还可以为设计优化混凝土结构防护物,提高其抗冲击防护性能,或者对如何更加有效地摧毁混凝土结构,提供基础的理论指导。本文中利用低阻锰铜应力计多点测量技术,直接测量气炮驱动平板撞击加载下 C30 混凝土中冲击波传播的应力波形,来研究混凝土中冲击波的传播特性。

\* 收稿日期: 2008-12-10; 修回日期: 2009-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(10572066,10876014);中国工程物理研究院基金项目

作者简介: 王永刚(1976—),男,博士,副教授。

### 2 C30 混凝土平板撞击实验

C30 混凝土样品的原材料选用 325 普通硅酸盐水泥、细度模数为 2.9 的天然砂作为细骨料、粒径为 4 mm 左右的石子作为粗骨料,按照一定的配合比(水、水泥、砂石的质量之比为 0.5 1 2)混合搅拌均匀,注模后振动排气,凝固硬化 24 h 后脱模,放在常温水中(20~25 )养护 29 d,即得混凝土样品。实测混凝土密度为 2.246 g/cm<sup>3</sup>,混凝土的抗压强度为 32.8 MPa,符合 C30 混凝土的强度要求。

平板撞击实验在内径为 100 mm 的 1 级轻气炮上进行,实验装置见图 1。飞片由压缩气体驱动对靶板进行平面撞击,利用撞击产生 1 维应变平面冲击波对 C30 混凝土样品进行加载。飞片和靶板的材料均为 LY12 铝,厚度分为 10 mm 和 5 mm,直径均为 95 mm。C30 混凝土样品由 5 片厚约 10 mm、直径为 100 mm 的试样片组成,在各试样间夹入锰铜应力计。利用样品中在不同位置处夹入的锰铜应力计对样品中冲击波传播信息进行实时测量,进而实验研究冲击波在混凝土材料中的传播特性,特别关注冲击波的衰减特性。组装完成的 C30 混凝土样品如图 2 所示。

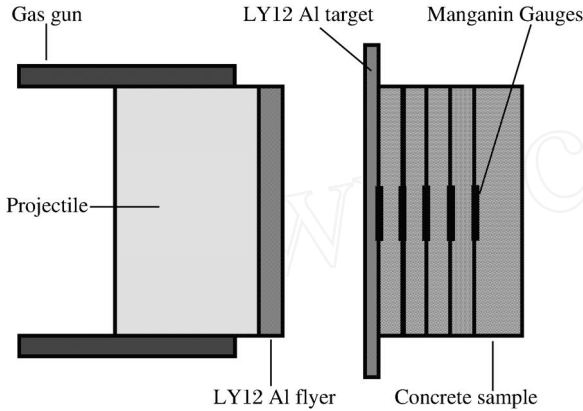


图 1 混凝土气炮加载试验装置示意图

Fig.1 Schematic of concrete samples loaded by the gas gun

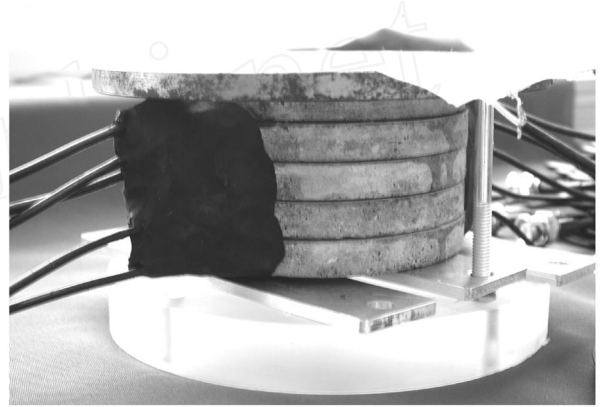


图 2 组装好的混凝土试样照片

Fig.2 Photograph of fabricated concrete samples

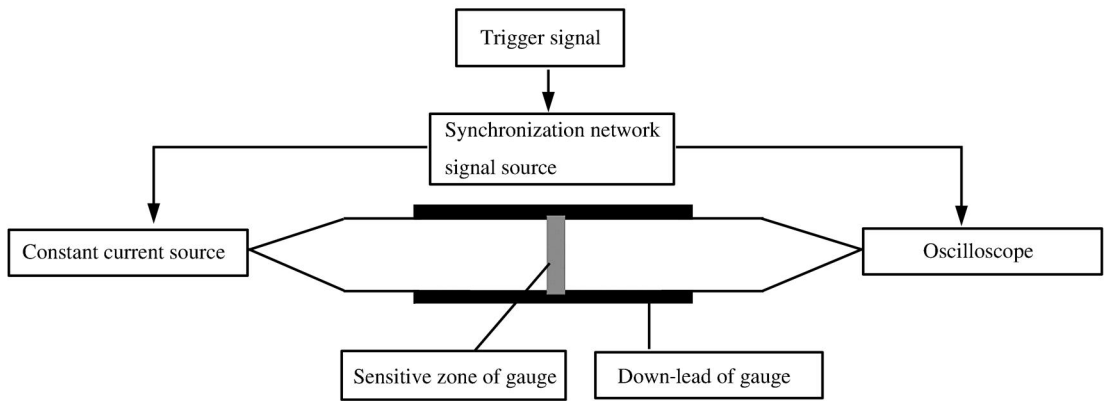


图 3 锰铜应力计的测量电路示意图

Fig.3 Schematic circuit of manganin stress gauges

实验中使用的锰铜应力计是小阻值、4 引线结构的应力计。在一定的应力范围内,锰铜应力计的电阻随应力的变化而变化,但实验中不能直接测量这种电阻变化量,通常是测量锰铜应力传感器两端的电压变化,进而得到相应的电阻变化,因此在实际测量中,测量前需要在锰铜应力计上施加一恒定电流(由恒流源提供)。锰铜应力计的测量电路示意图见图 3 所示,其工作过程是:在飞片撞击靶板的瞬间,通过

靶面触发探针发出触发信号给同步网络信号源,同步网络信号源按照一定的预设时间提前触发脉冲恒流源和数字示波器,脉冲电流经同轴电缆传送到锰铜应力计的电流输入端,信号输出端通过同轴电缆接到数字示波器,记录电流在锰铜应力计上的电压降信号  $U_0$  和  $U$  ( $U = U - U_0$ ),  $U_0$  是电阻上的初始电压,  $U$  是锰铜应力计在应力作用下而产生电阻变化所引起的电压变化量。电压变化量  $U$  与应力  $\sigma$  之间的标定式为

$$\sigma = 0.56 + 33.04 \frac{U}{U_0} + 7.56 \left( \frac{U}{U_0} \right)^2 - 2.17 \left( \frac{U}{U_0} \right)^3 \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  的单位为 GPa。实验中,实时测量电压变化量  $U$  波形,根据公式 (1) 计算得到混凝土中的应力波形。实验具体条件和结果列于表 1,表中  $v_0$  为飞片的撞击速度,  $h$  为应力波传播距离,  $t_r$  为应力波上升时间。

表 1 实验条件和结果

Table 1 Experimental parameters and results

| 应力计编号 | $v_0$ / (m/s) | $h$ / mm | $U_0$ / V | $(U - U_0)$ / V | $\sigma$ / GPa | $t_r$ / $\mu$ s |
|-------|---------------|----------|-----------|-----------------|----------------|-----------------|
| 1     | 670           | 10.8     | 1.12      | 0.115           | 4.04           | 0.36            |
| 2     |               | 11.0     | 1.03      | 0.093           | 3.60           | 1.04            |
| 3     |               | 10.4     | 1.08      | 0.052           | 2.16           | 1.63            |
| 4     |               | 11.0     | 0.89      | 0.009           | 0.90           | 2.10            |

### 3 实验结果处理和分析

图 4 给出了飞片撞击速度 670 m/s 下实测的锰铜应力计电压变化量波形,对电压变化量波形按公式 (1) 进行数据处理后,可以得到应力波形 ( $\sigma$ ),如图 5 所示。这里需要说明一下,实验中虽然使用了 5 个锰铜应力计,但由于冲击波在混凝土中传播时,幅值衰减很快,样品中最后 1 个锰铜应力计处的应力很小,超过了锰铜应力计的测量灵敏度范围,因此实验中只获得了前 4 个锰铜应力计测得的应力波形。另外,对应混凝土这类的多相非均匀材料,在进行气炮平板撞击实验的多点波形测量时,需要对实验干扰因素进行严格地控制,否则很难测到所有多点传感器的全部波形信息。

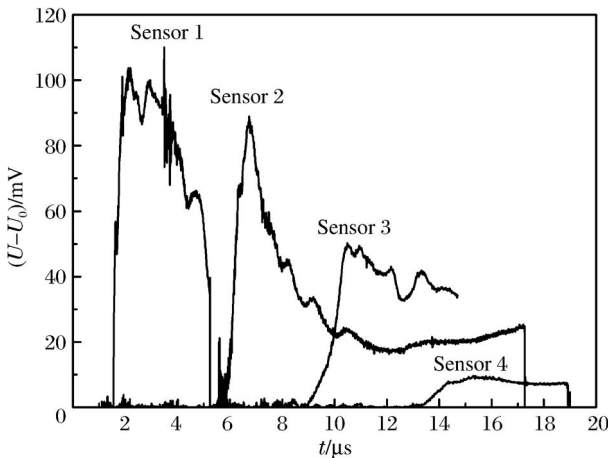


图 4 实测锰铜应力计的电压变化量的波形

Fig. 4 Voltage recorded by manganin stress gauges

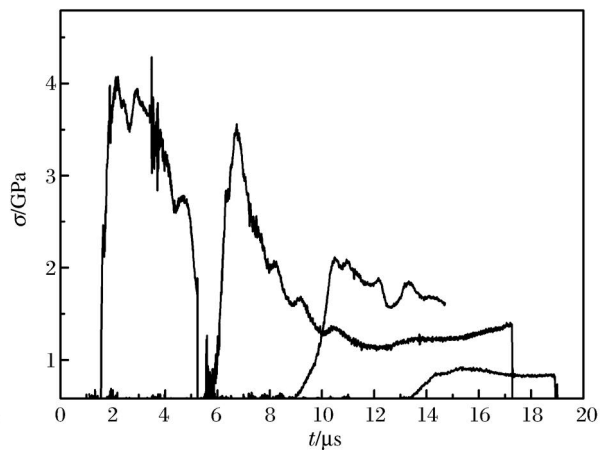


图 5 锰铜应力计电压波形处理后的应力波形

Fig. 5 Stress profiles measured by manganin stress gauges

由图 5 可见,不同位置处应力波形在迅速上升到峰值后均随时间逐渐衰减。即使是位于铝靶与 C30 混凝土样品间的第 1 片锰铜应力计所测的应力波形,也不存在率无关材料在恒速撞击下的应力平台,而是升至峰值后随时间逐渐衰减。这一现象一方面可能与实验应力范围有关,即当应力从可以忽略材料剪切强度的高压范围内(流体动力学模型)降到必须计及材料抗剪强度的次高压范围时,剪切应力

产生了不可忽略的影响;另一方面则与样品本身的本构粘性强弱有关。事实上,这类波形正是率型(粘性)材料中所传播的应力波的显著特征之一。

图 6 则给出了归一化的应力峰值随着归一化的传播距离而衰减的变化曲线。在本实验中,能够引起应力衰减的机制主要有:(1)混凝土材料率相关的本构效应;(2)自由面反射波的追赶卸载效应;(3)边侧稀疏波的卸载效应;(4)冲击波传播过程的几何扩散效应。

从图 6 中清楚地显示了应力峰值的衰减规律可分成 2 个阶段。在初始阶段 1,应力峰值的衰减速度相对较慢,而在阶段 2,应力峰值衰减速度明显加快。下面结合冲击波传播的  $x-t$  图(见图 7)来简要分析一下其中的原因。

首先讨论来自飞片后自由面的反射波(图 7 中虚线)的追赶卸载对冲击波的应力衰减的影响。讨论反射波的追赶卸载需要知道 L Y12 铝合金中的冲击波速度、反射波速度和混凝土中的冲击波速度、反射波速度。根据 L Y12 铝合金的冲击波速度  $D_1$  与粒子速度  $u_1$  关系<sup>[8]</sup>

$$D_1 = 5.33 + 1.34 u_1 \quad (2)$$

平面对称碰撞条件下,粒子速度约等于飞片撞击速度的一半,计算可得飞片撞击速度 670 m/s 条件下 L Y12 铝合金中冲击波速度  $D_1 = 5.78$  km/s。

根据样品中不同位置处锰铜应力计记录到的冲击应力波形的不同升沿,可计算冲击波在每一混凝土试样片中传播的时间  $t$ ,结合在实验前测量的每一试样片的厚度  $h$ ,便可求得混凝土样品中的冲击波速度  $D_2 = h/t$ ,由实验数据计算得到混凝土样品中的冲击波速度  $D_2 = 3.00$  km/s。根据弹性卸载假定,反射波将以弹性波速度传播。1 维应变条件下,弹性波速度<sup>[8]</sup>

$$c_1 = \sqrt{\frac{K + 4/3G}{\rho}} \quad (3)$$

式中: $K$ 为材料的体积模量, $G$ 为材料的剪切模量, $\rho$ 为材料的密度。

L Y12 铝合金的体积模量  $K=77.4$  GPa,剪切模量  $G=37.5$  GPa,密度  $\rho = 2.75$  t/m<sup>3</sup>,把数据代入公式(3)得到 L Y12 铝合金的弹性波速度,即反射波速度  $c_1 = 6.80$  km/s。通过超声波测量技术,测得混凝土中的弹性波速度  $c_2 = 5.06$  km/s。

在图 7 中,假定反射波追上混凝土中传播的冲击波的时间为  $t$ ,则有

$$t_1 = \frac{h_1}{D_1} + \frac{h_1 + h_2}{c_1} + \frac{h_3}{c_2} = \frac{h_2}{D_1} + \frac{h_3}{D_2} \quad (4)$$

式中: $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 分别为飞片厚度、靶板厚度及反射波赶上冲击波时对应的混凝土厚度。

把上述相关数据代入公式(4),计算得到  $h_3 = 22$  mm。从估算结果来看,在阶段 1,混凝土中传播的反射波不可能赶上前面传播的冲击波,也就是说反射波的追赶卸载效应对前面 2 个传感器的测量点基

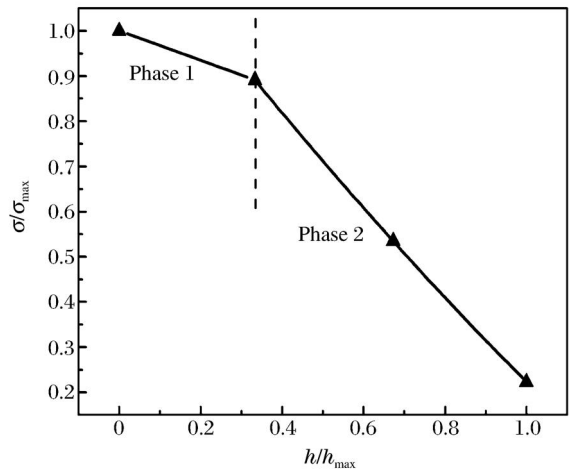


图 6 应力峰值随着传播距离的衰减曲线

Fig. 6 Normalized stress against normalized distance

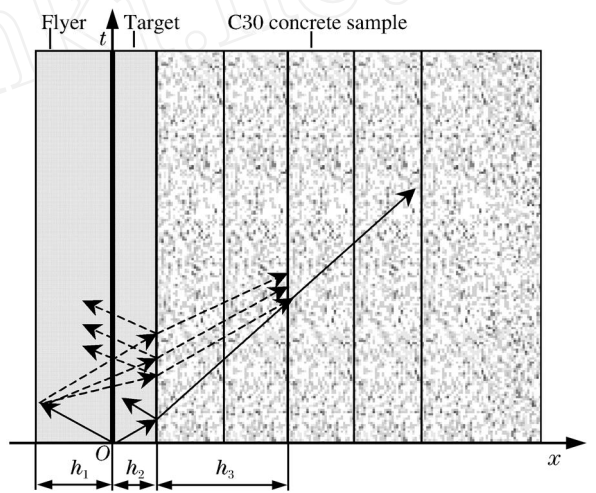


图 7 冲击波传播距离与传播时间的关系示意图

Fig. 7 Distance against time for shock wave propagation

本没有影响。另外,由于样品设计时宽厚比较大,边侧稀疏波在此阶段显然也不可能影响到样品中心的测量点。因此,阶段 1 的应力衰减是由混凝土材料率相关的本构效应和波传播的几何扩散效应而引起的,其中混凝土材料明显的本构粘性效应起主要作用。阶段 2 的应力峰值衰减速度加快,则反映了反射波追赶卸载、边侧稀疏波的卸载、几何扩散效应及混凝土材料本构粘性所致衰减的共同作用。

目前的实验结果还对后续的实验研究工作有一个重要的启示,为了尽量排除其他因素的影响,单独研究混凝土本构粘性导致冲击波衰减的特性,在进行平板撞击实验设计时,应该尽量增加飞片的厚度,使得在整个测量点范围内,反射波都赶不上冲击波。最后,还有一个冲击波传播特征值得关注,那就是冲击波应力除了随传播距离而衰减外,从图 5 中还观察到应力脉冲的升时随传播距离也明显地逐渐增大,如图 8 所示,即混凝土中传播的冲击波从强间断波逐渐转化为弱间断波。这类现象的出现一方面

是混凝土材料的粘性本构特性在应力波形上的体现,另一方面也与追赶卸载及边侧稀疏波的作用相关。

#### 4 结 论

(1) 采用锰铜应力计多点测量技术,对 1 维应变平面冲击波加载下 C30 混凝土进行了冲击压缩实验研究,基于直接测量的不同位置处的冲击波应力剖面,探讨了混凝土中冲击波的传播特性。

(2) 实验结果表明,冲击波在混凝土中传播呈现明显的衰减特性,早期冲击波应力峰值衰减主要归因于混凝土材料的本构粘性效应,而后续的来自飞片自由面的反射波追赶卸载、边侧稀疏波卸载及几何弥散效应则进一步促进了冲击波的衰减,使得应力峰值的衰减速度明显加快。

(3) 冲击波除了随传播距离而衰减外,同时其升时也随传播距离明显地增大,这也是混凝土材料的粘性本构特性在实测应力波形上的另一重要表现。

感谢中国工程物理研究院流体物理研究所的张远平、王为、叶素华等在实验中的大力帮助。

#### 参考文献:

- [1] WANG Li-li, SHI Shao-qiu, CHEN Jian-ying, et al. Influences of strain-rate and stress-state on dynamic response of cement mortar[J]. International Journal of Structure Stability and Dynamics, 2003, 3: 419-433.
- [2] 王道荣,胡时胜. 冲击载荷下混凝土材料损伤演化规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 223-226.  
WANG Dao-rong, HU Shi-sheng. Study on damage evolution of concrete under impact load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 223-226.
- [3] 胡时胜,王道荣. 冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3): 242-246.  
HU Shi-sheng, WANG Dao-rong. Dynamic constitutive relation of concrete under impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3): 242-246.
- [4] 胡时胜,王道荣,刘剑飞. 混凝土材料动态力学性能的实验研究[J]. 工程力学, 2001, 18(5): 115-126.  
HU Shi-sheng, WANG Dao-rong, LIU Jian-fei. Experimental study of dynamic mechanical behavior of concrete [J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(5): 115-126.
- [5] Grote D L, Park S W, Zhou M. Dynamic behavior of concrete at high strain rates and pressures: Experimental characterization[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 25: 869-886.

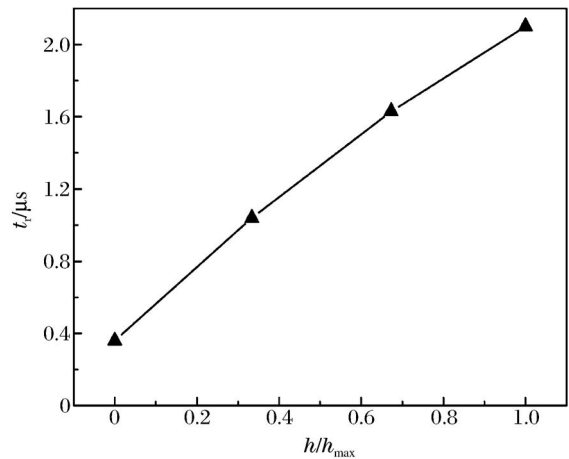


图 8 应力脉冲的升时随传播距离增大

Fig. 8 Rise time of stress profile against propagation distance

- [6] Gebbeken N, Greulich S, Pietzsch A. Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact tests[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(12): 2017-2031.
- [7] 施绍裘, 王礼立. 水泥砂浆石在一维与准一维应变状态下动态力学响应的比较和讨论[J]. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20(3): 327-331.  
SHI Shao-qiu, WANG Li-li. Discussion on dynamic mechanical behaviors of cement mortar under quasi-one and one dimensional strain states[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(3): 327-331.
- [8] 王礼立. 应力波基础[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2005.

## Shock wave propagation characteristics in C30 concrete under plate impact loading<sup>\*</sup>

WANG Yong-gang, WANG Li-li

(*Mechanics and Materials Science Research Center, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China*)

**Abstract:** Shock compression experiments were performed on C30 concrete by using the one-stage light-gas gun. The stress profiles at the different distances were measured by employing in-material manganin stress gauges. Based on the measured stress profiles, the shock wave attenuation characteristics in the C30 concrete samples were investigated. The shock stress peak took on transparent attenuation characters and the shock pressure attenuation process was divided into two phases. In phase 1, the reflected rarefaction wave did not catch up with shock wave and the slow attenuation of the shock pressure was attributed to the constitutive viscosity of concrete materials only. In phase 2, the quick attenuation of the shock pressure was caused by the sum of the constitutive viscosity, reflected rarefaction wave, edge rarefaction wave and geometrical expansion. On the other hand, the rise time of shock wave increased with the propagation distance, which was the other typical characteristic of shock pressure related to the constitutive viscosity of concrete materials.

**Key words:** mechanics of explosion; shock wave attenuation; manganin pressure gauge; C30 concrete

\* Received 10 December 2008; Revised 22 May 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10572066, 10876014)

Corresponding author: WANG Yong-gang, wangyonggang@nbu.edu.cn

(责任编辑 张凌云)