文章编号:1000-5773(2011)06-0533-06

混凝土材料动态力学性能实验与数值模拟研究*

张　柱[1,2],赵　慧[1],于　晖[1]

(1.北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京　100081;
2.太原科技大学应用科学学院,山西太原　030024)

摘要:利用轻气炮对素混凝土材料进行了3种不同冲击速度下的动态力学性能实验,得到了时间-应力曲线,随后利用软件进行数值模拟,将模拟结果与实验结果进行比较,解释了飞片和靶板破坏过程中波的传播过程。通过分析发现:混凝土材料表现出明显的率相关性、滞后效应和应力波的衰减特征,这些与材料内部损伤的演化密切相关;混凝土材料在压缩波、边侧稀疏效应和左、右自由表面反射拉伸波的共同作用下,最终形成宏观破碎;实验中靶板尺寸设计合理,有效避免了边侧稀疏效应对锰铜压阻计测试信号的影响。

关键词:轻气炮;素混凝土;实验;数值模拟
中图分类号:O347.1　　**文献标识码**:A

1　引　言

混凝土是迄今为止应用最广泛的建筑工程材料之一,是由水泥、粗细骨料、水和其它添加剂按一定配比混合,经搅拌、浇注、养护等工序后逐渐凝固而成的人工建筑材料。实际使用中,混凝土除了承受静载荷外,往往不可避免地承受急剧变化的动载荷,如爆炸、冲击和地震等。冲击载荷下混凝土/钢筋混凝土材料的动态力学性能问题,对研究爆炸、冲击、高速撞击、侵彻、动态损伤与断裂等问题都有着重要的影响[1]。

Abrams[2]于1917年首次发现混凝土动态抗压强度存在率敏感性,标志着混凝土类材料动态力学性能研究的开始。此后,陆续有人对混凝土材料在不同载荷作用下的力学特性进行了实验研究。Malvern[3]和Ross[4-6]等使用SHPB方法进行混凝土动态力学性能实验,其加载应变率达到10^3 s^{-1}。Bischoff[7-9]曾对混凝土材料的冲击压缩特性进行过专门研究。

最近几年,国内许多学者也利用各种方法进行了混凝土动态抗压性能的实验研究。胡时胜等[10]采用SHPB压杆,对混凝土进行冲击压缩实验,最高应变率达到85 s^{-1}。王道荣等[11]研究了4种不同骨料尺寸的普通混凝土材料和两种不同配比的钢纤维增强混凝土材料在冲击载荷下的动态抗压强度。宁建国等[12-15]除了利用SHPB对混凝土/钢筋混凝土进行实验外,还采用轻气炮驱动飞片撞击水泥砂浆和钢纤维增强水泥砂浆靶板,着重研究并得到了水泥砂浆和钢纤维增强水泥砂浆的冲击响应特性。然而至今对于强冲击载荷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,不但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提供基础的理论指导。本

* **收稿日期**:2010-08-10;**修回日期**:2010-11-23
基金项目:国家自然科学基金(11032002)
作者简介:张　柱(1979—),男,博士研究生,讲师,主要从事混凝土材料动态力学性能及本构理论研究.
E-mail:zhangzhu030168@163.com

研究利用轻气炮实验手段与 AUTODYN 数值模拟软件,对混凝土的动态力学性能进行了研究,给出时间-应力曲线,并结合模拟结果,给出混凝土飞片和靶板破坏过程中压缩波和稀疏波的传播过程。

2 素混凝土材料的轻气炮实验

本次实验在中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室的一级轻气炮上完成,轻气炮口径为∅101 mm,炮管长度 17 m,弹速范围 20～1 400 m/s,弹速误差小于 5%,碰撞斜角小于 10^{-3} rad,真空度小于 1 Pa。

2.1 试件的制作

实验中水泥采用 425 普通水泥,砂子选用天然河砂,洗去浮土,用细筛过滤得到。素混凝土材料的配比为:水泥、粉煤灰、硅灰、砂子、水,按重量比为 300∶50∶20∶540∶100,混合搅拌均匀,注入自行设计的模具中,振动以排气,凝固硬化 1～2 d 后脱模放在常温水中(20～25 ℃)养护 28 d,即得素混凝土试件。素混凝土试件的基本物理性质为:静抗压强度 72 MPa,孔隙度 0.041 cm^3/g,密度为 2.35 g/cm^3。

轻气炮实验中飞片和靶板选用相同的材料,都为素混凝土,飞片设计为直径∅75 mm、厚度 5 mm;靶板中每层试件直径为∅70 mm、厚度为 5 mm,靶板设计为 5 层三压阻计型,这样得到的靶板实际厚度为 20 mm(最后一层不计入),宽厚比为 3.5,追赶比为 4,如图 1 所示。满足宽厚比和追赶比,用以消除边侧稀疏波效应和追赶稀疏波对锰铜压阻计测试信号的影响。此外,还在靶板的整体外围固化了一层环氧树脂,用于增大边侧稀疏波的反射时间,确保锰铜压阻计测到真实的信号。



图 1 飞片和靶板

Fig. 1 Flyer and Target

2.2 实验结果及分析

实验一共做了 3 发,实测飞片速度分别为 198.2、258.8 和 314.3 m/s,利用预埋在试件中的锰铜压阻计可以直接在示波器上得到 3 个不同测点的时间-电压信号,通过标定公式转换,可以得到每发实验的 3 个不同测点的时间-应力曲线,如图 2 所示。如若利用拉氏分析方法对实验中所得时间-应力数据进行处理,还可得到材料的比内能、应变、比容、应变率等力学参量。

对比图 2 中的各图,可以得到素混凝土材料的如下特点:

(1) 曲线上升段比较光滑,下降段比较粗糙,带有明显的锯齿状波动,表明这一阶段材料的微观结构对波的传播有明显的影响,相对上升段比较光滑而言,似乎微细观结构对波形的影响存在滞后效应。

(2) 所有曲线整体为上凸状,各点的斜率不断变化,这与材料内部损伤的演化密切相关。

(3) 不同发实验的峰值应力随速度(或应变率)的增大而增大,体现了素混凝土材料明显的率相关性。

(4) 同一发实验中的 3 个不同测试点的峰值应力随位置的增大而减小,说明应力波在传播过程中是逐渐衰减的,其实质是能量的耗散,反映了波与材料及其细观结构相互作用的过程与结果。

(5) 达到应力峰值所需的升时随传播距离明显增大,这是混凝土材料的粘性本构特性在实测应力波形上的一个重要表现。

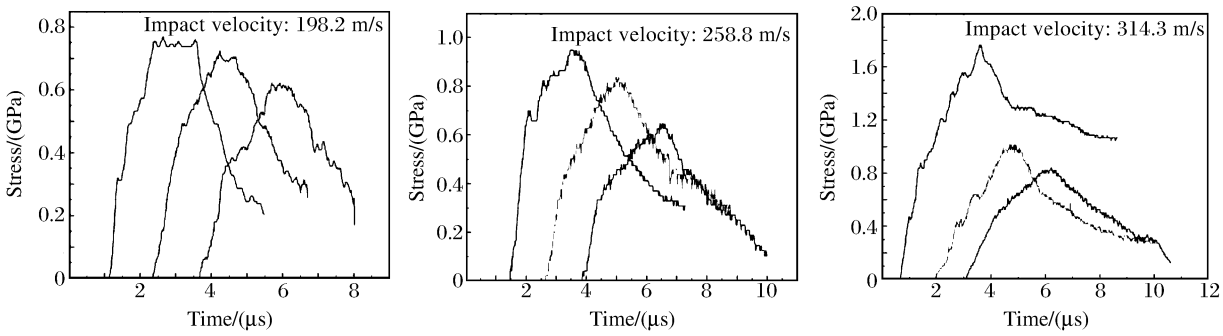


图 2 不同冲击速度下的实测时间-应力曲线

Fig. 2 Time-stress curves from experiments under different impact velocities

3 数值模拟

数值计算是近代发展起来的、逐渐被认为是除理论研究和实验研究之外的第 3 种研究方法,其作为一种分析工具,在科学研究和工程设计中发挥着越来越重要的作用。

利用 AUTODYN 软件,对素混凝土 3 种不同冲击速度下的轻气炮实验过程进行数值模拟。一方面,得到不同测点的时间-应力曲线,将模拟曲线与实验曲线进行比较,分析误差产生的原因;另一方面,通过利用数值模拟结果,说明素混凝土在整个破坏过程中波是如何传播的,以便更好地理解混凝土材料的破坏过程。

3.1 几何模型的建立

数值模拟中的几何模型与实验试件尺寸完全相同,飞片直径 75 mm,厚度 5 mm,靶板由 5 层试件组成,每层试件尺寸相同,直径都是 70 mm,厚度为 5 mm,飞片和靶板材料都为素混凝土,素混凝土的材料模型选用 RHT 模型。考虑到是轴对称问题,因此取其子午面进行建模,如图 3 所示。在第 2 片、第 3 片和第 4 片试件的最前端设置了 3 个高斯点,用来获得与实验相对应的不同测点的时间-应力曲线。飞片与靶板之间为 Interaction Lagrange-Lagrange相互作用,忽略摩擦。靶板为自由边界,飞片初始速度分别为 198.2、258.8 和 314.3 m/s,总时间为 1 ms,时间步长为 0.1 μs。

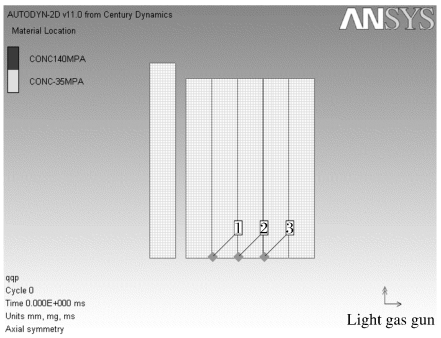


图 3 几何模型

Fig. 3 The geometry model

3.2 模拟结果及分析

数值模拟得到不同冲击速度下靶板内时间-应力曲线,如图 4 所示。将模拟曲线(图 4)与实验曲线(图 2)进行比较,可知:

(1) 模拟曲线表现出明显的率相关性和应力波的衰减特征,与实验曲线完全一致。

(2) 模拟曲线形状与实验曲线形状基本相同,峰值应力稍低一些,但仍处于同一个数量级(达到吉帕,远大于素混凝土的静抗压强度 72 MPa)。数值模拟计算得到的应力峰值比实验测量值低的主要原因是:数值模拟忽略了很多实际实验中的影响因素,比如试件的均匀性、靶板周围的环氧树脂围压效应等。

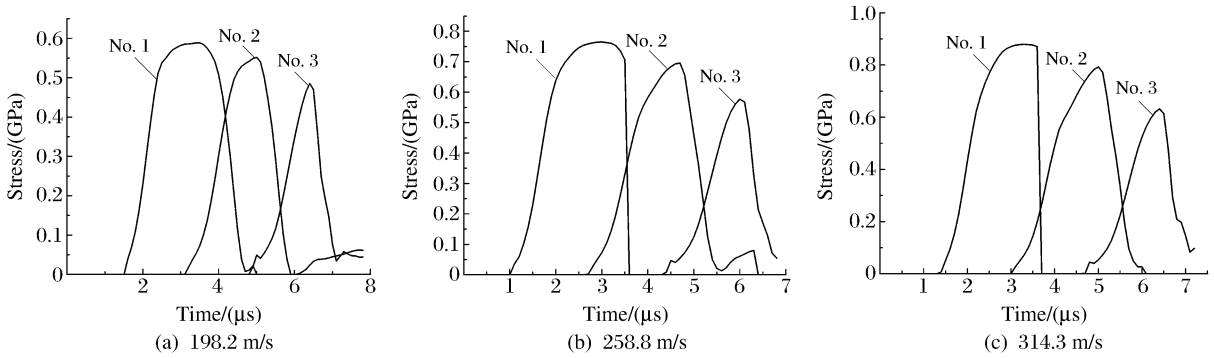


图 4 不同冲击速度下的模拟时间-应力曲线

Fig. 4 Time-stress curves from simulations under different impact velocities

3.3 飞片和靶板中波的传播

采用数值模拟除了成本低、周期短、具有可重复性等优点外，还有一个优点就是能够细致地显示出试件内部的变化情况。本节利用飞片和靶板的状态图，对实验过程中波的传播给予解释说明。下面以 198.2 m/s 速度下波的传播为例进行分析，见图 5、图 6 和图 7。

在进行分析之前作如下说明：

(1) 状态图中的材料由弹性状态进入塑性状态，主要是由于压缩波的作用，所以可以利用塑性区的流动说明压缩波的传播。

(2) 由于数值模拟中素混凝土材料选用的是 RHT 模型，该模型是以最大拉应力定义失效的，即当最大拉应力超过 7.2 MPa 时，材料变为失效状态(Fail 11)。所以可以利用失效区的流动，说明飞片、靶板的边侧稀疏效应和左、右自由面的反射拉伸波作用。

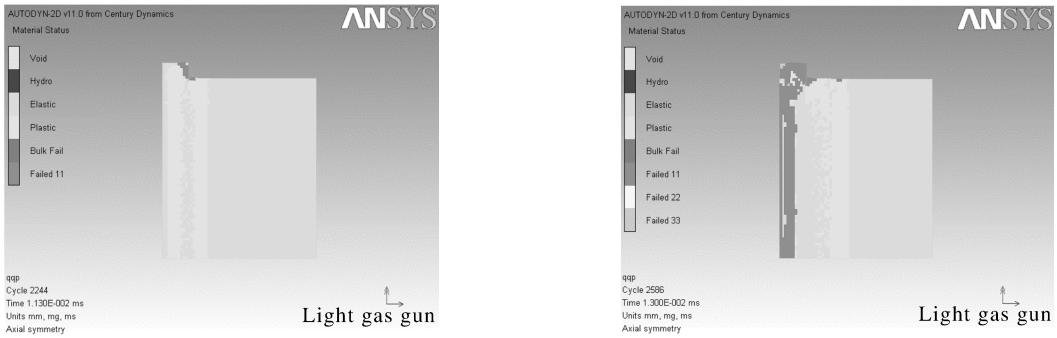


图 5 $t=1.3\ \mu s$(左)和 $t=3.0\ \mu s$(右)时的材料状态

Fig. 5 Material state at $t=1.3\ \mu s$(left) and $t=3.0\ \mu s$(right)

从图 5 可以看出：当飞片与靶板碰撞时，在碰撞面产生压缩波，分别向左、向右传播，在压缩波经过的区域，材料不断进入塑性状态，产生内部损伤破坏。当飞片中的压缩波传播到最左端的自由面时发生反射，形成一个向右传播的拉伸波，在拉伸波作用的区域材料进入失效状态。

从图 6 可以看出：在压缩波的作用下，第 1 层靶板最先破坏，第 2 层、第 3 层依次发生破坏。与此同时，在靶板的左上角逐渐产生一个三角形的失效区域，并不断扩大，此处材料产生拉伸破坏。主要说明：靶板的边侧稀疏效应比较明显，压缩波在靶板内向右传播的过程中，会在侧边上各点反射拉伸波，拉伸波不断向中心传播并叠加，在叠加处素混凝土材料受到拉伸而产生失效破坏。从图 6 中还可以清楚地看到：当边侧稀疏效应产生的拉伸作用到达第一层靶板中心位置时，右行压缩波早已通过第一个高斯点，说明边侧稀疏效应不会影响到试件中锰铜压阻计的信号，本次实验设计的靶板宽厚比 3.5 是非常合理的。

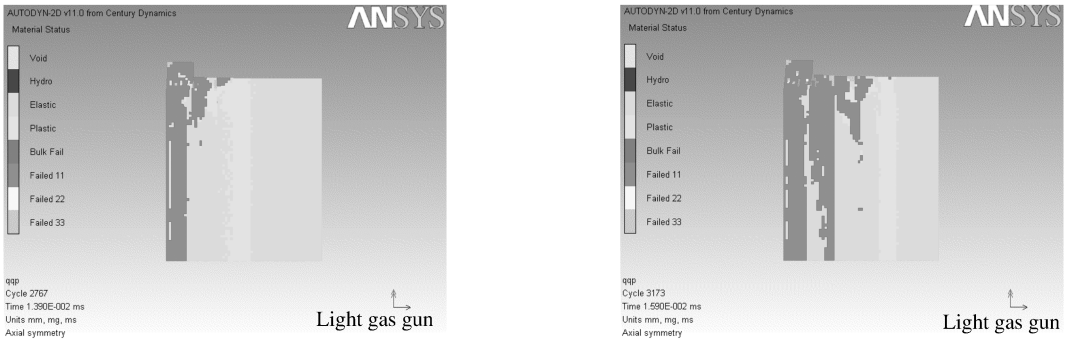


图 6　$t=3.9\ \mu s$(左)和 $t=5.9\ \mu s$(右)时的材料状态

Fig. 6　Material state at $t=3.9\ \mu s$(left) and $t=5.9\ \mu s$(right)

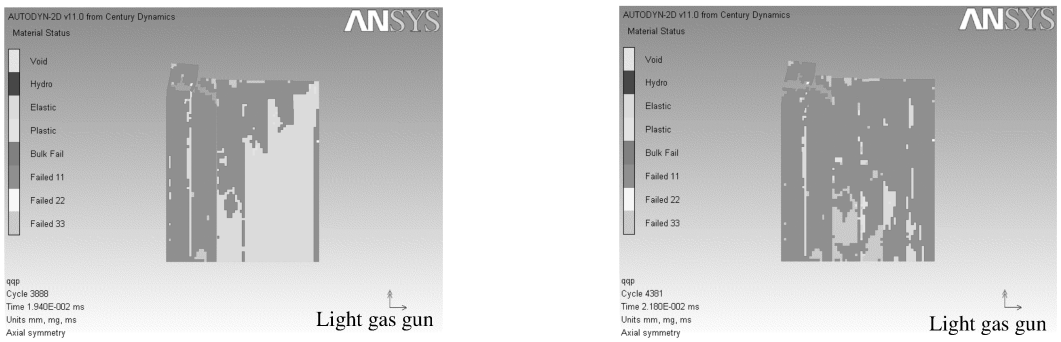


图 7　$t=9.4\ \mu s$(左)和 $t=11.8\ \mu s$(右)时的材料状态

Fig. 7　Material state at $t=9.4\ \mu s$(left) and $t=11.8\ \mu s$(right)

从图 7 可以看出:靶板内的压缩波传到最右端自由面时,将发生反射,产生左行拉伸波,最后,飞片和靶板在压缩波、边侧稀疏效应和左右自由表面反射拉伸波的共同作用下,形成宏观破碎。由飞片自由表面反射的右行拉伸波始终没有追上靶板内的右行压缩波,也就无法影响实际实验中锰铜压阻计的测试信号,追赶比为 4 的设计是合理的。

4　结　论

通过对素混凝土的轻气炮加载实验和数值模拟研究,可知:混凝土材料表现出明显的率相关性、滞后效应和应力波的衰减特征,这些与材料内部损伤的演化密切相关;混凝土材料在压缩波、边侧稀疏效应和左、右自由表面反射拉伸波的共同作用下,最终形成宏观破碎;实验中合理的设计试件尺寸可以有效保证测试信号的准确性。

References:

[1]　Wang L L. Progress in Studies on Dynamic Response of Structures and Materials under Explosive/Impact Loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2): 81-88. (in Chinese)
王礼立. 爆炸与冲击载荷下结构和材料动态响应研究的新进展 [J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(2): 81-88.

[2]　Abrams D A. Effect of Rate of Application of Load on the Compressive Strength of Concrete [J]. ASTM J, 1917, 17(Part Ⅱ): 364-377.

[3]　Malvern L E, Jenkins D A, Tang T, et al. Dynamic Compressive Testing of Concrete [A]//Ross C A, Thompson P Y. Proceedings of Second Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures [C]. Florida: US Department of Defense, 1985: 194-199.

[4] Ross C A, Thompson P Y, Tedesco J W. Split-Hopkinson Pressure-Bar Tests on Concrete and Mortar in Tension and Compression [J]. ACI Mater J, 1989, 86(5): 475 -481.
[5] Ross C A, Tedesco J W, Kuennen S T. Effects of Strain Rate on Concrete Strength [J]. ACI Mater J, 1995, 92(1): 37-47.
[6] Ross C A, Jerome D M, Tedesco J W, et al. Moisture and Strain Rate Effects on Concrete Strength [J]. ACI Mater J, 1996, 93(3): 293-300.
[7] Bischoff P H. Compressive Response of Concrete to Hard Impact [D]. London: University of London, 1988.
[8] Bischoff P H, Perry S H. Impact Behavior of Plain Concrete in Uni-Axial Compression [J]. J Eng Mech, 1995, 121(6): 685-693.
[9] Bischoff P H, Perry S H. Compressive Behavior of Concrete at High Strain Rates [J]. Mater Struct, 1991, 144(24): 425-450.
[10] Hu S S, Wang D R, Liu J F. Experimental Study of Dynamic Mechanical Behavior of Concrete [J]. Engineering Mechanics, 2001, 8(5): 115-126. (in Chinese)
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, 8(5): 115-126.
[11] Wang D R, HU S S. Influence of Aggregate on the Compression Properties of Concrete under Impact [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(1): 23-27. (in Chinese)
王道荣, 胡时胜. 骨料对混凝土材料冲击压缩行为的影响 [J]. 实验力学, 2002, 17(1): 23-27.
[12] Ning J G, Shang L, Sun Y X. Investigation on Impact Behavior of Concrete [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(2): 199-208. (in Chinese)
宁建国, 商 霖, 孙远翔. 混凝土材料冲击特性的研究 [J]. 力学学报, 2006, 38(2): 199-208.
[13] Shang L. Studying of Dynamic Constitutive Behavior and Failure Mode of Reinforced Concrete [D]. Beijing: Beijing Institutive of Technology, 2005. (in Chinese)
商 霖. 钢筋混凝土材料动态本构特性及其破坏行为的研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2005.
[14] Lu J H. Investigation on the Dynamic Property of Steel Reinforced Concrete Subjected to Impact Loading [D]. Beijing: Beijing Institutive of Technology, 2005. (in Chinese)
卢静涵. 强冲击载荷下钢筋混凝土材料的力学性能研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2003.
[15] Liu H F, Ning J G. Constitutive Model of Concrete Subjected to Intense Impact Loading [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics. 2008, 29(3): 231-238. (in Chinese)
刘海峰, 宁建国. 强冲击荷载作用下混凝土材料动态本构模型 [J]. 固体力学学报, 2008, 29(3): 231-238.

Experiments and Numerical Simulations of Concrete Dynamic Mechanical Properties

ZHANG Zhu[1,2], ZHAO Hui[1], YU Hui[1]

(1. *State Key laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institutive of Technology, Beijing* 100081, *China*;
2. *School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan* 030024, *China*)

Abstract: A light gas gun was used to conduct the dynamic mechanical properties experiments of plain concrete material under three different impact velocities, getting the time-stress curves. Then, numerical calculations were used to simulate concrete's light gas gun experiments, comparing the simulation results with experimental results. In this paper the propagation of wave in flyer and target was formulated. Further analysis shows that concrete material has obvious rate-related properties, lag effect and stress wave's attenuation features, and all of this is closely related to the evolution of internal damage in material. Concrete material finally forms macro fracture under the interaction of compression wave, side release effect and reflected tensile wave of left and right free surface. The size of target in the experiment is reasonable, avoiding the effect of side releasing on the test signals of manganin piezoresistive transducer.

Key words: light gas gun; plain concrete; experiment; numerical simulation