

冲击压缩载荷下大尺寸混凝土力学响应的数值模拟

陈博斐, 邱 欣, 王 甲, 陈江瑛*

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 利用 Ansys/Ls-dyna 有限元软件模拟打击气压为 0.6、0.8、1.2 MPa 下大尺寸混凝土的 SHPB 束杆试验。试验结果表明, 模拟得到的冲击试验过程中束杆传播的入射、反射及透射应力波信号与实测结果比较, 波形总体吻合较好, 入射波偏差很小, 反射波和透射波差异略大; 打击气压越大, 试样破坏速度越快。数值模拟给出了不同打击气压下大尺寸混凝土破坏形貌变化的规律。

关键词: 大尺寸混凝土; SHPB 束杆; 数值模拟; 应力波; 破坏形貌

中图分类号: O347.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2017) 01-0073-04

混凝土广泛应用于民用基础与国防设施中, 是当代最重要、应用最广泛的土建材料之一。现代混凝土结构除了要承受静态载荷作用外, 往往还要承受变化剧烈的动态冲击载荷, 例如核反应容器外壳、各种防护结构、海洋工程结构和桥梁等。在遭受爆炸、地震、海浪、武器攻击等冲击载荷时, 混凝土变形将承受较高量级的应变率变形, 并表现出与受静态载荷时不同的力学性能。为了更好地运用混凝土, 必须对此有充分的了解。

分离式 Hopkinson 压杆(SHPB)试验技术是目前研究混凝土动态力学性能的主要手段之一^[1-3]。由于粗杆可能出现的横向惯性效应问题, 针对大尺寸混凝土试样的 SHPB 压杆试验研究较少。欧盟 ISPRA 联合研究中心开发的 200 mm×200 mm 捆绑式拉伸束杆技术^[4], 为大尺寸试样的冲击动态力学性能测试作了有益的探索。为提高效率、指导试验, 有不少研究者采用计算机模拟方法来研究材料在冲击载荷作用下的力学响应^[5-7]。根据材料均匀性假设技术, 通常混凝土试样的尺寸要比粗骨料大一个量级。为更接近工程实际, 本研究制成大尺寸试样, 利用宁波大学自主开发的 SHPB 束杆试验装置, 结合混凝土试样冲击试验结果, 采用 Ansys/Ls-dyna 有限元软件对不同子弹打击速度或不同打击气压下的 SHPB 束杆冲击实验进行数值模拟, 并

分析了应力波传播及试样破坏形貌的变化规律。

1 SHPB 束杆实验

SHPB 束杆冲击试验采用如图 1 所示的试验装置, 入、透射束杆由 25 根截面为 30 mm×30 mm 的铝质方杆组成, 入射杆长 150 cm, 透射杆长 100 cm, 杆与杆间隔 1 mm, 以便杆上贴片记录波传播信号, 此试验装置可有效地减少横向惯性效应带来的波形弥散^[8], 并满足 SHPB 的 2 个基本假定。本研究对象为四方体尺寸为 150 mm×150 mm×100 mm 试样, 密度 2 153.7 kg·m⁻³, 静压试验得到弹性模量为 31 GPa, 静态抗压强度为 62.9 MPa。

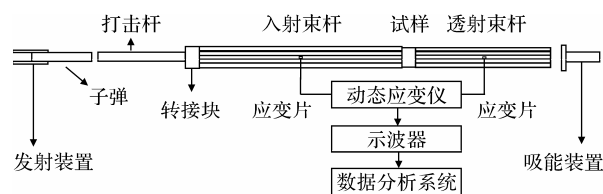


图1 SHPB 束杆装置示意图

2 有限元分析的前处理

2.1 材料本构模型及参数

混凝土试样采用的 HJC (Holmquist-Johnson-Cook) 等效强度模型为^[9]。

$$\sigma_b / f_c = [A(1 - D) + B(p / f_c)^n][1 + C \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)],$$

收稿日期: 2016-01-06.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(10972109, 11272165)。

第一作者: 陈博斐(1993-), 男, 江西于都人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学。E-mail: chenbofei912@163.com

*通信作者: 陈江瑛(1964-), 女, 浙江宁波人, 博士/教授, 主要研究方向: 冲击动力学。E-mail: chenjiangying@nbu.edu.cn

式中: σ_b 为真实等效强度; f_c 为准静态单轴抗压强度; $\dot{\varepsilon}$ 为真实应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; A 、 B 、 C 、 n 为材料参数; D 为损伤度, 定义为损伤体积所占比重, 考虑等效塑性应变和塑性体积应变引起的损伤, 其表达式为:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f},$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 、 $\Delta \mu_p$ 为一个计算循环内等效塑性应变和等效体积应变; ε_p^f 、 μ_p^f 为常压下破碎的等效塑性应变和塑性体积应变。

前期试验中测得混凝土准静态抗压强度 f_c 、密度 ρ 及弹性模量 E 。参考文献[5]并结合试验结果, 计算 HJC 模型中部分参数, 并拟合得到参数 A 、 B 、 n 分别为 0.71、1.80、0.81, 余下参数采用缺省值^[10]。混凝土 HJC 模型参数为: 密度 $2153.7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 剪切模量 $12.92 \times 10^9 \text{ Pa}$, 归一化内聚强度 0.71, 归一化压力硬度系数 1.80, 应变率系数 0.007, 压力硬化系数 0.81, 准静态抗压强度 $62.9 \times 10^6 \text{ Pa}$, 准静态最大拉伸强度 $4.92 \times 10^6 \text{ Pa}$, 参考应变率 1×10^{-6} , 压碎塑性应变 0.01, 归一化最大强度 7.0, 压碎体积应力 $20.97 \times 10^6 \text{ Pa}$, 压碎体积应变 0.001 22, 压实体积应力 $0.72 \times 10^9 \text{ Pa}$, 压实体积应变 0.06, 损伤系数 $D1$ 为 0.04, 损伤系数 $D2$ 为 1.0, 压力系数 $K1$ 为 $85 \times 10^9 \text{ Pa}$, 压力系数 $K2$ 为 $-171 \times 10^9 \text{ Pa}$, 压力系数 $K3$ 为 $208 \times 10^9 \text{ Pa}$, 失效应变 0.004。

2.2 侵蚀失效准则

HJC 模型中失效应变 f_s 值具有判定和删除畸变过大单元的功能, 研究中取 $f_s = 0.002$, 但仅采用此方法删除已破坏单元计算耗时较长。为提高效率, 配合 HJC 模型, 利用侵蚀失效准则 *MAT_ADD_EROSION 关键字, 设定最大失效应变为 0.002, 其他参数值足够大, 单元仅在有效应变超过 0.002 时被判定为失效并被删除。

2.3 有限元模型及单元划分

数值仿真采用的几何模型省略了传统 SHPB 压杆试验模拟研究中的子弹模型, 由于模型的轴对称性, 为减少单元数目从而减少计算时间, 我们采用四分之一模型, 提升了模拟的稳定性和效率。

子弹、SHPB 束杆及混凝土试件用 Ansys/Ls-dyna 软件中 3D Solid164 单元。采用映射网格划分方法, 混凝土试样单元划分尺寸为 2 mm, 束杆单

元划分尺寸为 1 cm。转接块模型运用布尔运算进行分割再胶结后进行单元划分, 使得转接块单元与束杆单元之间可以匹配衔接, 让模拟结果更加精确。同理, 协调束杆与混凝土试件接触面的单元形状及尺寸。有限元几何模型如图 2 所示, 试样及其周围的单元划分如图 3 所示。

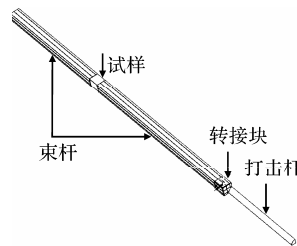


图2 装置模型

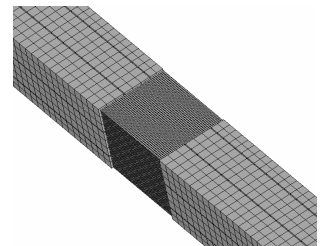


图3 单元划分情况

2.4 接触、边界条件与载荷

试件与入、透射束杆之间采用侵蚀面面接触, 其他接触面采用自动面面接触。接触算法采用罚函数接触算法以减少沙漏效应。由于模型为四分之一模型, 在模型对称面上加载法向位移约束。

传统 SHPB 压杆试验模拟, 通常给子弹加载瞬时速度来作为载荷, 且子弹撞入射杆后, 在入射杆端面产生梯形应力脉冲并在其中传播。本研究的有限元模型将子弹省略, 结合实际试验情况, 利用打击杆前端面加载拟合的梯形应力脉冲载荷来代替不同打击气压下子弹的速度载荷。

3 结果及分析

3.1 杆中应力波

SHPB 束杆试验中, 为得到不同的子弹打击速度, 我们控制不同的子弹发射气压, 若将每根杆的中间位置作为应力波信号的采集点。图 4 和图 5 给出了实验和模拟分别得到的入射束杆和透射束杆

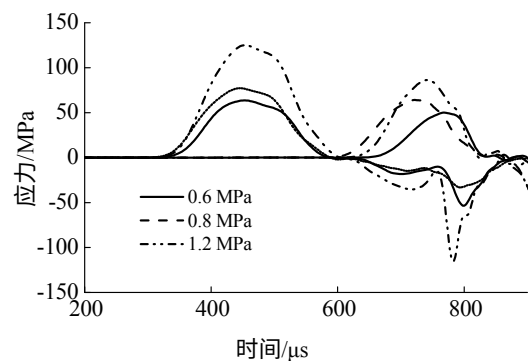


图4 模拟应力波信号

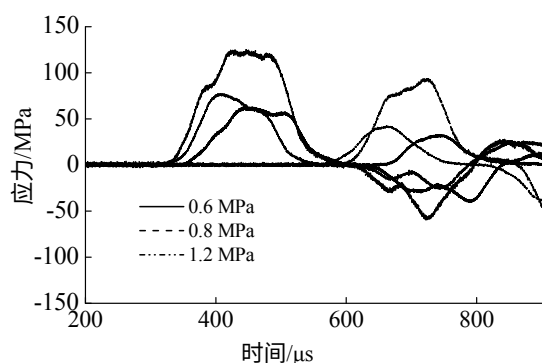


图5 实验应力波信号

中平均应力波信号数据。

从图4和图5可看出,对于加载在试样上的入射应力波而言,除了由于不同组次试验的微小误差引起的波形起始点略有差异外,波形形状的吻合基本一致。为更方便地进行误差分析,研究提取入射应力波峰值数据见表1。

表1 入射应力波峰值相关数据

打击气压/MPa	模拟入射波峰值/MPa	试验入射波峰值/MPa	相对偏差/%
0.6	63.58	62.56	0.81
0.8	77.19	77.82	0.41
1.2	125.01	125.31	0.12

从表1可看出,在不同打击气压下,模拟与实测的入射波峰值相对偏差很小,且两者入射波形也较为吻合,说明对加载试样的冲击载荷,模拟与实验的误差极小。且发现在本束杆冲击试验中入射应力波峰值数值上都接近于打击气压数值的百倍,对试验的进行具有一定的指导意义。

试样加载后形成的反射应力波与透射应力波波形大体吻合,数值上存有少许差异。分析其原因主要有:(1)混凝土在发生塑性变形和损伤破坏时,不管是试验还是模拟都存在一定的数据离散性,其中试验情况更为严重。(2)在试验过程中冲击载荷下混凝土内部部分结构破坏碎裂后被压实,也就是试样内部材料可以及时填充周围因破碎而形成的空洞。然而数值模拟采用单点积分、拉格朗日算法以及侵蚀失效准则删除单元,单元被删除后其形成的空洞并不能被周围材料所填补,试样波阻抗降低,透射波后期减小迅速,曲线形状变得陡峭,而反射波后期大大增加,这也符合一维应力波理论。

3.2 试样破坏形貌

本研究对不同打击气压下模拟冲击过程中的试样破坏形貌变化进行了记录和分析。以应力波刚传播加载至试样时为初始零时刻,选取了0、100、112、240 μs 4个时间点进行数据记录。

图6是模拟打击气压为0.6 MPa下试件随时间变化的破坏形貌。从图6可看出,在冲击载荷加载初期,试件表面中部有少许单元剥落形成孔洞,随着时间的推移,在试样边缘角部分形成了明显的裂缝,且裂缝深度慢慢增大,引发周围一些小的裂缝。同时,试样侧面也有少许小裂缝产生。

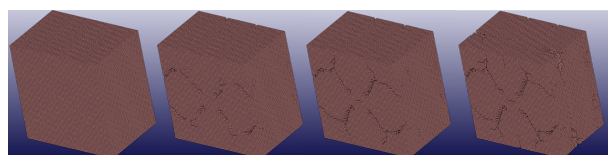


图6 0.6 MPa 打击气压下冲击过程中试件的破坏发展

图7是模拟打击气压为0.8 MPa下试件随时间变化的破坏形貌。从图7可看出,在冲击载荷加载初期,试件表面有少许单元的剥落形成孔洞,随着时间推进,在试样表面接近边缘角及中间部分形成明显的裂缝,且裂缝深度慢慢增大,引发周围的一些单元剥落形成更深、更多的裂缝。同时,试样侧面也产生了较多的裂缝,最后试样中部横截面位置形成较为完整的粗裂缝。

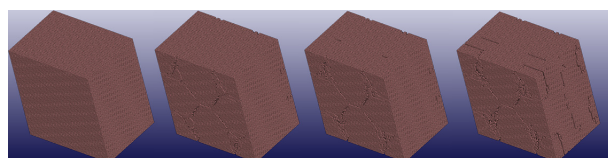


图7 0.8 MPa 打击气压下冲击过程中试件的破坏发展

图8是模拟打击气压为1.2 MPa的冲击过程中试件随时间变化的破坏形貌。与图6和图7相似,裂缝从出现、扩展、贯穿到整个试样,但损伤发展速度快于前两者。裂缝深度在3种打击气压情况下最大,试样侧面产生了很多贯穿试样的裂缝,并将试样切割成大大小小的部分。

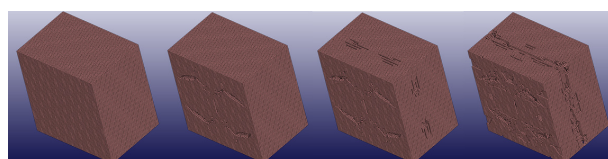


图8 1.2 MPa 打击气压下冲击过程中试件的破坏发展

综上在试样一次加载过程中不同打击气压下的试样破坏趋势是一致的,试样的破坏裂缝是从试样表面接近边缘部分逐渐发展到试样表面中部,边缘部分损伤严重,且试样的侧面开始产生小裂缝逐渐延伸扩展,直至贯穿试样,试样碎裂成大小不同的碎片。随着打击气压或子弹速度的增加,试样破坏加速。

4 结语

分别对子弹发射气压为 0.6、0.8、1.2 MPa 情况下,大尺寸混凝土试样的 SHPB 束杆试验进行了数值模拟研究,得到如下结论:(1)模拟试验杆中应力波形数据与实测结果比较,两者在入射波上误差极小,反射、透射波上有少许差异,总体两者吻合较好。(2)模拟研究给出了大尺寸混凝土试样在冲击载荷下的损伤破坏形貌变化规律,即在不同打击气压下,试样破坏发展总规律一致,破坏从表面边缘发展到中部,边缘部分损伤严重,且试样侧面也同时产生裂缝并扩展,直至试样碎裂为大小不同碎片,打击气压越大,试样的破坏越快。

参考文献:

- [1] 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):115-118.
- [2] 陈德兴,胡时胜,张守保,等. 大尺寸 Hopkinson 压杆及其应用[J]. 试验力学, 2005, 20(3):398-402.
- [3] ZHU J, HU S, WANG L. An analysis of stress uniformity for concrete-like specimens during SHPB tests[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1):61-72.
- [4] ALBERTINI C, CADONI E, LABIBES K. Impact fracture process and mechanical properties of plain concrete by means of an Hopkinson bar bundle[J]. Le Journal De Physique IV, 1997, 7(C3):915-920.
- [5] 贾彬,李正良,陶俊林,等. 混凝土 SHPB 试验数值模拟研究[J]. 固体力学学报, 2010(S1):216-222.
- [6] 巫绪涛,孙善飞,李和平. 用 HJC 本构模型模拟混凝土 SHPB 实验[J]. 爆炸与冲击, 2009(2):137-142.
- [7] ZHU W C, BAI Y, LI X B, et al. Numerical simulation on rock failure under combined static and dynamic loading during SHPB tests[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 49(2):142-157.
- [8] 张圆. 基于 Hopkinson 束杆技术的混凝土动态实验方法研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2009.
- [9] HOLQMUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rate, and high pressures[C]//The 14th International Symposium on Ballistics. Quebec, Canada, 1993: 591-600.
- [10] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005:101-103.

Numerical simulation on mechanical response of concrete subjected to impact compressive loading

CHEN Bo-fei, QIU Xin, WANG Jia, CHEN Jiang-ying*

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: The numerical simulations of the bundled Hopkinson pressure bar tests of large-size concrete with 0.6, 0.8 and 1.2 MPa fire pressures are studied using the finite element software of Ansys/Ls-dyna in this paper. The incident stress waves, reflected stress waves and transmitted stress waves are obtained in the bundled bars of experiments and simulations during the process of impact, and the error analysis is consequently made. The results show that the waves of simulation are in good agreement with the experimental data. The deviation of incident stress waves is small enough. This study provides the explanation for the trivial difference of the reflected stress waves and the transmitted stress waves. The conclusion from this study is that the larger the blow air pressure, the faster the damage speed. The trends are also analyzed of the damage appearance changes of large-size concrete subjected to different fire pressures.

Key words: large-size concrete; bundled Hopkinson pressure bar; numerical simulation; stress wave; damage appearance

(责任编辑 史小丽)