

爆破地震作用下结构的损伤及动力响应分析

陈士海^{1,2}, 张安康¹, 张子华¹, 燕永峰¹

(1. 山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要:针对建筑结构爆破地震响应研究中材料模型和结构模型过于简化的问题,采用已建立的岩石类材料的正交各向异性动力损伤本构模型,将其编制成动力有限元软件 LS-DYNA 的用户自定义子程序,模拟计算一个二层两跨典型砌体结构在不同爆破地震波作用下的动力响应,并分析了爆破地震波三要素对建筑结构的损伤及动力响应的影响,结果表明:地震波幅值的增加,可明显加剧结构的损伤,损伤可大幅增加结构应变响应;结构存在一个危险的频率段,并且这个频率段应在结构高阶振动模态对应的频率中;结构的损伤和动力响应还与震动波形有密切关系;当结构受迫震动阶段产生损伤时,爆破地震波持续时间对结构响应影响就很大。

关键词:爆破地震波;建筑结构;损伤;动力响应

中图分类号:TD235.1

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)05-0036-06

Damage of Structures and Dynamic Response Analysis under the Action of Blasting Seism

CHEN Shihai^{1,2}, ZHANG Ankang¹, ZHANG Zihua¹, YAN Yongfeng¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Shandong Provincial Key Lab of Disaster Prevention and Mitigation of Civil Engineering,
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: According to the problem of oversimplification of material and structural models in researches of blasting seismic response of architectural structures, an existing orthotropic dynamic damage constitutive model was adopted to write users' self-defined subroutine of dynamic finite element software LS-DYNA with which the dynamic response of a two-storey, two-span and representative masonry structure were simulated under the action of different blasting seismic waves, and then, the influence of three main factors of blasting seismic waves on the damage of architectural structures and dynamic response was analyzed. Results showed that the damage of structure would be greatly enhanced with the increase of amplitude, increasing the strain response of structure remarkably. There exists a dangerous frequency section, which was in the frequencies corresponding to higher order vibration modal of structure. The damage and dynamic response of structure were significantly related with waveform, and if structure damaged during forced vibration phase, the duration time would influence dynamic response remarkably.

Key words: blasting seismic wave; architectural structure; damage; dynamic response

爆破地震波作用下建筑结构的动力响应是工程爆破研究领域的一个热点问题。研究建筑结构在爆破地震波作用下的动力响应及损伤破坏特征对建筑结构的安全评价及爆破施工设计都有重要意义。爆破地震波的三个主要特性参数:震动幅值、频率和持续时间,作为影响建筑结构动力响应的主要因素,已引起广泛关注。但是,在目前基于理论及动力有限元的相关研究中^[1-7],材料模型大多采用线弹性模型或弹塑性模型,结

收稿日期:2011-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41072212)。

作者简介:陈士海(1964—),男,山东新泰人,教授,博士生导师,主要从事爆破灾害预测与控制技术研究。

E-mail: cshblast@163.com.

构模型则采用简化的杆系模型或框架结构,并不能准确模拟出建筑结构动力的损伤累积破坏过程。因此,引入考虑建筑材料动力特性的损伤本构模型,并进一步分析爆破地震波三要素对建筑结构实体模型的损伤及动力响应的影响。

本研究采用已建立的岩石类材料的正交各向异性动力损伤本构模型^[8],将其编制成动力有限元软件 LS-DYNA 的用户自定义子程序,模拟计算一个二层两跨典型砌体结构在不同爆破地震波作用下的损伤及动力响应,籍此分析了爆破地震波三要素对建筑结构的损伤及动力响应的影响。

1 结构模型及本构模型

选用一个二层两跨砌体结构作为结构模型,研究其在爆破地震波作用下的损伤及动力响应。结构的单跨跨度为 6 m×5 m,层高 3.6 m。构造柱的截面尺寸为 240 mm×240 mm,布置在墙体交接处;圈梁的截面尺寸为 240 mm×250 mm,布置在楼板下面墙体上面;楼板厚度为 100 mm,墙体厚度为 240 mm。结构的平面、有限元模型分别如图 1、图 2 所示。梁、柱和楼板采用钢筋混凝土,砌体墙由普通烧结砖和砂浆砌成,因模型计算量很大,钢筋混凝土及砌体墙均采用整体式模型^[9],材料参数见表 1。结构模型中网格单元的尺寸保持在 100~120 mm。

材料本构模型采用文献[8]中建立的岩石类材料的正交各向异性动力损伤本构模型。模型中以动力放大系数的形式考虑材料的应变率效应,采用主应变方向的损伤变量来描述材料在外力作用下的损伤。损伤演化采用 Mazars 损伤模型描述主轴方向的损伤变量 $D_i (i=1,2,3)$,屈服破坏准则采用 Hoffman 提出的正交各向异性破坏准则^[10]。将该模型编制成动力有限元软件 LS-DYNA 的用户自定义子程序,以模拟分析结构在爆破地震波作用下的动力响应。

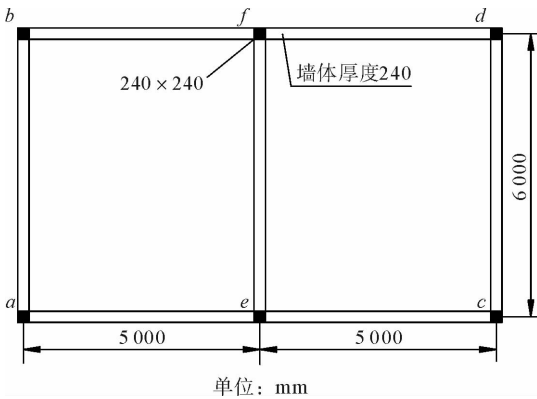


图 1 结构平面图

Fig. 1 The plane figure of structure

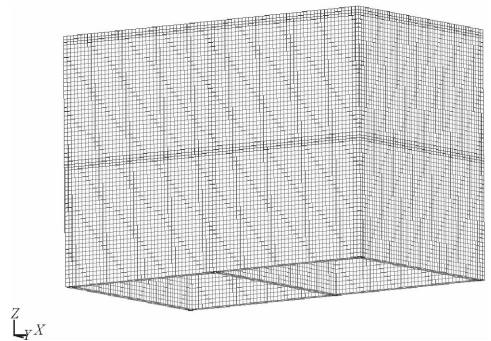


图 2 结构有限元模型图

Fig. 2 The finite element model of structure

表 1 材料参数表

Tab. 1 The material parameters

材料类型	密度/(kg/m ³)	弹性模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗剪强度/MPa
钢筋混凝土	2 650	34.5	0.20	32.4	2.85	3.99
砌体	1 800	4.7	0.16	3.5	0.35	0.42

2 地震波三要素对结构动力响应的影响

为简化问题,仅考虑垂直方向地震波作用下结构的动力响应。计算的荷载选用 IDTS3850 型号爆破震动记录仪测得的一段典型的爆破地震波 w (速度波),施加到结构底部全部节点上,方向为垂直方向(Z 方向)。该波的幅值为 6.0 cm/s,主频为 82 Hz,持续时间为 0.11 s,其速度时程曲线如图 3 所示。

2.1 幅值对结构响应的影响

为分析幅值对结构损伤及动力响应的影响,在上述典型爆破地震波 w (图 3)基础上,保持主频及持续时间不变,改变其幅值分别为 6.0 cm/s, 4.8 cm/s 及 3.6 cm/s,形成只有幅值不同的 3 组荷载。然后分别计算 3 组荷载作用下结构的损伤及动力响应。

计算结果中,当地震波峰值速度(peak particle velocity, PPV)为 3.6 cm/s 时,结构并未产生损伤;当 PPV 分别为 4.8 cm/s 和 6.0 cm/s 时,结构均未出现压损伤,而最终($t=0.11$ s)的拉损伤分布云图如图 4 所示。当 $PPV=3.6$ cm/s 时,结构损伤为 0,而从图 4 中可以看出,当 PPV 分别为 4.8 cm/s 和 6.0 cm/s 时,结构损伤的最大值分别为 0.46 和 0.95。而且当 $PPV=4.8$ cm/s 时,结构的损伤只发生在一层内墙底部的中间及墙体与中间柱子交接的部位,如图 4(a)所示;而当 $PPV=6.0$ cm/s,结构不但在一层砌体墙上出现了全面的损伤,在二层墙体底部也出现少量的损伤,如图 4(b)所示。这表明在强烈的地面震动下,砌体结构一层的破坏最为严重,并以受拉破坏为主;增加地震波幅值,可明显加剧结构的损伤。

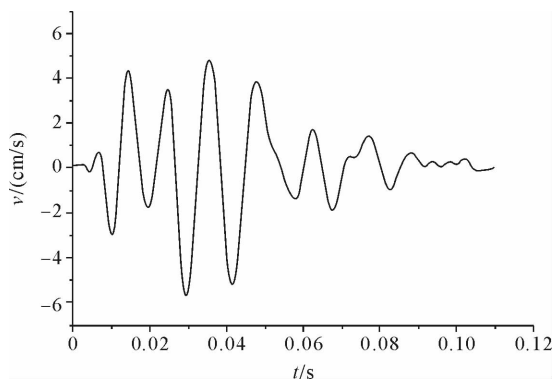


图 3 地震波速度时程曲线图

Fig. 3 The velocity and time-history curves of seismic waves

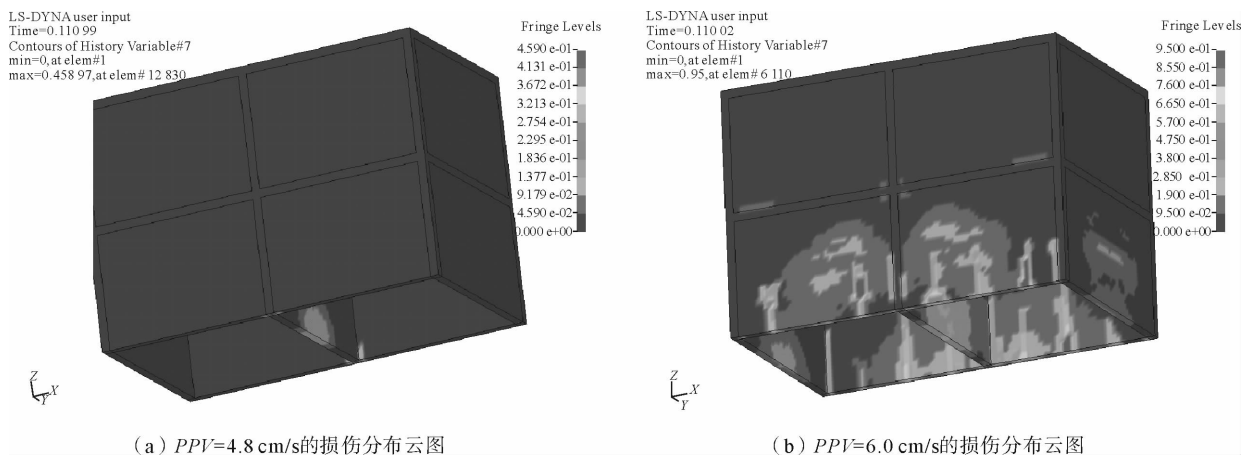


图 4 不同幅值荷载作用下结构损伤云图

Fig. 4 The cloud atlas of structural damages under the action of different amplitude loads

3 组荷载作用下结构所有单元的最大等效应力和应变的响应结果如表 2 所示;最大等效应力峰值基本随幅值线性增长,而最大等效应变峰值的增加则明显比幅值的增加更快。这是由于最大等效应力都出现在钢筋混凝土构件单元上,这些单元都没有出现损伤,这表明当结构材料无损时,其应力响应基本随幅值线性变化;而最大等效应变全部出现在砌体墙单元中,由于幅值的增加导致砌体墙上出现了大量的损伤,这表明当材料发生损伤后,应变响应和地震波幅值的增加呈现明显的非线性,应变响应增加得更快。

2.2 频率对结构响应的影响

为分析频率变化对结构损伤及动力响应的影响,首先需要选择几组不同频率的地震波。一种方法可以采用在同一地震波的基础上,缩放其时间轴来改变其频率,在不改变幅值和波形的情况下改变地震波的频率和持续时间。另一种方法是从实测地震波中选择几组不同频率的波,然后把它们的幅值和持续时间调整到

一致,但相互之间波形不一致。本文同时采用两种方法研究地震波频率的影响。

首先在典型地震波 w 的基础上缩放其时间轴,得到 7 组不同频率的荷载(荷载组 1),计算结果如表 3 所示。另外从实测地震波中选择 7 组不同频率的荷载(包含地震波 w ,荷载组 2),计算结果如表 4 所示。

表 2 不同幅值荷载作用下结构的响应结果表

Tab. 2 The structural response under the action of different amplitude loads

爆破地震波特性			结构响应	
幅值/(cm/s)	主频/Hz	持续时间/s	最大等效应力曲线峰值/MPa	最大等效应变曲线峰值
3.6			2.35	9.00×10^{-5}
4.8	82	0.11	3.19	2.00×10^{-4}
6.0			3.84	2.39×10^{-3}

表 3 结构动力响应结果表(荷载组 1)

Tab. 3 The dynamic response of structure (load group 1)

爆破地震波特性			结构响应		
主频/Hz	幅值/(cm/s)	持续时间/s	最大损伤值/ D_{max}	最大等效应变曲线峰值	损伤分布简述
22		0.41	0.00	2.79×10^{-5}	没有损伤
33		0.28	0.00	7.33×10^{-5}	没有损伤
44		0.21	0.95	发散	损伤严重,一层墙体底部完全破坏
55	4.8	0.17	0.95	发散	损伤非常严重,一层墙体、柱子下部几乎完全破坏
65		0.14	0.95	发散	损伤比较严重,一层墙体部分区域破坏
82		0.11	0.46	1.96×10^{-4}	只在一层内墙底部及中柱附近墙体上出现少量损伤(图 4(a))
110		0.08	0.00	4.88×10^{-5}	没有损伤

注:在主频为 44,55 及 65 Hz 的地震波作用下,结构由于损伤严重,单元变形过大,网格发生畸变,加载未完成即发生破坏。

表 4 结构动力响应结果表(荷载组 2)

Tab. 4 The dynamic response of structure (load group 2)

爆破地震波特性			结构响应		
主频/Hz	幅值/(cm/s)	持续时间/s	最大损伤值/ D_{max}	最大等效应变曲线峰值	损伤分布简述
27			0.00	6.02×10^{-5}	没有损伤
36			0.29	1.18×10^{-4}	损伤不严重,主要分布在一层内墙中底部
45			0.18	1.06×10^{-4}	损伤不严重,主要分布在一层内墙中底部
55	4.8	0.11	0.95	5.34×10^{-4}	一层墙体上广泛分布着中等程度的损伤
64			0.95	发散	损伤比较严重,一层墙体部分区域破坏
82			0.46	1.96×10^{-4}	只在一层内墙底部及中柱附近墙体上出现少量损伤(图 4(a))
110			0.00	6.35×10^{-5}	没有损伤

从表 3 可以看出,当地震波主频为 55 Hz 时,结构的损伤和破坏最为严重,并随着地震波主频的增大或减小,结构的损伤或破坏逐渐减弱直至不产生损伤。在表 4 中,规律没有那么明显,但仍然可以看出结构在主频为 64 Hz 的地震波作用下损伤破坏最严重,当地震波主频向两端发展时,结构损伤逐渐减弱。因此,可认为当地震波的主频在 50~60 Hz 时,结构的损伤及动力响应最大,随着主频的增加或减小,结构的损伤都

将减弱。通过结构模态分析,可以看出实体结构的自振频率变化很连续,相邻振型的频率值相差很小。结构的 50~60 Hz 自振频率主要集中在 90~110 阶振动模态。因此,可以认为在垂直方向的地震波作用下,存在一个危险的频率段,当地震波主频在这个频率段时,结构响应最大;远离它时,结构响应变小,并且这个频率段应在结构高阶振动模态对应的自振频率中。

另外,比较表 3 和表 4 的计算结果可以看出,当地震波的主频和幅值都相等或相近时,结构的损伤和动力响应还可能会存在较大差异,这不仅跟地震波持续时间有关,也与波形差异有关^[1]。而且表 4 结果中,主频对结构响应的规律不如表 3 中明显,也可以证明结构响应与波形有重要的关系。

2.3 持续时间对结构响应的影响

因选取主频和幅值相同、持续时间不同的实测爆破地震波比较困难,为了尽可能地保证主频和幅值不变,可采取的方式为首先选择一实测爆破地震波,在保持其最大幅值及波形集中段不变的情况下,通过删减其幅值较小的头波和尾波以达到缩减持续时间的目的^[1]。选用典型地震波 w (图 3),分别截取 $t=0.06$ s, $t=0.09$ s 及 $t=0.11$ s 之后的波段以形成一组地震波,经验证其幅值一致,主频基本保持在 82 Hz 附近。分别截取结构在 $t=0.06$ s, $t=0.09$ s 及 $t=0.11$ s 时的损伤云图(拉损伤),其中 $t=0.11$ s 的损伤云图如图 4 (b)所示,其余的如图 5 所示。另外虽然地震波的峰值产生在 0.04 s 附近,但此时结构并未出现损伤。 $t=0.06$ s 时,结构的最大损伤为 0.36,损伤广泛分布在一层砌体墙的中下部; $t=0.09$ s 时,结构的最大损伤达到 0.95,但只出现在个别单元上; $t=0.11$ s 时,损伤值达到 0.95 的单元连成数片,结构已经明显破坏。

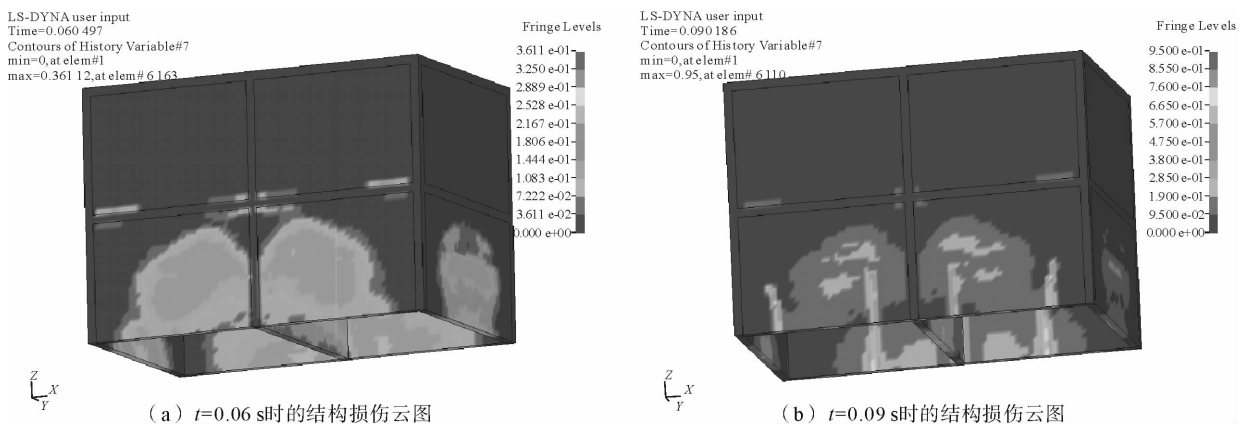


图 5 不同时刻的结构损伤云图

Fig. 5 The cloud atlas of structural damages at different times

结构对短历时脉冲的响应可分为两个阶段:受迫震动和自由震动。从 0.09~0.11 s 时,地震波的震动幅值已经非常小,可认为结构处于自由震动阶段。从损伤演化分析可以看出,结构在受迫震动阶段已经有损伤发生时,损伤在结构自由震动阶段内发展非常快,并最终导致结构的破坏。这是由于随着损伤的发展,材料的刚度和强度经损伤折减后变小,即便荷载较小时,也能产生较大的应变,并进一步引发材料损伤,直至材料破坏。

3 结论

- 1) 地震波幅值的增加,可明显加剧结构的损伤;当结构材料无损时,其应力响应基本随幅值线性变化;而当材料发生损伤后,结构应变响应和地震波幅值的增加呈现明显的非线性,应变响应的增加更快。
- 2) 在垂直方向的地震波作用下,结构存在一个危险的频率段,当地震波主频在这个频率段时,结构响应最大;远离它时,结构响应变小,并且这个频率段应在结构高阶振动模态对应的频率中。
- 3) 当地震波的主频和幅值都相等或相近时,结构的损伤和动力响应还与震动波形有密切关系。

4)当结构受迫震动阶段产生损伤时,自由震动阶段结构的损伤及动力响应都增长很快,爆破地震波持续时间对结构响应影响就很大。

参考文献:

- [1]魏海霞.爆破地震波作用下建筑结构的动力响应及安全判据研究[D].青岛:山东科技大学,2010.
- [2]陈士海,逢焕东.爆破灾害预测与控制[M].北京:煤炭工业出版社,2006.
- [3]申永康,邵建华,陈建锋.建筑结构爆破地震反应弹塑性精细时程分析[J].爆炸与冲击,2008,28(1):92-96.
SHEN Yongkang,SHAO Jianhua,CHEN Jianfeng. Precise integration analysis on blast seismic elasto-plastic responses of structures[J]. Explosion and Shock Waves,2008,28(1):92-96.
- [4]刘满堂,陈庆寿.多质点弹性体系建筑结构的爆破地震动力响应分析探讨[J].爆破,2006,23(3):25-27.
LIU Mantang,CHEN Qingshou. Study on dynamic response to blasting earthquake of the multi-particle system architectural structure[J]. Blasting,2006,23(3):25-27.
- [5]DHAKAL R P,PAN J C. Response characteristics of structures subjected to blasting induced ground motion[J]. International Journal of Impact Engineering,2003,28:813-828.
- [6]HAO Hong,WU Chengqing. Numerical study of characteristics of underground blast induced surface ground motion and their effect on above ground structures;Part II. effects on structural responses[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2005,25:39-53.
- [7]MA Guowei,HAO Hong,ASCE M. Distributed structural damage generated by high-frequency ground motion[J]. Journal of Structural Engineering,2002,3:390-399.
- [8]张安康,陈士海,杜荣强,等.岩石类材料的能量基率相关弹塑性损伤模型[J].岩土力学,2010,31(增1):207-210.
ZHANG Ankang,CHEN Shihai,DU Rongqiang,et al. Energy-based elastoplastic damage model for rock materials with strain rate effects[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(s1):207-210.
- [9]何政,欧进萍.钢筋混凝土结构非线性分析[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.
- [10]张玉军,刘谊平.锚固正交各向异性岩体的三维弹塑性有限元分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(8):1115-1119.
ZHANG Yujun,LIU Yiping. 3D elasto-plastic fem analysis for bolted orthotropic rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2002,21(8):1115-1119.