

文章编号: 1001-1455(2012)06-0658-05

爆炸荷载作用下配筋砌体结构的动力响应*

田玉滨, 李朝, 张春巍

(哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 基于大型非线性动力有限元软件 LS-DYNA, 通过改变墙体的约束情况、砌体材料的强度等级、纵向配筋率、高宽比、荷载峰值、墙体距爆心点距离、墙体开洞以及粘贴玻璃纤维复合材料等, 得到配筋砌体墙在爆炸荷载作用下的变形规律、破坏情况以及结构墙体中砌体材料、钢筋的应力和位移随时间的变化规律。同时对各种不同工况下配筋砌体墙的防爆性能进行比较, 找出了影响结构响应最为重要的因素, 给配筋砌体墙防爆设计提供参考。

关键词: 爆炸力学; 动力响应; LS-DYNA; 配筋砌体墙

中图分类号: O383.2; TU365

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

随着混凝土砌块配筋砌体剪力墙结构的应用, 墙体平面内的受力问题受到了广泛关注。现行规范中对砌体结构平面内受力状态计算做了详细说明, 在实际工程中一般只考虑砌体的平面内受力性能。砌体还可能承受如强风、洪水、爆炸冲击以及山体滑坡等引起的平面外荷载^[1-2]。配筋砌块墙体中的竖向钢筋只能一孔一筋放置在芯柱里, 导致竖向钢筋参与平面外抗弯的能力较差。配筋砌块墙体在平面外爆炸冲击荷载作用下的承载与变形能力的改善和竖向钢筋对承载力的贡献以及高跨比、砌体材料强度、墙体开洞、粘贴玻璃纤维复合材料等因素对墙体承载力和变形的影响是亟待研究的问题。

随着有限元技术的飞速发展, 运用计算机进行数值模拟已经成为重要的研究手段, 越来越广泛地应用于常规爆炸领域。本文中, 通过数值模拟分析并预测配筋砌体墙的受力变形和破坏情况, 为配筋砌体墙的抗爆减爆设计提供理论参考。

1 数值模拟基础

采用 LS-DYNA 流固耦合算法描述爆炸过程。对炸药及其他流体材料(如空气、水)采用 Euler 方法, 对其他的固体结构采用 Lagrange 方法, 然后通过流固耦合方式处理相互作用。计算中炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOS-IVE_BURN 材料模型^[2]和 JWL 状态方程, 空气采用 MAT_NULL 材料模型和线性多项式状态方程 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL, 混凝土地面采用 HJC 模型, 配筋砌体墙采用分离式, 砌体和钢筋分别建模, 钢筋采用的材料模型为 MAT_PLASTIC_KINEMAT-IC^[3]。而砌体的材料模型为 * MAT_BRITT-LE_DAMAGE^[3]。在 LS-DYNA 中, 根据关键字 * MAT_ADD_EROSION 定义的破坏准则判断单元是否失效, 如果失效, 则在有限元计算模型中删除该单元。当一个节点所有关联的单元全部失效后, 该节点在有限元计算模型中被删除。砌体砌块失效主要考虑主压应变和主拉应力失效; 钢筋采用等效应力和剪应变两项失效准则; 纤维布复合材料主要采用主拉应力失效。采用 ALE 算法, 计算时间为 0.02 s, 计算过程中每 0.2 ms 输出一次计算结果。

2 无阻碍场冲击波峰值超压

炸药爆炸时, 确定爆炸参数(超压峰值等)的公式都是根据相似理论(爆炸相似律)建立的, 公式中的

* 收稿日期: 2011-08-19; 修回日期: 2012-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078116)

作者简介: 田玉滨(1972—), 男, 博士, 副教授。

待定系数由实验确定。对于炸药在空气中近地爆炸产生的峰值超压,国内外进行了大量的实验,获得许多经验回归公式,如贝克(Baker formula)公式^[4]

$$\Delta p_m = \begin{cases} \frac{2.006}{R} + \frac{0.194}{R^2} - \frac{0.004}{R^3} & 0.05 \leq \bar{R} < 0.5 \\ \frac{0.067}{R} + \frac{0.301}{R^2} + \frac{0.431}{R^3} & 0.5 \leq \bar{R} < 70.9 \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δp_m 为峰值超压,单位为 MPa; \bar{R} 为比例距离,单位为 $m/kg^{1/3}$ 。

在我国国防工程设计规范中规定的近地爆冲击波超压计算公式(Code formula)^[5]

$$\Delta p_m = \frac{1.06}{R} + \frac{4.3}{R^2} + \frac{14}{R^3} \quad H/\sqrt[3]{W} \leq 0.35, 1 \leq \bar{R} \leq 10 \quad (2)$$

式中: Δp_m 为峰值超压,单位为 $10^5 Pa$; \bar{R} 为比例距离,单位为 $m/kg^{1/3}$, H 为距爆心距离, W 装药量。

《防护结构计算原理与设计》中的公式(Defence formula)^[6]

$$\Delta p_m = 9.15 + 489 \exp[-(\bar{R} + 2.25)^2/20] \quad 2 \leq \bar{R} < 10 \quad (3)$$

式中: Δp_m 为峰值超压,单位为 kPa; \bar{R} 为比例距离,单位为 $m/kg^{1/3}$ 。

为了核实数值模拟计算结果的可靠性,图 1 给出了混凝土地面爆炸的数值模拟结果与上述 3 个经验公式的计算结果的比较。由图中可以看出,数值模拟结果与经验公式的计算结果在远区基本一致,而在爆炸点附近,计算值稍有不同,这是由于在数值模拟中假设空气为理想状态,误差基本上不超过 10%,因此可以认为数值模拟结果与经验公式基本吻合。

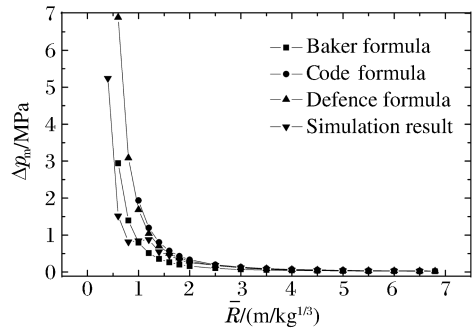


图 1 数值模拟的峰值超压与经验公式计算结果的比较
Fig. 1 Simulated peak overpressures compared with those by formulas

3 配筋砌墙体在爆炸荷载下的冲击响应

3.1 支座约束的影响

在爆炸冲击荷载作用下,配筋砌块墙体的位移以水平向为主。随着顶部约束由固支变为简支再变为自由,对墙体的约束减弱,最大变形位移增大。3 种约束的墙体在支承处的砌体承受的最大拉应力值都达到砌体材料的抗拉强度极限,砌体材料碎裂,在表 1 中, D_{max} 为墙体最大位移, $\sigma_{s,max}$ 为钢筋最大拉应力, $\sigma_{mt,max}$ 为砌体最大拉应力, $\sigma_{ms,max}$ 为砌体最大压应力。由于墙体背爆面的砌体受拉,墙体将会迅速破坏,所以墙体所受拉应力大都由纵向钢筋承担,钢筋处于弹性阶段,不管墙体顶部是自由、简支还是固定,砌体的最大压应力都小于其极限压应力,所以墙体砌体单元基本上都因为抗拉强度不足而被拉坏。

表 1 爆炸荷载下受不同约束的墙体的动力响应

Table 1 Dynamic response of walls confined by different cases to explosion load

约束情况	D_{max}/mm	$\sigma_{s,max}/MPa$	$\sigma_{mt,max}/MPa$	$\sigma_{ms,max}/MPa$
顶部自由	4.28	42.63	2.422	6.36
顶部简支	1.76	50.78	2.424	5.21
顶部固支	1.37	46.97	2.423	7.35

3.2 砌体材料强度的影响

随着砌体强度的增大,墙体爆心点和墙体的最大位移响应明显减小,这说明墙体的变形位移受墙体材料强度影响较大,相关对比结果如图 2 所示, D_c 为爆心在墙上投影点位移,图中 3 条曲线分别代表 3 种不同的砌体强度等级,曲线 1、2、3 所表示的强度等级依次增大。图中可以看出,随着砌体强度的增大,砌体的最大拉应力和纵向钢筋的轴向拉应力都增大,砌体最大压应力减小。墙体变形越大,砌体最

大压应力越大。由于在弹性范围内变形,当爆炸荷载减弱时,墙体能够回到原来的状态。但回弹的过程受冲击波的反射、折射及绕流的影响,所以出现凸出段。由于纵向钢筋位于墙体的中心,抗弯距离很小,所以配筋率的增加,配筋砌体墙对抗横向爆炸冲击荷载的作用不大,但对钢筋的受力有明显的改善。

3.3 配筋率的影响

表 2 所示为三种竖向配筋率不同的墙体强度的对比,其中 ρ_V 为配筋率。

表 2 竖向配筋率不同的墙体的强度

Table 2 Strengths of walls with different vertical reinforcement ratios

$\rho_V / \%$	D_{\max} / mm	$\sigma_{s, \max} / \text{MPa}$	$\sigma_{\text{mt}, \max} / \text{MPa}$	$\sigma_{\text{ms}, \max} / \text{MPa}$
0.298	1.38	79.86	2.424	6.37
0.530	1.41	63.74	2.422	7.86
0.827	1.37	46.97	2.423	7.35

3.4 墙体高宽比的影响

墙体的高度一定,随着墙体长度的增大,高宽比减小,两端简支对墙体的约束力减弱,抗弯刚度相应增大,这样就有一个引起墙体位移最小的高宽比。从图 3 可以看出,在高宽比为 0.52 时,虽然墙体高宽比小,但其刚度大,所以它的爆心投影点位移反而比高宽比为 0.58 时的小,所以并不是高宽比越小,墙体变形位移越大。在高宽比为 0.47、0.52、0.58 时,配筋砌体墙最大主拉应力都到达其极限抗拉强度,砌体被拉坏,砌体的压应力随高跨比增加而减小,而纵向钢筋轴向最大拉应力变化不明显,钢筋应力值远小于动态抗拉强度 402 MPa,均处于弹性阶段,对比结果如图 3 所示。

3.5 爆炸峰值超压的影响

随着峰值超压的增大,墙体的位移响应,砌体拉压应力和纵向钢筋的应力响应均明显增大,如表 3 所示。从图表中可以看出当荷载峰值为 3.8 MPa 时,各响应幅值变化是明显的。

表 3 峰值超压对墙体、砌体和纵向钢筋的影响

Table 3 Effects of peak overpressure on wall, masonry and vertical reinforcement

$\Delta p_m / \text{MPa}$	D_{\max} / mm	$\sigma_{s, \max} / \text{MPa}$	$\sigma_{\text{mt}, \max} / \text{MPa}$	$\sigma_{\text{ms}, \max} / \text{MPa}$
0.6	0.30	0.747	1.460	1.466
3.8	1.37	46.970	2.423	7.350

3.6 墙体距爆心的距离的影响

根据文献[6],当相对距离小于 1.5 m 时,冲击波的超压峰值幅值变化很大,这段距离属于结构响应最不利距离,当墙体距爆心 0.5 m 时,其相对距离为 1 m,所以结构各项响应都很大,结构迅速破坏;而当相对距离大于 2.5 m 时,冲击波的超压峰值幅值变化平缓,结构响应也比较平缓,不会产生结构的瞬间破坏,相关对比结果如表 4 所示,其中 D_c 为爆心在墙上投影点位移。

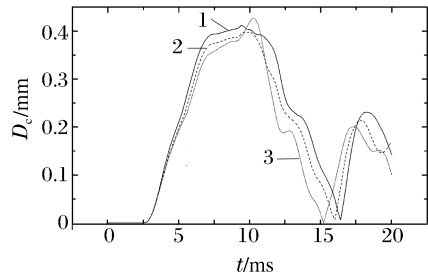


图 2 针对 3 种强度不同的墙体的 D_c-t 曲线

Fig. 2 D_c-t curves for three walls with different strengths

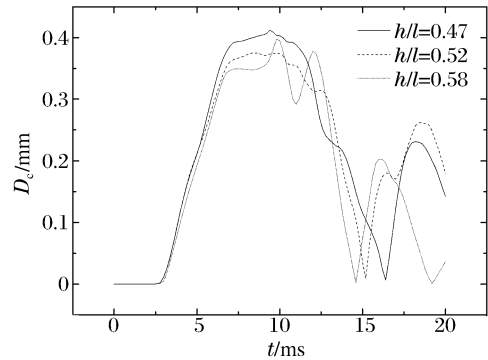


图 3 针对 3 种高宽比不同的墙体的 D_c-t 曲线

Fig. 3 D_c-t curves for three walls with different height-width ratios

表 4 爆心距对墙体、砌体和纵向钢筋的影响

Table 4 Effects of distance from explosion center to wall on wall, masonry and vertical reinforcement

D_c /mm	D_{max} /mm	$\sigma_{s,max}$ /MPa	$\sigma_{mt,max}$ /MPa	$\sigma_{ms,max}$ /MPa
500	28.36	64.47	2.424	17.77
2 000	1.37	46.97	2.423	7.35

3.7 墙体开洞的影响

在爆炸冲击波荷载作用下,中间开洞的墙体的各项结构响应都比中间有窗间墙的小,但是有窗间墙的墙体各项结构最大响应都出现在窗间墙上,这主要是由于窗间墙迎着爆心点,而两边有洞口,很容易在这产生结构最大反应。从最后的衰减曲线来看,洞口往两侧偏移,更利用卸压,这是因为冲击波的反射、折射及绕流在靠近墙的两侧形成峰值,如图 4 所示。

3.8 粘贴纤维布的影响

在炸药量和爆心距等相同条件下,配筋砌体墙的砌块大块脱落,钢筋裸露,钢筋变形明显;纤维布加固配筋砌体墙基本上保持墙体原型,只有部分砌块因拉应力过大而破坏,墙体还能保持其承载能力。由于纤维布包裹在墙体外面,可以限制拉区砌体材料的剥落,且能很好地控制配筋砌体墙的脆性破坏变形,提高墙体的延性,如图 5 所示。

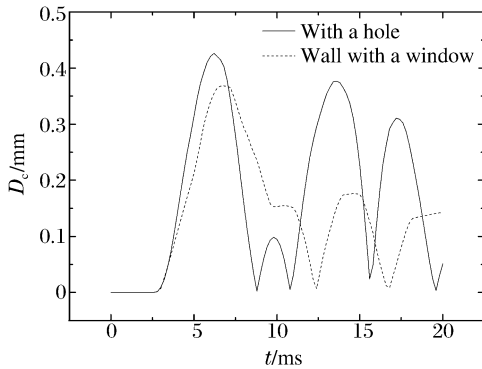


图 4 针对开洞和不开洞墙的 D_c-t 曲线

Fig. 4 D_c-t curves for walls with and without a hole

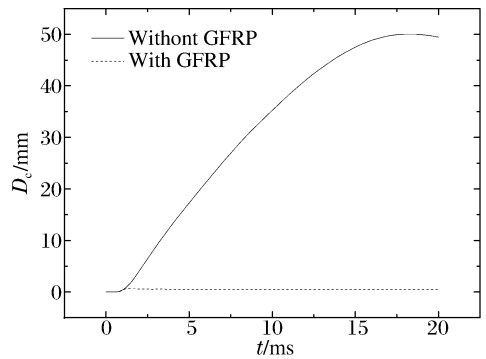


图 5 针对粘纤维布和不粘纤维布墙的 D_c-t 曲线

Fig. 5 D_c-t curves for walls with and without GFRP

4 结 论

通过爆炸冲击荷载作用下配筋砌体防爆墙的非线性动力响应研究,可以得出如下结论:

防爆墙材料强度、高宽比、墙体开洞、荷载峰值、墙体距爆心点的距离及墙体约束情况是影响防爆墙动力响应的重要因素,而墙体的配筋率是影响墙体的动力响应的次要因素。

为了提高配筋砌体防爆墙的防爆能力,应尽量提高墙体材料的强度,选择合理的高宽比,增加墙体的约束,墙体离爆心点距离尽可能在冲击波峰值幅值变化平缓区段内。墙体开洞偏移能更好地卸掉爆炸冲击荷载,从而降低荷载峰值和作用时间。在结构防爆设计中尽可能使卸爆洞口偏向于墙体两侧。墙体粘贴玻璃纤维布能大幅度提高承受的爆炸冲击荷载,由于纤维布包裹在墙体外面,可以限制拉区砌体材料的剥落,且能很好地控制配筋砌体墙的脆性破坏变形,限制结构的位移,提高结构的延性。

参考文献:

[1] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005:5-28.
 [2] 丁阳,汪明,李忠献,等. 利用等效砌体材料模型分析爆炸荷载作用下砌体墙碎片尺寸分布[J]. 工程力学,1999,27(7):186-191.
 DING Yang, WANG Ming, LI Zhong-xian, et al. Analysis of fragment size distribution of masonry wall under blast loads using homogenized masonry material[J]. Engineering Mechanics, 1999, 27(7): 186-191.

- [3] LS-DYNA keyword user's manual[M]. Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [4] 顾文彬,孔劲松,吴腾芳,等. 环状分布装药容器中爆炸载荷研究[J]. 爆破器材,1999,28(5):19-22.
GU Wen-bin, KONG Jin-song, WU Teng-fang, et al. Study of the loop charge explosion load in a vessel[J]. Explosive Materials, 1999,28(5):19-22.
- [5] 李翼祺,马素贞. 爆炸力学[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [6] 李朝. 基于 ANSYS/LS-DYNA 软件的配筋砌块墙体爆炸数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

Dynamic response of reinforced masonry structure under blast load^{*}

TIAN Yu-bin, LI Zhao, ZHANG Chun-wei

(*School of Civil and Engineering, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150090, Heilongjiang, China*)

Abstract: Based on the numerical analysis with LS-DYNA, the deformation and damage of the reinforced masonry walls were investigated by considering the following factors: wall-borne constraint, masonry material strength grade, vertical reinforcement ratio, height-to-span ratio, load peak, distance from explosive center to wall, a hole in the wall and GFRP on the wall. And the distance-time curves of the walls were obtained as well as the stress-time curves of the masonry materials and steel bars. Meanwhile, the anti-explosion performances of the reinforced masonry walls were compared in the different cases and the important factors influencing the structure response were determined. It is helpful for the anti-explosion design about the reinforced masonry structure.

Key words: mechanics of explosion; dynamic response; LS-DYNA; reinforced masonry wall

* Received 19 August 2011; Revised 11 February 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51078116)

Corresponding author: TIAN Yu-bin, tianyubin@hit.edu.cn

(责任编辑 王易难)