文章编号：1001-1455(2014)01-0059-08

砌体填充墙的抗爆性能*

范俊余，方 秦，陈 力，张亚栋
（解放军理工大学国防工程学院，江苏 南京 210007）

摘要：为了揭示砌体填充墙的抗爆破坏机理，在野外实验中，测得了爆炸条件下砌体填充墙上的爆炸荷载及位移，得到了墙的抗爆性能、破坏模式以及碎片的飞散和分布情况。实验结果表明，墙体的破坏模式与荷载的大小有关，其破坏主要由灰缝的破坏引起。结合实验现象，采用分离式建模的精细化数值模拟方法，得到了不同荷载条件下裂缝的发展过程、墙体的边界条件对墙体的破坏模式的影响，确定了墙体不同破坏等级时的药量，进一步说明本文中数值模拟方法的合理性。

关键词：爆炸力学；破坏机理；野外实验；砌体填充墙；抗爆；碎片
中图分类号：O383.2；TU362 **国标学科代码**：1303520 **文献标志码**：A

砌体填充墙被广泛地应用于建筑物的外墙或钢筋混凝土框架内。但是，由于它抗爆能力弱，容易受到爆炸荷载的破坏，且墙体的破坏与否对主体结构承受的爆炸荷载有一定影响[1]，因此，填充墙的抗爆性能及其加固技术成为工程结构抗爆研究的重要方向。

近年来，随着恐怖活动的增多，为此开展了许多研究，如：S. T. Dennis 等[2]、S. C. Woodson 等[3]进行了一系列比例为 1/4 的单向混凝土砌体墙的抗爆实验；C. D. Eamon 等[4]、D. L. Thornburg[5]和 J. S. Davidson 等[6]进行了多次全尺寸的混凝土单向砌体墙抗爆实验；K. Martin[7]采用有限元分析方法研究了单向未加固砌体墙在面外静荷载作用下的失效模式；M. Wang 等[8]运用有限元程序 AUTODYN 分别计算了实心砖墙和空心砖墙在外爆炸荷载作用下的破坏情况。

本文中，先开展砌体填充墙的野外抗爆实验，测得作用在墙上的爆炸荷载，观测墙体的破坏形态与特征以及碎块的飞散和分布情况等，然后利用 LS-DYNA 有限元软件，对爆炸荷载作用下砌体填充墙实验模型的响应及损伤破坏进行详细分析与讨论。

1 实 验

砌体填充墙抗爆实验在野外进行，模型采用浇注框架填充墙，炸药在一定距离处爆炸，测量不同装药量条件下墙体上的荷载及墙体变形和破坏情况。模型的平面布置如图 1 所示，该单层封闭框架模型为 8×1 跨，层高 1.5 m，在梁柱围成的框架处前面及两侧用砖墙填充，以面向模型中心的墙体为实验墙，两侧的砌体填充墙防止爆炸波绕射后对实验墙背面的影响。炸药在模型中心起爆，实验模型如图 2 所示。

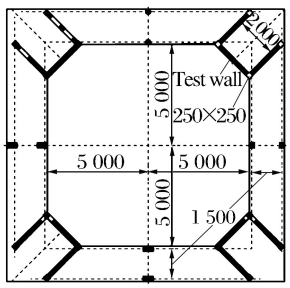


图 1 实验模型平面布置

Fig. 1 Position sketch of the experimental model

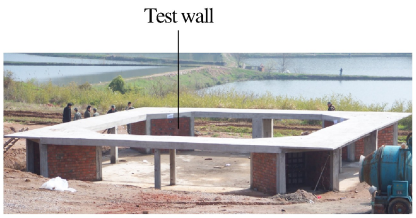


图 2 实验模型

Fig. 2 Photo of the experimental model

* **收稿日期**：2012-08-20；**修回日期**：2013-01-27
基金项目：国家自然科学基金项目(51208509，51021001，51008306)；
国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB026204)
作者简介：范俊余(1978—)，女，博士，讲师。

1.1 模型制作

按设计图纸进行现场施工制作，实验模型的基础、梁、板、柱整体浇注。砌体填充墙在模型建成进行填充砌筑，墙的尺寸为 2.00 m×1.50 m×0.19 m。砖采用 P 型粘土空心砖，尺寸为 90 mm×90 mm×190 mm，强度等级为 MU15，砌砖上下错缝，灰缝宽度为(10±2) mm，砌墙砂浆采用 M7.5 水泥混合砂浆，墙体与柱子间配拉结筋，2 根∅6 mm 沿柱高隔 500 mm 布置，拉筋伸入墙内 500 mm，如图 3 所示。



图 3 实验模型的施工

Fig. 3 Construction of the experimental model

1.2 实验测量

测试内容包括墙面的压力、墙体的变形及砖墙破坏后的飞散情况。墙上的压力测点布置如图 4 所示，共 8 个测点，所有的压力传感器均设置在铁管里，铁管通过预埋砌筑在墙中。墙体的变形测点布置在墙背面，共 4 个测点，如图 5 所示，位移计固定在钢板上，钢板锚固在两侧墙、顶板和地面上。

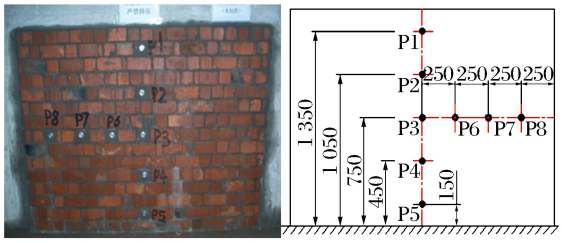


图 4 压力测点布置

Fig. 4 Distribution of pressure gauges

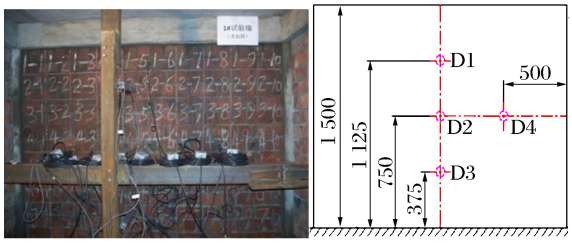


图 5 位移测点布置

Fig. 5 Distribution of displacement gauges

1.3 装药量

炸药安放在模型中心地面上，装药为裸装 TNT 集团装药，通过装药量变化实现不同比例距离上的爆炸，各炮次的装药量和比例距离见表 1。

表 1 装药量

Table 1 Explosive quantities

No.	Q/kg	Z/(m·kg$^{-1/3}$)	No.	Q/kg	Z/(m·kg$^{-1/3}$)
1	0.2	10.00	7	4.8	3.38
2	3.9	3.72	8	4.8	3.48
3	3.9	3.72	9	4.8	3.48
4	8.6	2.87	10	10.7	2.66
5	34.2	1.81	11	21.2	2.12
6	4.8	3.48	12	30.0	1.89

2 实验结果分析

2.1 墙上荷载

第 1 炮为试炮，测得的墙上压力曲线如图 6(a)所示，与 TNT 在空气中爆炸的经验曲线形状相同。第 2 炮后墙体没有破坏，也没有发生明显变形，图 6(b)是测得的经过滤波后的墙上压力曲线。从图 6 可以看出，冲击波先到达墙底部 P5，最后到达顶部 P1。

表 2～3 为第 1、2 炮各测点的冲击波的峰值压力、冲量。从表 2～3 可以看出，墙上的压力峰值和冲量都从墙底部到顶部、从中间到两边衰减。将实验结果与 TM5-855-1[9] 计算结果进行比较，其中计算中假设墙体为刚体。可以看出，实验测得的各测点的压力峰值、冲量与计算结果相差不大，证实实验结果是可靠的。

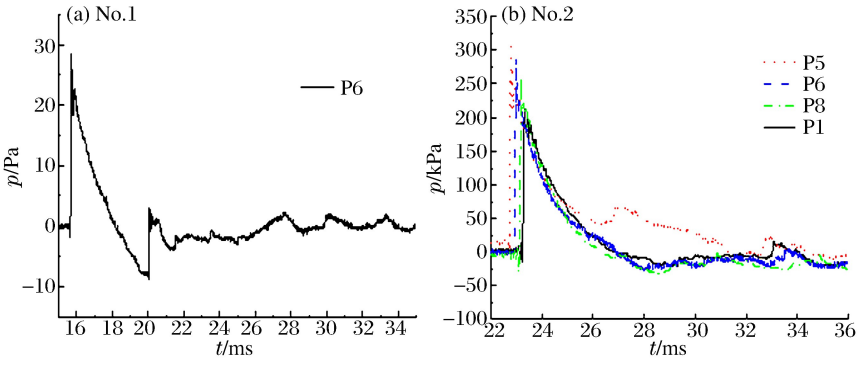


图 6　墙上测点的压力曲线

Fig. 6　Overpressure curves at gauge points

表 2　第 1 炮各测点的压力峰值和冲量

Table 2　The peak pressures and impulses of No. 1

测点	p_m/Pa		I/(MPa·ms)	
	实验	计算	实验	计算
P1	28.02	29.9	34.757	33.25
P2	28.80	30.3	42.193	33.75
P3	29.40	30.6	43.726	34.14
P4	30.00	31.0	45.560	34.40
P5	—	31.2	—	34.53
P6	29.41	30.6	45.706	34.09
P7	28.21	30.5	36.857	34.18
P8	29.73	30.3	39.543	33.74

表 3　第 2 炮各测点的压力峰值和冲量

Table 3　The peak pressures and impulses of No. 2

测点	p_m/kPa		I/(MPa·ms)	
	实验	计算	实验	计算
P1	181.5	181	256.0	259.8
P2	—	185	—	271.8
P3	181.0	189	264.1	275.6
P4	—	191	—	278.2
P5	240.0	192	306.5	279.6
P6	231.0	188	303.4	275.2
P7	202.0	187	277.7	273.9
P8	218.5	185	235.4	271.9

2.2　墙的破坏

2.2.1　第 5 炮

图 7 是第 5 炮墙的破坏情况，墙的变形明显，迎爆面砖块表面发生剥落，墙顶部与梁交界处全线透光，这是因为实验墙是在框架浇注完后砌的，墙顶部与梁交接处的砂浆是填塞进去的，可能导致墙体顶部强度降低，墙体的顶部破坏严重。墙体中上部砖块与砂浆分离发生内凹，破坏模式类似于弯曲破坏，右侧墙体整体内移 2.5 cm。墙体背面裂缝明显，可以看到自上而下的裂缝，裂缝以墙中心上下八字展开，主要出现在砂浆处，可见裂缝主要是由砂浆层的破坏引起的。从测点位移曲线（见图 7(c)）可以看出，最大位移发生在 D2，即最大变形发生在墙体的中部，最大位移为 88 mm，永久变形达到 60 mm，其余 3 点的永久变形在 30 mm 左右。

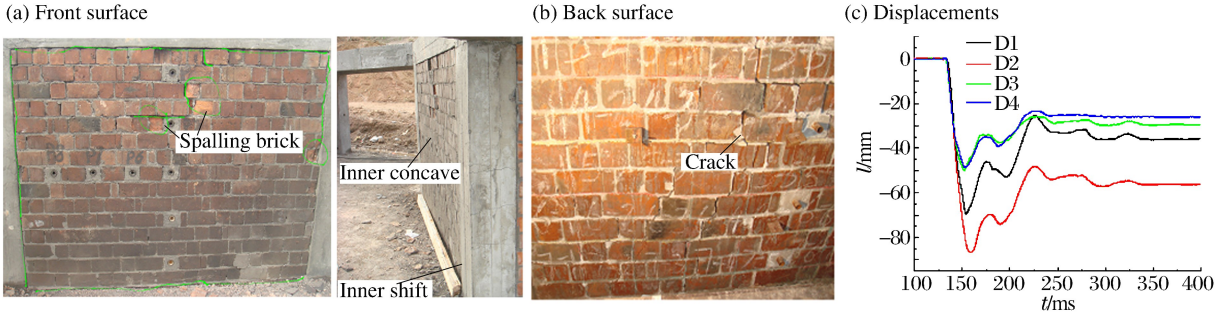


图 7　第 5 炮后实验墙的破坏形态

Fig. 7　Failure form of the test wall for No. 5

2.2.2 第 11 炮

图 8 是第 11 炮墙的破坏情况，墙体破坏严重，墙体中部内凹，且在墙体上半部分出现 30 cm×30cm 的孔洞，右上部分与柱子连接的边界处出现孔洞，拉结筋暴露。迎爆面的砖块有较多剥落散，这是由爆炸冲击作用下墙体迎爆面砖块的局部被压碎引起的。由图 8(b)可以看出，墙体背面砖块飞散和震塌现象严重，抛射出的碎块以整块砖为主，有约 15 块，进一步表明墙的破坏主要是由砖与砖之间的砂浆层的破坏引起的。

2.2.3 第 12 炮

图 9 是第 12 炮墙的破坏情况，墙体几乎全部破坏，墙体迎爆面的地面上有少量砖碎片，墙背面碎片很多，且抛射距离很远，最远距离达到 34.2 m。墙体右侧与柱之间的拉结筋暴露在外，墙体左侧与柱子连接处发生松动。墙体施工工艺、边界条件以及重力的共同作用，使墙体上部分破坏严重。

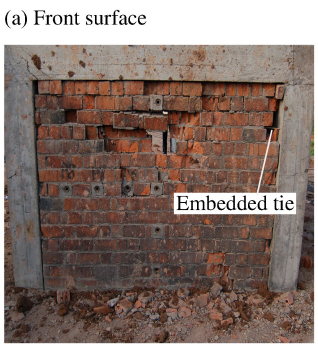




图 8 第 11 炮后实验墙的破坏形态

Fig. 8 Failure form of the test wall for No. 11





图 9 第 12 炮后实验墙的破坏形态

Fig. 9 Failure form of the test wall for No. 12

2.3 碎片分布

图 10 为在不同药量作用下墙破坏后碎片的分布情况，墙体的破坏形态与荷载的大小有关，当药量较小时(见图 10(a))，砖墙未形成孔洞，仅背面有砖块震塌，随着药量的增加，墙体的破坏程度逐渐增大，产生的碎片逐渐增多，碎片的飞散距离也逐渐增远(见图 10(b)～(d))，随着炮次的增多，碎片数量增多，飞散距离增远。实际上，碎片的实际抛射距离跟落地后的反弹有关，碎片与地面的冲撞问题非常复杂，受各种不确定因素影响，如地面刚度、平整度等。这里仅对实验得到的图片做分析。









图 10 碎片的分布情况

Fig. 10 Distribution of the fragment

3 数值模拟

在野外实验分析的基础上，利用 LS-DYNA 有限元软件，建立精细化的有限元分析模型，模拟填充墙在爆炸荷载作用下的响应和损伤破坏，进一步分析砌体填充墙的抗爆特性、破坏形态和影响因素。

3.1　材料模型及参数的确定

在实验室对采用的砖和砂浆进行抗压测试，得到砖的抗压强度为 15.7 MPa，砌墙砂浆的抗压强度为 7.2 MPa。材料模型、参数以及墙的破坏准则、材料的失效准则见文献[10]。

3.2　有限元模型的建立和验证

3.2.1　精细化有限元模型的建立

采用 LS-DYNA 有限元软件进行建模，模型尺寸与实验墙尺寸相同，将砖和砂浆分别采用不同的材料建立，根据对称性取一半，如图 11(a)所示。砖和砂浆均采用 8 节点 6 面体实体单元，其中砖的单元尺寸为 0.025 m，砂浆单元尺寸为 0.005 m，拉筋采用 Beam 单元，单元尺寸为 0.025 m，砖、砂浆和钢筋之间均采用共节点，整个有限元模型共有节点 1 024 982 个，划分实体单元 529 614 个，梁单元 1 132 个，有限元网格图见图 11(b)～(c)所示。实验中 TNT 炸药离砖墙距离为 5.871 m，通过改变药量实现比例距离的变化。

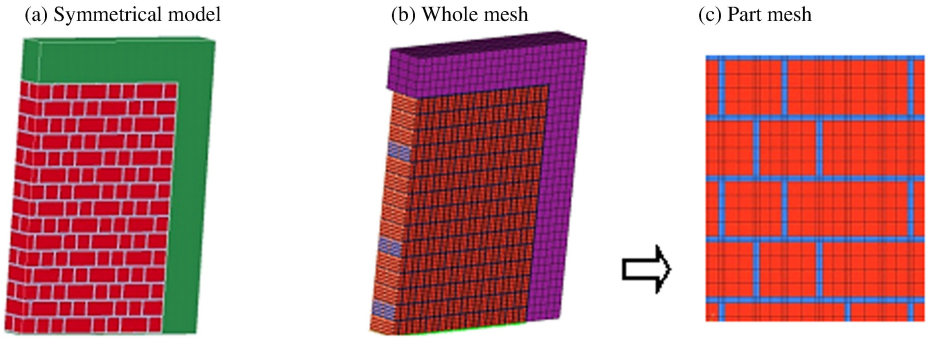


图 11　有限元模型及网格划分

Fig. 11　Finite element model

3.2.2　特征点的动力响应

根据以上分析，实验中炸药爆炸作用在墙上的荷载与 TM5-855-1 计算结果较好吻合，因此采用 LS-DYNA 中 * LOAD_BLAST 关键字加载方法，用 CONWEP 爆炸加载[9]模拟实验中炸药的爆炸情况。第 3 炮后，墙正面顶部与梁连接处有细微裂缝，图 12 是各测点位移曲线的数值模拟结果和实验结果的对比，墙的最大位移发生在 D1，实验测得的最大位移为 4.39 mm，永久变形为 2.23 mm，数值模拟的最大位移为 5.09 mm，永久位移为 1.3 m，两者结果基本一致。这表明，采用 * LOAD_BLAST 关键字模拟墙上爆炸荷载的方法，既能满足计算精度的要求，也可以大大提高计算效率，所以本文的数值模拟方法切实可行。

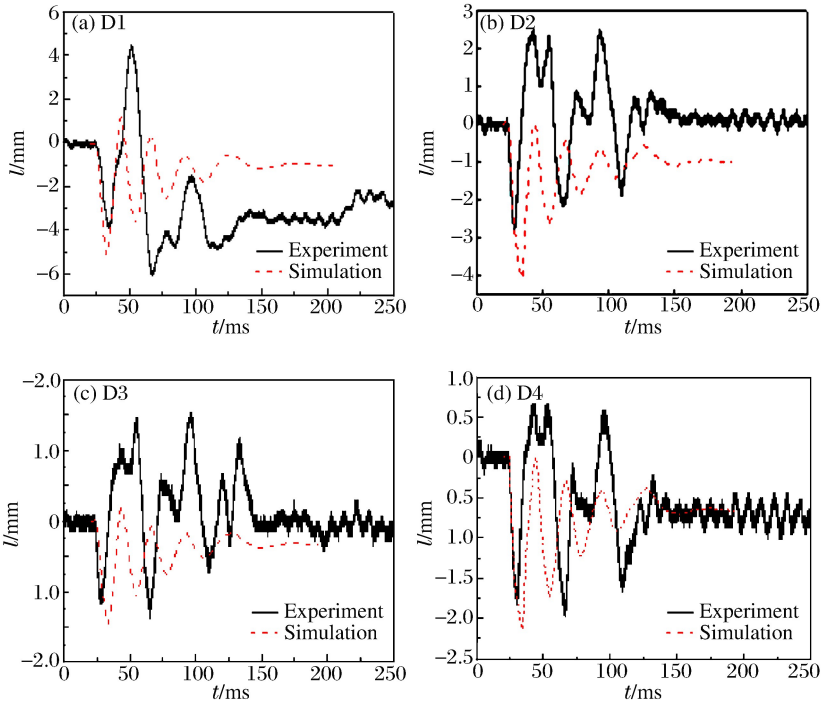


图 12　第 3 炮各测点的位移曲线

Fig. 12　Displacement curves at gauge points for No. 3

3.3 边界条件的影响

实验墙的左右两侧与柱子之间设置拉结筋，通过数值模拟，对比有无拉结筋时墙体的破坏模式的差异，如图 13 所示。墙体两侧有拉结筋时，墙体的破坏主要集中在墙体的中部(见图 13(a))。无拉结筋的墙体破坏模式有些类似于整体弯曲破坏(见图 13(b))。有拉筋的墙体破坏区域比无拉结筋的墙体破坏区域小，所以拉筋的存在可以增强墙的抗爆能力，减少碎片的产生。

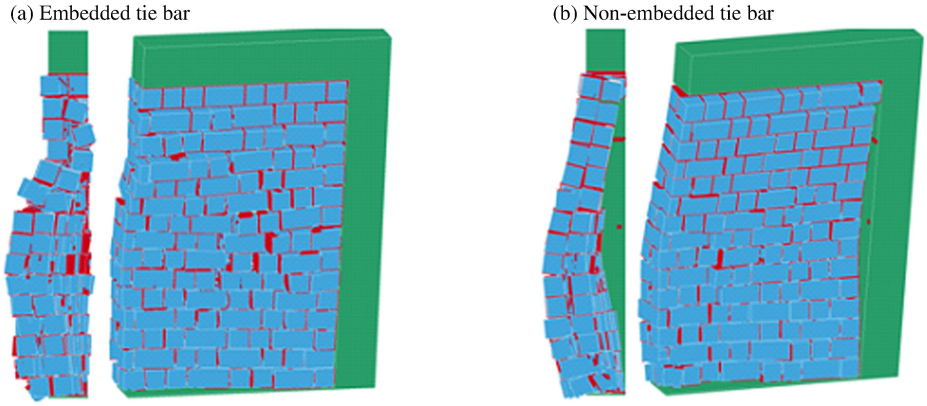


图 13 Q=3.9 kg 时墙的损伤破坏

Fig. 13 Damage of the wall for Q=3.9 kg

3.4 砌体填充墙破坏等级划分

实验时对同一面墙体进行了多次爆炸作用，有损伤累积效应，很难判别墙体的破坏形态在什么药量下产生。结合实验结果，根据文献[10]中墙体的破坏等级划分，确定不同等级实验墙的破坏药量。

通过数值模拟得出，当药量 Q<15 kg 时，墙的破坏程度为轻微破坏，墙体仅出现细微裂缝；当15 kg <Q<40 kg 时，墙体发生中度破坏，图 14 为 Q=37 kg 时墙的破坏情况，由于墙体顶部与梁之间无拉结筋，墙体会先在顶端与梁交界处出现较大横向裂缝，再沿灰缝产生竖向不规则的裂缝，墙体变形明显，在墙体变形过程中的等效塑形应变分布图(见图 14(a))中，红色区域为变形和裂缝较集中的地方，在裂缝分布图(见图 14(b))中，灰缝不连续部分为产生的裂缝。与对应的实验破坏情况(见图 8)比较，数值模拟所得墙体的破坏形态与实验现象较好吻合。

数值模拟中，当 40 kg<Q<50 kg 时，墙体发生严重破坏，墙体发生多处不规则裂缝，外界不大的扰动也有可能导致墙体的倒塌，如图 15(a)中红色部分为裂缝。冲击波作用于墙上，墙体中部弯矩最大，且墙的两侧有拉筋，因此墙体的破坏主要集中在墙的中部，灰缝截面由于剪切滑移发生破坏，使砖与砂浆分离，在冲击波和重力作用下，墙体背面部分产生砖块震塌。实验第 8 炮的墙体破坏如图 15(b)所示，数值模拟结果与实验结果完全吻合。

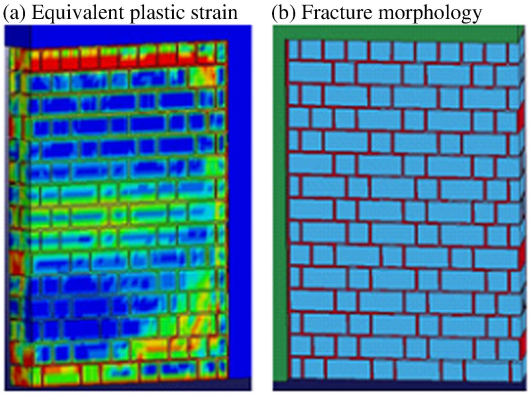


图 14 Q=37 kg 时墙的损伤破坏

Fig. 14 Damage of the wall for Q=37 kg

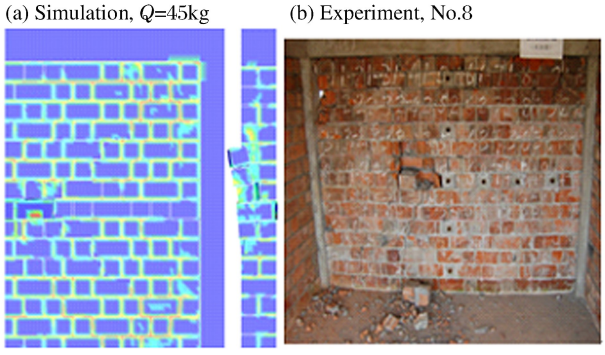


图 15 墙体的严重破坏

Fig. 15 Severe damage of the wall

当 $Q>50$ kg 时，墙发生飞散。图 16 为 $Q=58$ kg 时墙的破坏过程，墙体在爆炸荷载和重力联合作用下发生整体飞散破坏，墙体中上部先发生破坏飞散，背部砖块普遍震塌，随着墙体中上部砖块的飞散，墙体顶部的砖块也发生脱落和飞散，仅留下下部分和侧面部分墙体没有倒塌。实验的破坏（见图 9）中，墙的破坏范围很大，数值模拟结果基本如实反映了实验观测现象。

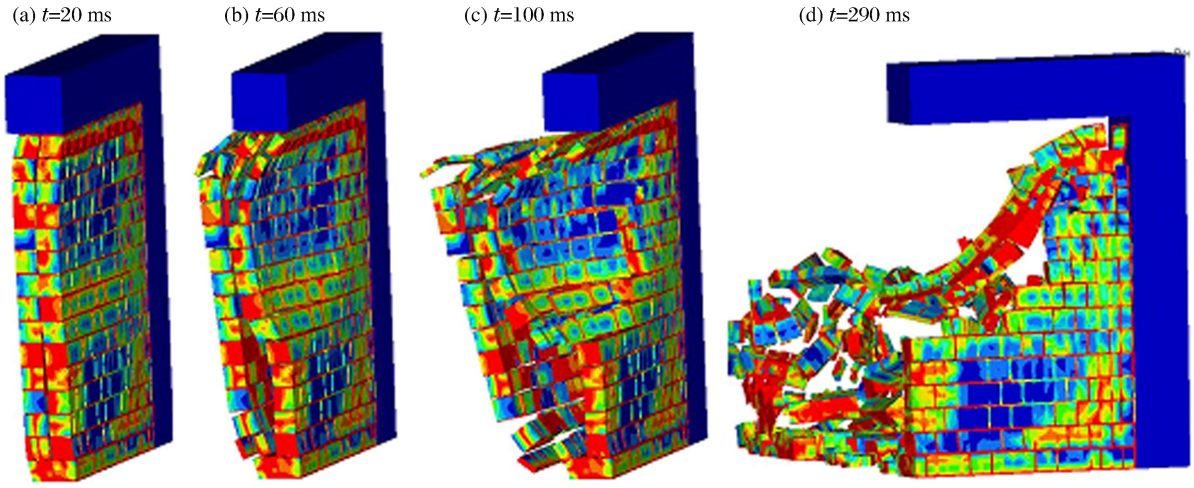


图 16　$Q=58$ kg 时墙的损伤破坏过程

Fig. 16　Destory process of the wall for $Q=58$ kg

本文中所确定不同破坏等级时的药量只是针对实验墙，如果墙体尺寸发生变化，针对不同的破坏等级所需的药量也会发生变化。

4　结　论

采用砌体填充墙抗爆的野外实验，并与数值模拟相结合，对填充墙的抗爆特性和破坏机制进行了研究，主要结论有：

（1）在外爆炸作用下，墙上各点的冲击波压力峰值、冲量按照从墙底部到顶部、从中间到两边衰减，实验结果与 TM5-855-1 计算结果较好吻合。

（2）在外爆炸作用下，墙体的裂缝不规则发展，主要由砂浆层的破坏引起，墙体的破坏先在背部发生震塌现象，随着药量逐渐增大，墙体发生飞散，产生的碎片数量逐渐增多，抛射距离也逐渐增远。

（3）墙体的边界条件对墙体的破坏模式影响很大，无拉结筋时墙体易发生整体弯曲破坏，拉筋的存在可以增强墙的抗爆能力，减少碎片的产生。

（4）通过数值模拟，确定了实验墙不同破坏程度的药量。当药量 $Q<15$ kg 时，墙体发生轻度破坏；当 15 kg$<Q<$40 kg 时，墙体发生中度破坏；当 40 kg$<Q<$50 kg 时，墙体发生严重破坏；当 $Q>50$ kg 时，墙体发生飞散。

参考文献：

[1]　张正威，宋二祥，陆新征，等. 核爆冲击波作用下空心砌块墙对主体结构的作用[J]. 工程力学，2008，25(5)：73-78.
Zhang Zheng-wei，Song Er-xiang，Lu Xin-zheng，et al. Effects of concrete masonry walls on structures under nuclear blast loadings[J]. Engineering Mechanics，2008，25(5)：73-78.

[2]　Dennis S T，Baylo J T，Woodson S C. Response of 1/4-scale concrete masonry unit (CMU) walls to blast[J]. Journal of Engineering Mechanics，2002，128(2)：134-142.

[3]　Woodson S C，Baylot J T. Quarter-scale building/column experiments[C]// Elgaaly M. Advanced technology in structural engineering. Philadelphia，Pennsylvania，USA，2000：1-8.

[4]　Eamon C D，Baylot J T. Modeling concrete masonry walls subjected to explosive loads[J]. Journal of Engineering

Mechanics, 2004,130(9):1098-1106.

[5] Thornburg D L. Evaluation of elastomeric polymers used for external reinforcement of masonry wall subjected to blast[D]. Alabama: University of Alabama, 2004.

[6] Davidson S J, Sudame S. Development of computational model and input sensitivity study of polymer reinforced concrete masonry walls subjected to blast[R]. Alabama: University of Alabama, 2004.

[7] Martini K. Finite element studies in the out-of-plane failure of unreinforced masonry[C]// Proceedings of the 7th International Conference on Computing in Civil and Build Engineering. 1997:179-184.

[8] Wang Ming, Hao Hong, Ding Yang, et al. Prediction of fragment size and ejection distance of masonry wall under blast load using homogenized masonry material properties[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(6): 808-820.

[9] Hyde D W. CONWEP, conventional weapons effects program: TM5-855-1[M]. Vicksburg: US Waterways Experiment Station, 1991.

[10] 范俊余,方秦,张亚栋,等.砖墙抗爆性能的数值模拟研究[J].防护工程,2011,33(5):35-40.
Fan Jun-yu, Fang Qin, Zhang Ya-dong, et al. Numerical simulation on the anti-blast properties of masonry walls [J]. Protective Engneering, 2011,33(5):35-40.

Anti-blast properties of masonry infill walls*

Fan Jun-yu, Fang Qin, Chen Li, Zhang Ya-dong

(*Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 210007, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: The field tests were conducted to investigate the failure mechanism of the masonry infill wall under blast loading. The blast loads and the displacements of the wall under shock waves were measured. And the failure modes of the wall were obtained as well as the ejection and distribution of the wall fragments. The experimental results indicate that the failure modes of the wall are dependent mainly on the amplitudes of the blast loads and the collapse of the wall is leaded by the failure of the cement linings. Based on the above tests, the separated numerical models were established by using LS-DYNA to simulate the dynamic response and the damage of the masonry infill wall under blast loading. And the spreads of the cracks in the wall under different blast loads were obtained and the charge weights corresponding to the different failure modes were confirmed. The numerical results agree quite well with the test data. The boundary conditions can obviously affect the failure modes of the wall.

Key words: mechanics of explosion; failure mechanism; field test; masonry infill wall; anti-blast; fragments

---

* Received 20 August 2012; Revised 27 January 2013

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51208509,51021001,51008306); the National Basic Research Program of China (973 Program) (2012CB026204)

Corresponding author: Fan Jun-yu, fjy7361@sina.com

(责任编辑 丁 峰)