DOI: 10.11883/1001-1455(2015)04-0459-08

爆炸冲击震动对砖墙破坏作用的数值模拟*

李利莎,杜建国,张洪海,谢清粮
(总参工程兵科研三所,河南 洛阳 471023)

摘要:砖墙在爆炸冲击震动作用下的动力反应非常复杂,本构关系很难精确建立。本文阐述了砖墙几种常用的有限元模拟方法,分析各种方法的优缺点,确定采用一种砖块和砂浆分开的精细化建模的三维砖墙有限元模型;通过 LS-DYNA 软件,得到砖墙在水平爆炸冲击震动荷载下的破坏过程,计算结果与实验现象很好。研究表明:该种分析模型综合考虑了砖块和砂浆之间复杂的相互作用,并且对砂浆层进行了单独建模,保证了砖墙在数值模拟上的真实性和正确性,因此可以准确地模拟出实验中砖块之间砂浆层的损伤积累破坏。

关键词:爆炸力学;爆炸冲击震动;分离式共节点模型;LS-DYNA;数值模拟;砖墙
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

在触地核爆或地下封闭核爆作用下,即使防护工程主体结构完好,但爆炸所产生的地冲击震动仍然十分强烈,能够引起防护工程内部的砖隔墙倒塌及仪器设备等的损坏;另外,爆破施工引起的地震效应,通常也会引起砖墙的开裂、甚至倒塌,因此,有必要研究爆炸冲击震动对砖墙安全性的影响,从而为工程结构的爆炸震动防护设计提供参考。

砖墙是由砖块、砂浆 2 种不同材料构成的,由于砖块和砂浆的物理力学特性相差很大,使得砌体内部的应力状态非常复杂。另外,在爆炸冲击荷载下,其变形与破坏特征不仅表现出材料的非线性、大应变、大变形,还涉及接触非线性,这无疑增加了该问题数值模拟的复杂性和难度。国内外对于砖墙和砌体结构的研究主要集中在抗地震和抗爆炸空气冲击波领域[1-8],对于低速冲击和爆破地震动荷载下砖墙的响应及破坏机制,近年来逐步取得进展。S. Burnett 等[9]学者利用显式软件 LS-DYNA,通过一种简化的离散破裂有限元模型,分析了无配筋的砌块墙在低速冲击荷载下的破坏行为。魏海霞等[10]参照实际 2~4 层砌体房屋结构建立三维空间实体模型,然后在结构底部节点施加爆破地震波并进行相关的动力分析,通过定义结构的失效临界状态来寻求典型砌体结构房屋的爆破振动安全标准。上述研究中在砖墙的模拟方法上分别采用了分离式的接触面法和整体式模型法,这两种方法可有效地提高砌体模型的数值计算效率,但是都没有对砂浆层进行单独建模,而不能精确地显示出砂浆和砖之间的损伤积累破坏过程。

本文中基于砖墙抗爆炸冲击震动效应模型实验,建立一种将砖和砂浆分开的精细化建模的砖墙有限元分析模型,通过显式动力学软件 LS-DYNA,研究砖墙模型结构在水平向冲击震动作用下的破坏情况,并与实验结果进行对比验证。

1 砖墙的有限元模拟方法

目前,砖墙主要有 2 大类模拟方法。第 1 类是整体式模型,将其简化为一个整体来考虑,不考虑内部砂浆与砖块复杂的相互作用,按照同一种连续化材料类型来进行分析,见图 1(a)。第 2 类是分离式模型,即将砖块和砂浆作为独立的构成部分,考虑了二者之间的相互作用。在这种分离式模型中又可再分 2 种不同的模拟方法,一种是对砂浆不建模,将砂浆灰缝的厚度和质量折算到砖块上,通过砖块之间

* **收稿日期**:2013-12-17;**修回日期**:2014-03-22
基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAK01B01)
第一作者:李利莎(1979—),男,硕士,助理研究员,lls79@163.com。

的接触设置来模拟砂浆粘结作用。具体地讲，就是砖块之间的接触在初期是刚性连接，当接触面失效后，即释放砖块间接触面的节点约束，约束退化为面-面接触，并允许砖块之间滑动、分离或再次接触，简称为接触面法，见图 1(b)。接触面的失效准则为：

$$\left(\frac{F_{\mathrm{n}}}{F_{\mathrm{nf}}}\right)+\left(\frac{F_{\mathrm{s}}}{F_{\mathrm{sf}}}\right)\geqslant 1 \tag{1}$$

式中：F_{n}、F_{s} 分别为砖块接触面正应力(拉)和剪应力；F_{nf}、F_{sf} 分别为砖块接触面的允许正应力(拉)和剪应力。另外一种分离式方法是对砂浆建模，砖块和砂浆分别采用不同的材料模型，二者之间通过单元共节点来连接，设置材料的失效准则来模拟砖墙的破坏，简称为共节点法，见图 1(c)。

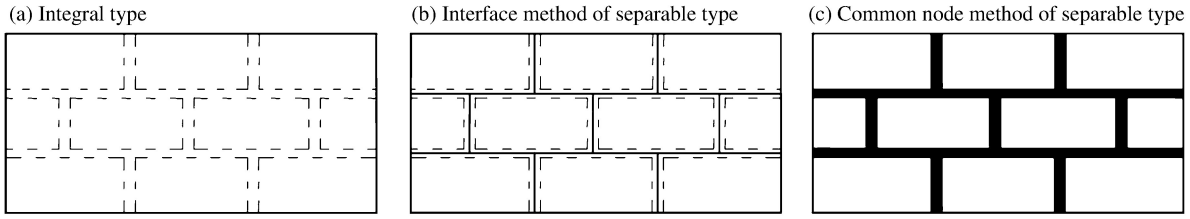

图 1 砖墙计算模型

Fig. 1 Computing model of the brick wall

综合分析以上 2 大类不同的模拟方法各有优缺，整体式模型建模方便，模型单元相对较少，缺点是不能准确模拟砖墙的各向异性，适用于比较大型房屋砌体结构的动力响应计算；分离式模型能够模拟砂浆和砖块之间的粘结破坏，可以很好地反应出砖墙的各向异性特征，缺点是建模和计算设置繁琐，耗费机时巨大，因此比较适用于对小型实验砖墙破坏情况的模拟。考虑本文中砖墙的实验模型较小，为了能够模拟实验中出现的砂浆和砖之间的损伤积累破坏过程以及砖块之间通缝破坏现象，决定采用分离式模型的共节点法。

2 有限元模型的建立

2.1 实验几何模型

根据防护工程内砖隔墙的实际情况建立了 2 种“工字形”的砖隔墙模型，如图 2 所示。图 2(a)为长模型：两翼墙尺寸约为 600 mm×118 mm×1 000 mm；中间横墙尺寸约为 1 082 mm×118 mm×1 000 mm。图 2(b)为短模型：两翼墙尺寸约为 600 mm×118 mm×1 000 mm；中间横墙尺寸约为 882 mm×118 mm×1 000 mm。该模型是砖墙的简化比例模型，在翼墙处没有施加任何约束。实验用的小砖是用强度等级为 MU10 的普通烧结粘土砖经机械切割而成，1 块原砖切割成 8 块实验用砖，3 个

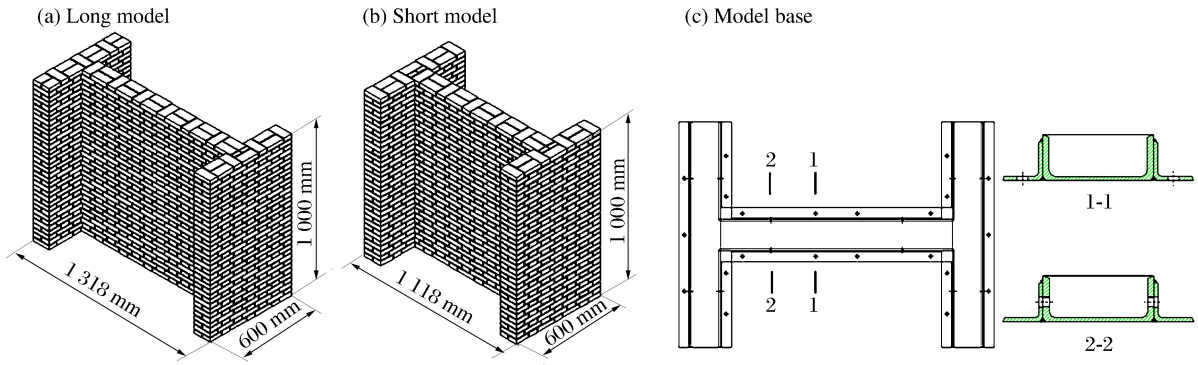

图 2 砖墙模型及底座示意图

Fig. 2 Sketch of the brick wall model and the base

方向对半切割，切割后的外形尺寸平均为 118 mm×55 mm×24 mm，砂浆缝厚度控制在 4～5 mm，砖墙模型的平均密度为 1 651 kg/m^3。模型底座由 14a＃槽钢和 5＃角钢焊接成工字型，并在槽钢内浇注钢纤维混凝土构成，如图 2(c)所示。为了研究砖隔墙在爆炸震动作用下产生不同程度破坏对应的加速度峰值及作用时间，将砖墙固定于总参工程兵科研三所的模拟爆炸震动冲击实验台上进行了 2 个水平方向的冲击实验。

2.2　有限元模型

砖墙的有限元模型及模型网格划分的局部放大如图 3 所示，整个模型由 3 个部分组成，分别为砖块、砂浆和模型底座，均采用 8 节点六面体单元，砂浆层厚度方向通过两层单元进行模拟，砖和砂浆之间采用共节点，长、短模型节点分别为 1 182 558 个和 1 118 718 个，划分实体单元分别为 1 089 721 个和 1 050 031 个。

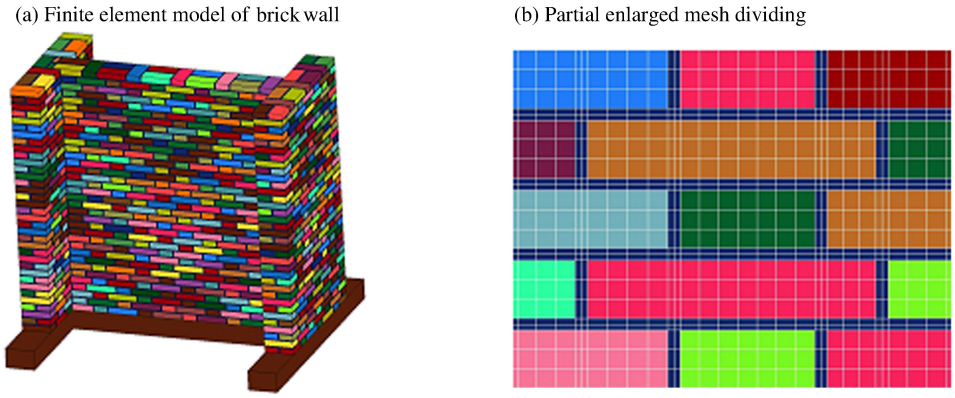

图 3　有限元模型及网格划分

Fig. 3　Finite element model and mesh dividing

2.3　材料模型漆计算参数

2.3.1　*砖块和模型底座*

由于砖块强度相对较高，砖块之间的砂浆层实际上是“薄弱层”。实验中发现，砖墙在冲击震动荷载下，破坏均出现在砂浆层，而砖块都没有出现破坏。因此，将砖的材料模型设置为刚体材料(MAT_RIGID)，这样既符合实验的真实情况又可以减少计算时间。通过将砖墙模型的每一块砖定义为一个刚体，这样长、短模型分别被离散为 1 401 个和 1 296 个刚体，每个刚体之间通过共节点的砂浆单元建立相互作用。砖的刚体材料参数为：密度为 1 600 kg/m^3，弹性模量为 4.71 GPa，泊松比为 0.12。

模型底座也定为一个刚体，密度为 2 450 kg/m^3，弹性模量为 33 GPa，泊松比为 0.2。

2.3.2　*砂浆*

砂浆选用 LS-DYNA 中的 96 号(MAT_BRITTLE_DAMAGE)材料模型。该材料模型认为在拉力作用下，材料的弹性模量和剪切强度会随着微小裂缝的出现而降低，降低的方式为材料的弹性刚度降低。当结构中的某个点达到抗拉强度的临界点，就会在这个点处出现微小裂缝，裂缝的垂直方向与第一主应力的方向相同。裂缝一旦出现，就会被固定在它出现的最初位置，且裂缝面方向的弹性强度就会自动变小。材料强度的变小是通过减小裂缝面上弹性模量来实现的。砂浆的材料参数取值见表 1，其中：E 为弹性模量，ρ 为密度，ν 为泊松比，f_t 为极限抗拉强度，f_c 为抗压屈服强度，τ 为极限剪切强度，β 为剪切强度剩余系数。

表 1　砂浆材料参数[4]

Table 1　Material parameters of mortar[4]

ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	ν	f_t/MPa	f_c/MPa	τ/MPa	β
1 900	1.44	0.2	0.36	7.2	0.36	0.03

2.3.3 材料的失效准则

砖墙在模拟爆炸冲击实验中表现为底部通缝式的受拉破坏。为了很好地模拟砖墙的破坏模式，同时也为了避免单元严重畸变导致的计算困难，在砂浆的材料模型中加入 Erosion 准则。Erosion 准则是 LS-DYNA 中常采用的材料失效模型，可以对材料定义多种的失效标准，主要有应力、应变等。在计算中，如果某个单元的应力或应变达到设定的失效标准，则该单元失效，会被从模型中删除，不再承受荷载，以此来模拟砖墙的开裂破坏。根据文献[11]设定 Erosion 准则中砂浆的失效应变为 0.002 5，即当砂浆单元的应变达到这个值时单元失效被删除。

2.3.4 模型荷载的施加

根据实验中模型的受载情况，对各分析模型施加约束和荷载。分析时，将模型最底下一层砖与模型底座设置为一个整体，两者之间不存在相互移动，所受荷载分 2 个阶段施加：第 1 阶段，施加重力荷载，重力加速度取 9.8 m/s^2；第 2 阶段，保持重力荷载不变，对模型底座施加相应冲击方向下由实验中测得的加速度荷载。

3 计算结果与实验验证

3.1 纵向水平冲击实验及分析

纵向水平方向上进行了 9 次冲击实验，冲击方向平行于砖墙模型中间横墙的轴线，安装、冲击方向及加速度测点位置如图 4 所示，砖墙采用长模型。测试了冲击台台体、连接钢板等处的冲击加速度以及墙顶加速度等参数。每个模型均从小的冲击震动输入开始，记录每一次冲击的加速度等参数以及模型的宏观破坏现象，直至砖墙模型完全破坏，测得的典型输入加速度波形见图 5 所示。计算时取砖墙体发生破坏的输入加速度曲线，其主脉冲峰值和宽度分别为 128 m/s^2 和 35 ms。

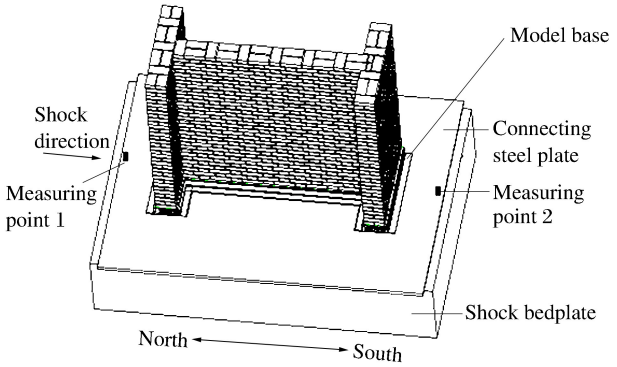

图 4 纵向水平冲击实验的模型安装、测点布置

Fig. 4 Model installation, measuring point arrangement in the longitudinal horizon shock experiment

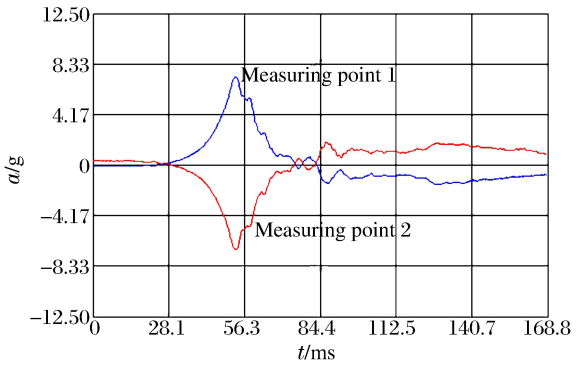

图 5 纵向水平冲击实验加速度曲线

Fig. 5 Acceleration signals in the longitudinal horizon shock experiment

图 6 给出了纵向冲击下砖墙模型的破坏过程，其中 ε 为应变。从图 6 中可以看到，砖墙模型在正向加速度作用下，在最南端翼墙底部第 1、2 皮砖之间首先出现拉裂；紧接着，裂缝越来越大，破坏部分的墙体被高高拉起，同时底部的裂缝迅速向另一侧发展，开始延伸到中间墙的底部，并且快速扩展到北侧的翼墙处；随后由于正向加速度的继续作用，很快最北端的墙体也在底部第 1、2 皮砖之间拉裂；裂缝越来越大，该侧墙体也被拉起，同时裂缝向另一侧发展，很快形成通缝，导致模型整体破坏；同时还可以发现，中间墙的底部，还有中间墙与两侧翼墙交接的部位也出现较轻微的破坏。此时冲击台台体已处于负向加速度状态，即向前运行的速度逐渐减小，因此完全拉裂的墙体将以破坏时的初速度在两者的交界面上继续向前滑行。模型完全破坏时典型的宏观破坏照片和模拟结果如图 7 所示，可以看到模拟结果与实验结果的破坏情况吻合很好。

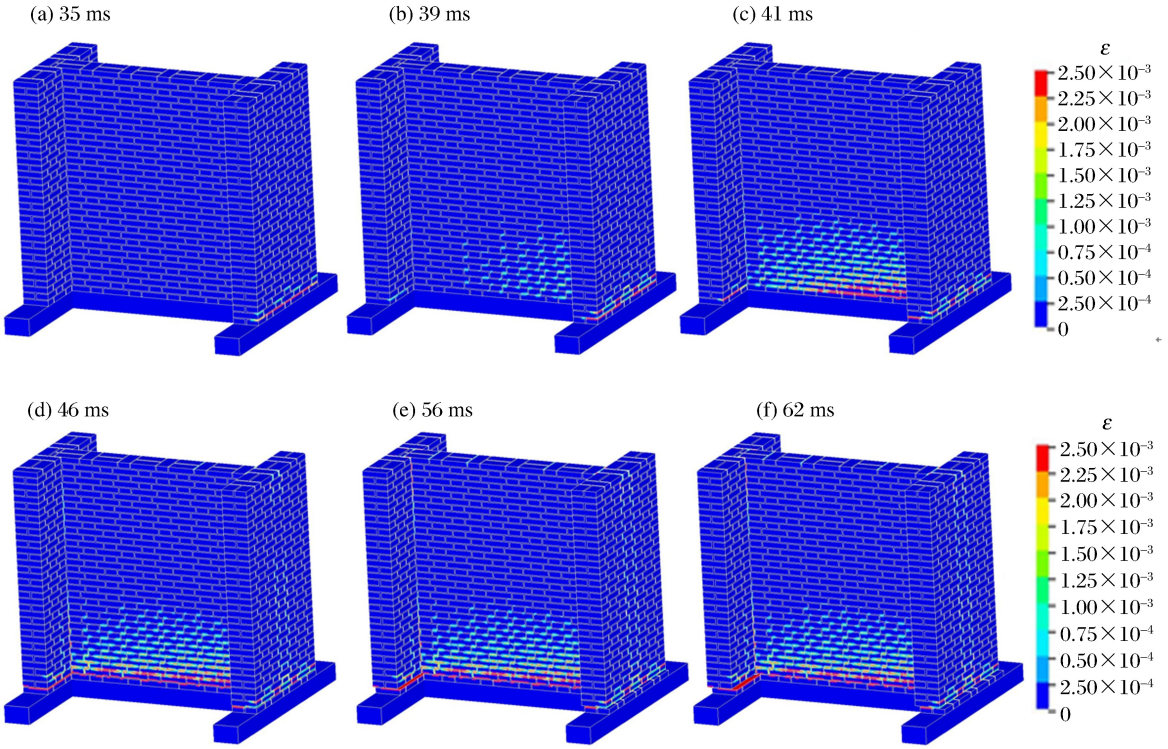

图 6　纵向水平冲击下砖墙模型的破坏过程

Fig. 6　Failure process of brick wall model under longitudinal horizon shock load

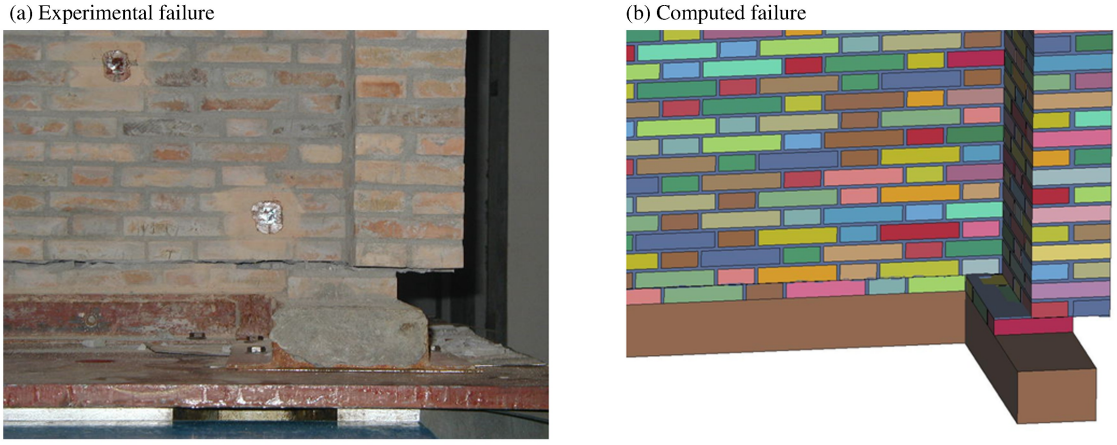

图 7　纵向水平冲击下砖墙模型的试验与计算破坏对比

Fig. 7　Comparison of the failure of the brick wall under longitudinal horizon shock load between the experimental and computaional result

3.2　横向水平冲击实验及分析

横向水平冲击实验则进行了 3 次的水平冲击实验，冲击方向为从北向南垂直于中间横墙轴线水平冲击，安装、冲击方向及加速度测点位置见图 8。砖墙采用短模型，3 个模型均只进行了 1 次的冲击实验。在该方向荷载下砖墙发生破坏的加速度主脉冲峰值和宽度分别为 41 m/s^2 和 48 ms，取该荷载作为输入，得到的加速度时程曲线如图 9 所示。

图 10 给出了横向冲击下砖墙模型的破坏过程。从图 10 中可以看到，模型首先在两翼墙最南端底部第 1、2 皮砖之间出现受拉断裂，然后裂缝开始向北发展，同时两翼墙最南端第 2～5 皮砖之间出现了

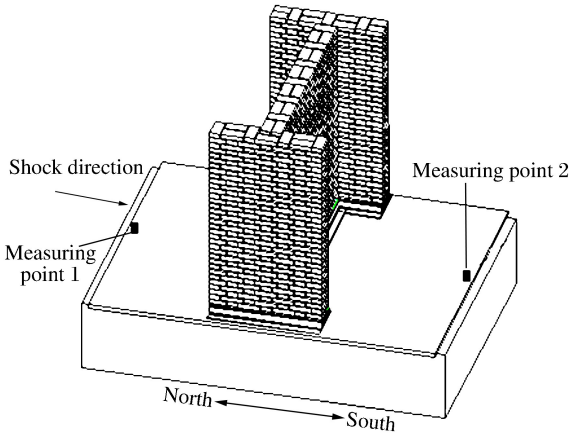

图 8 纵向水平冲击实验的模型安装、测点布置

Fig. 8 Model installation, measuring point arrangement in the transversal horizon shock experiment

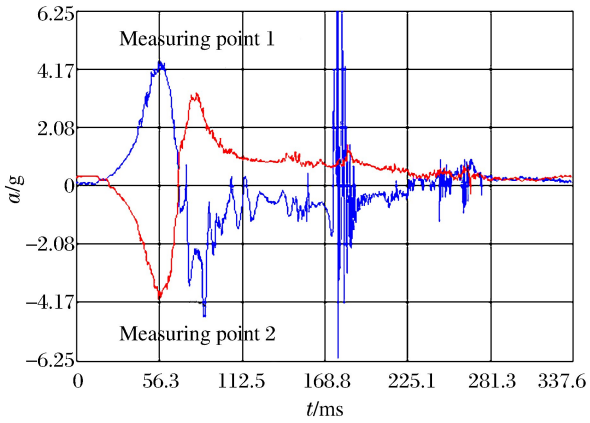

图 9 纵向水平冲击实验加速度曲线

Fig. 9 Acceleration signals in the transversal horizon shock experiment

轻微破坏，当翼墙破坏已超过中间横墙时，中间横墙也开始出现裂缝，南侧两翼墙体被拉起；随后裂缝继续向北发展，两翼墙又在最北端第 1、2 皮砖之间拉裂，这样两翼墙已产生贯通性裂缝，脱离底部，相对于模型底座向北滑移。在横向水平冲击下，砖墙模型破坏部位主要在底部与底座交接的部位，破坏同样表现为水平通缝破坏，其实验与计算的破坏形态对比如图 11 所示。

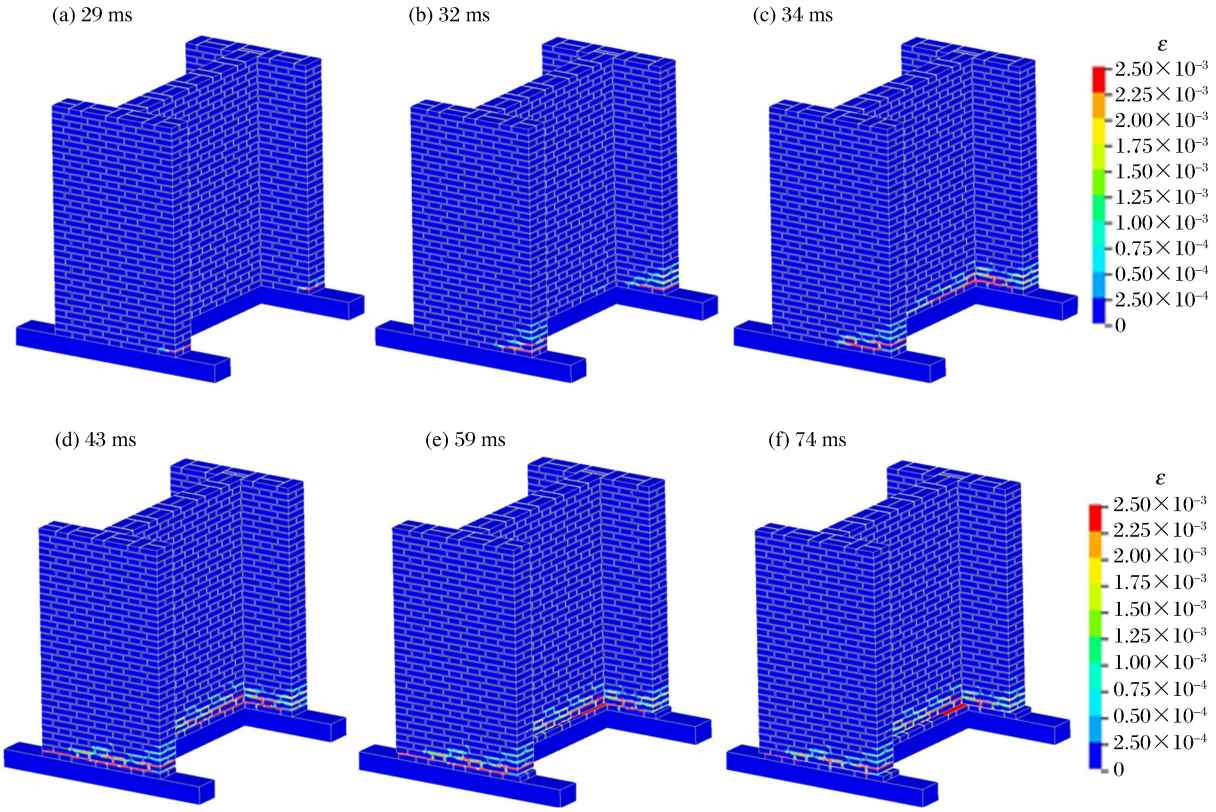

图 10 横向水平冲击下砖墙模型的破坏过程

Fig. 10 Failure process of brick wall model under transversal horizon shock load

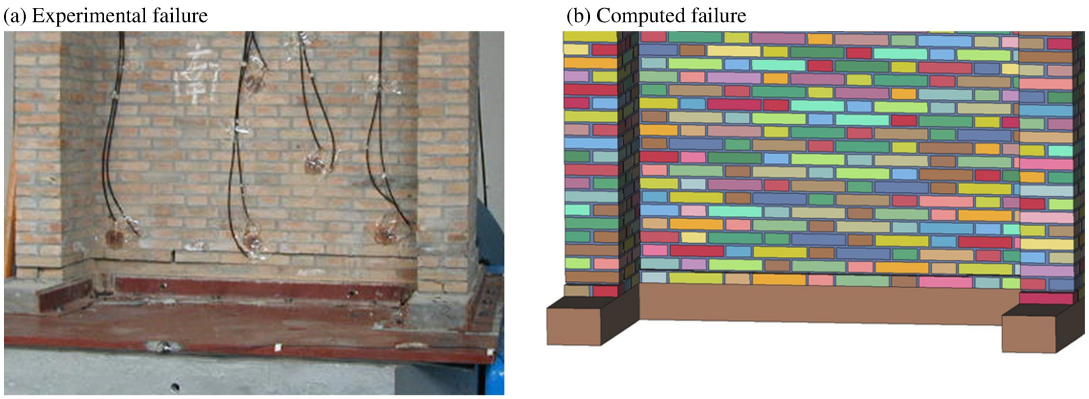

图 11　横向水平冲击下砖墙模型的试验与计算破坏对比

Fig. 11　Comparison of the failure of the brick wall under transversal horizon shock load between the experimental and computaional result

4　结　论

(1)建立了三维精细化砖墙有限元分析模型模拟砖墙在爆炸冲击震动荷载下的破坏过程。结果表明：由于该种分析模型综合考虑了砖块和砂浆之间复杂的相互作用，并且对砂浆层进行了单独建模，保证了砖墙在数值模拟上的真实性和正确性，因此可以很好地模拟出实际情况中砖块之间砂浆层的损伤积累破坏，而有些细微的破坏在实验中是无法观察到的。

(2)实验与数值计算结果表明，在水平向冲击下，纵向的抗冲击震动性能要好于横向，模型破坏时均表现为水平通缝破坏，破坏主要为受拉破坏，不是由于剪应力引起的剪切破坏，破坏缝主要出现在砖墙与基础交接的底部，另外在纵向水平冲击下，中间横墙的底部，以及中间横墙与两边翼墙连接的地方也出现了轻微的破坏，但整体上其余部位基本保持完好。

(3)在验证计算模型的基础上，实现了砖墙在水平向冲击震动荷载下通缝破坏的模拟，得到了与实验结果一致的数值模拟结果。

参考文献：

[1]　Bocca P, Carpinteri A, Valente S. Fracture mechanics of brick masonry: size effects and snap-back analysis[J]. Materials and Structures, 1989, 22 (5): 364-373.

[2]　Pande G N, Middleton J, Lee J S, et al. Numerical simulation of cracking and collapse of masonry panels subject to lateral loading[C]// Proceedings of the 10th International Block/Brick Masonry Conference. Calgary, Canada, 1994: 107-115.

[3]　McCallum S C, Locking P M, Harkness S R. Simulation of masonry wall failure and debris scatter[C]// Proceedings of the 6th European LS-DYNA Users' Conference. Gothenburg, Sweden, 2007: 157-168.

[4]　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 of the anti-blast properties of masonry walls [J]. Protective Engineering, 2011, 33(5): 35-40.

[5]　苗吉军，顾祥林，张伟平，等. 地震作用下砌体结构倒塌反应的数值模拟计算分析[J]. 土木工程学报，2005，38(9)：45-52.
Miao Ji-jun, Gu Xiang-lin, Zhang Wei-ping, et al. Numerical simulation analysis for the collapse response of masonry structures under earthquakes[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(9): 45-52.

[6]　倪镇国. 强震作用下砌体结构倒塌过程仿真分析[D]. 阜新：辽宁工程技术大学，2008.

[7]　许三罗. 爆炸荷载作用下砌体结构响应的有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报，2007，27(3)：357-362.
Xu San-luo. Finite element analysis of response of masonry wall under blast loading[J]. Journal of Disaster Preven-

tion and Mitigation Engineering, 2007,27(3):357-362.

[8] 张正威,宋二祥,陆新征,等.核爆炸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-xing, Lu Xin-zheng, et al. Effects of concrete masonry walls on structures under nuclear blast loadings[J]. Engineering Mechanics, 2008,25(5):73-78.

[9] Burnett S, Gilbert M, Molyneaux T, et al. The performance of unreinforced masonry walls subjected to low-velocity impacts: Finite element analysis[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,34(8):1433-1450.

[10] 魏海霞,陈士海,张安康.基于动力有限元方法的典型砌体结构爆破振动安全标准的探讨[J].振动与冲击,2011,30(5):49-53.
Wei Hai-xia, Chen Shi-hai, Zhang An-kang. Safety standards discussion for blasting vibration of typical masonry buildings with dynamic finite element method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(5):49-53.

[11] Wei X Y, Hao H. Numerical derivation of strain rate effects on material properties of masonry with solid clay bricks[J]. Transactions of Tianjin University, 2006,12(z1):147-151.

Numerical simulation of damage of brick wall subjected to blast shock vibration

Li Li-sha, Du Jian-guo, Zhang Hong-hai, Xie Qing-liang

(*The Third Engineer Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, Luoyang* 471023, *Henan*, *China*)

Abstract: The dynamic response of brick wall under blast shock vibration is very complex. it is difficult to establish its constitutive relation accurately. Several common finite-element methods to simulate brick wall were presented and merits and drawbacks of these method were analyzed. A three-dimensional finite-element model is applied in which the bricks and mortar are considered separatedly. LS-DYNA software is used to simulate the failure process of brick wall under horizontal blast shock vibration and the results were agreed well with the experiment. The research indicates that the analytical model considers the complex interaction of brick and mortar integratedly and the mortar layer is modeled separately which ensured the validity and correctness of the numerical simulation, so the accumulative damage of the mortar layer between the bricks in the experiment could be simulated accurately.

Key words: mechanics of explosion; blast shock vibration; separate common node model; LS-DYNA; numerical simulation; brick wall

(责任编辑 王小飞)