

文章编号: 1000-4750(2008)05-0073-06

核爆冲击波作用下空心砌块墙对主体结构的作用

*张正威^{1,2}, 宋二祥^{1,2}, 陆新征^{1,2}, 陈肇元^{1,2}

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 该文采用显式动力有限元软件 LS-DYNA 对核爆冲击波作用下高层建筑混凝土小型空心砌块外墙(以下简称砌块墙)的破坏模式进行了数值模拟, 计算模型考虑了材料非线性、接触非线性、大应变、大变形等主要特征。在此基础上讨论了砌块墙在破坏飞散过程中传给结构的荷载, 得到了不同冲击波超压作用下砌块墙传给结构的荷载时程。计算结果表明: 核爆冲击波作用下, 砌块墙的破坏模式与冲击波超压的大小有关; 其传给结构的荷载时程基本呈三角形分布, 荷载峰值随超压的增加而增大, 墙体顶部与结构构件之间接触面的允许抗剪强度对荷载峰值时间和持续作用时间起关键作用。

关键词: 核爆冲击波; 空心砌块墙; 高层建筑; 作用; 有限元分析

中图分类号: TU522.3; TU973 **文献标识码:** A

EFFECTS OF CONCRETE MASONRY WALLS ON STRUCTURES UNDER NUCLEAR BLAST LOADINGS

*ZHANG Zheng-wei^{1,2}, SONG Er-xiang^{1,2}, LU Xin-zheng^{1,2}, CHEN Zhao-yuan^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory for Structural Engineering and Vibration of Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Concrete masonry walls subjected to blast loadings were analyzed with the explicit dynamic finite element method. The nonlinear material properties, nonlinear contact, large strain, large displacement were considered in the analysis model. The effects on high rise building caused by masonry wall deformation and failure under blast loadings were discussed. The loading time history on high rise building caused by masonry wall failure is presented. The numerical results show the mode of failure of masonry walls is significantly influenced by the strength of blast wave. The induced forces of structures are of triangle pattern, the larger the strength of blast wave, the higher the peak value of forces. The critical shear strength of mortar between masonry wall and the structural members played an important role on the moment of peak forces and the duration of forces.

Key words: nuclear blast wave; concrete masonry wall; high rise building; effect; FEM

核爆冲击波作用下, 高层建筑维护外墙极易发生破坏飞散, 墙体是否破坏直接影响到主体结构承受的荷载及荷载冲量, 并对冲击波的反射和环流产

生影响^[1-3]。一般情况下, 当冲击波入射超压及建筑物结构尺寸给定时, 作用在主体结构上的荷载主要取决于墙面上门窗洞口的大小和墙体的强度。墙

收稿日期: 2006-11-04; 修改日期: 2007-06-20

基金项目: 国家人防办基金资助项目

作者简介: *张正威(1964—), 男, 江苏沭阳人, 副教授, 博士生, 从事土与结构动力相互作用研究(E-mail: zw-zhang02@mails.tsinghua.edu.cn);

宋二祥(1957—), 男, 河北博野人, 教授, 博士, 博导, 从事地基基础、基坑支护及地下结构的教学与科研工作

(E-mail: songex@tsinghua.edu.cn);

陆新征(1978—), 男, 安徽芜湖人, 讲师, 博士, 从事混凝土结构分析和计算理论研究(E-mail: luxinzheng@263.net);

陈肇元(1931—), 男, 浙江宁波人, 教授, 博导, 院士, 从事土木工程与防护工程的教学与科研工作(E-mail: chenzy@tsinghua.edu.cn).

体破坏前,主体结构受到的荷载基本等于作用在墙体外表面上的冲击波压力;墙体破坏飞散以后,主体结构受到的荷载主要是冲击波绕过结构构件行进中所产生的拖曳力;但在墙体从破坏到飞散的过程中,墙体通过和其周围结构构件的相互作用传给主体结构荷载^[1,3],该过程是墙体和其周围结构构件之间复杂的动力相互作用过程。研究墙体的破坏模式及其在变形、破坏和飞散过程中传给主体结构的荷载是研究核爆冲击波作用下高层建筑倒塌和其附建人防地下室倾覆的基础和前提。

高层建筑的填充墙由砌块和砂浆组砌而成,墙体四周的结构构件对墙体的变形起约束作用,砌块和砂浆、墙体与结构构件之间的接触面为薄弱面。冲击波作用下,其变形特征不仅表现材料的非线性、大应变、大变形,还涉及接触非线性,这无疑增加了该问题解决的复杂性和难度。以往的研究主要是针对当时工程中常见的砖墙,研究方法大多是采用试验或将砖墙简化为单自由度体系采用结构动力学的方法进行计算分析,并得出当冲击波超压大于 0.03MPa 时,砖墙将发生破坏飞散^[1-2]。对于目前高层建筑中广泛使用的混凝土空心砌块墙研究甚少。自“9·11”事件以后,有些学者对恐怖荷载作用下砌块墙的变形和破坏进行了试验研究和数值分析^[4-9],但其关注的是砌块墙在破坏飞散过程中对室内人员和设备的损伤和破坏。

为了充分考虑砌块墙在核爆冲击波作用下的材料非线性、接触非线性和大变形等主要力学特征,本文根据混凝土小型空心砌块墙的实际构造建立计算模型,采用显式动力有限元软件 LS-DYNA 对混凝土小型空心砌块墙在核爆冲击波作用下的

破坏模式进行数值模拟和计算分析,并得到一些有益的结论。

1 计算模型及计算参数

1.1 计算模型

取目前高层建筑中广泛使用的混凝土空心砌块墙作为研究对象,设结构层高为 3m,墙体顶部和底部钢筋混凝土梁截面尺寸为 0.6m×0.3m。墙体厚度取 290mm,空心砌块取主规格 390mm×290mm×190mm、辅助规格 190mm×290mm×190mm 两种,开孔率为 45%。不考虑门窗玻璃破坏对墙面上冲击波超压的影响。

由于墙体的高宽比约 1:2,可认为墙体的变形以高度方向的变形为主,即将墙体视为支承于上下端钢筋混凝土梁之间的单向板。计算模型宽度取标准砌块宽 390mm、厚度取墙厚 290mm、高度 2.4m,砂浆灰缝厚度取 10mm。建模时考虑水平灰缝和竖向灰缝错开,砂浆灰缝用接触面模拟,并将砂浆灰缝的厚度和质量折算到砌块上,计算模型如图 1(a)和图 1(b)。模型中上、下两端为刚性边界,模拟砌块墙底部和顶部的钢筋混凝土梁;底部和顶部两皮砌块为实体,模拟空心砌块墙端部灌缝砌实;中间部分为混凝土小型空心砌块,水平灰缝共 13 道,竖向灰缝共 5 道。砌块采用 8 节点六面体单元模拟,网格划分如图 1(c),沿砌块长度方向:肋厚范围划分 2 个单元,其他划分 12 个单元;沿厚度方向:肋厚划分 2 个单元,其他划分 6 个单元;沿高度方向划分 10 个单元。计算表明再细分单元对计算结果不产生明显影响。

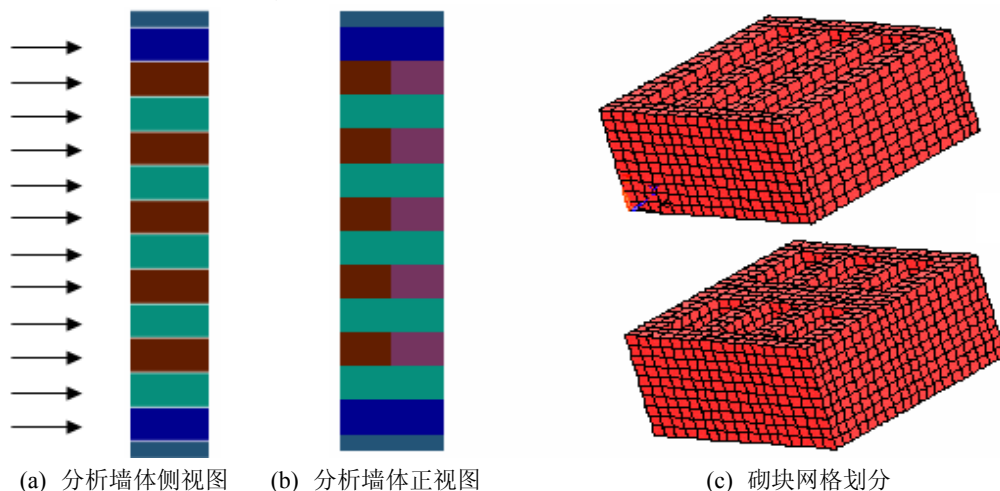


图 1 计算模型

Fig.1 Analysis model

1.2 材料本构和计算参数

混凝土空心砌块的强度等级取 MU2.5, 计算中材料强度取平均强度, 并将规范中按毛面积计算的强度值换算成按实际面积计算的强度值。应变率对混凝土空心砌块强度的影响在程序中通过输入应变率-强度提高系数来考虑, 如图 2 所示。图 2 中曲线选自文献[10]的试验结果。砌块密度考虑了灰缝的厚度和质量。砌块的计算参数如表 1 所示。

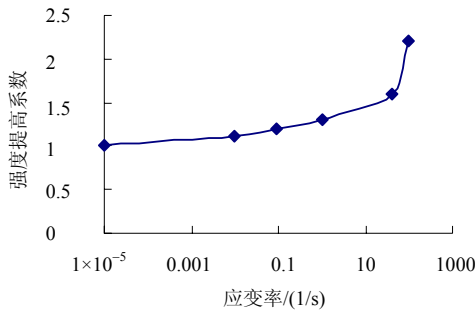


图 2 应变率-混凝土强度提高系数

Fig.2 Strain rate-coefficient of concrete strength

表 1 混凝土空心砌块计算参数

Table 1 Material properties

强度等级	剪切模量/ GPa	泊松比	粘聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)	密度/ (kg/m ³)
MU2.5	2.515	0.3	0.835	50	1800

砌块的材料本构采用 LS-DYNA 中 16 号材料本构, 它可单独使用也可与 bar 单元联合使用模拟冲击荷载作用下钢筋混凝土材料的力学性能, 具有良好的适用性及鲁棒性。该模型能够反映混凝土抗压强度不等的特性、平均应力和应变率对材料强度的影响。模型需要输入的基本性能参数有密度 ρ 、剪切模量 G 、卸载时体积模量 K 、拉应力截断值, 此外还需定义材料强度-应变率关系曲线及屈服面状态方程等。屈服面采用 $D-P$ 屈服准则, $D-P$ 屈服面采用 Mohr-Coulomb 准则的外接锥, 屈服面状态方程为:

$$q = 2.058p + 1.440 \quad (1)$$

式中: q /MPa 为抗剪强度; p /MPa 为平均应力。

为了模拟墙体底部和顶部两皮砌块的压碎行为, 在底部和顶部两皮砌块的材料本构中增加受压失效准则, 该准则在 LS-DYNA 中用 MAT_ADD_EROSION 定义, 压碎平均应力取 13.8MPa^[3]。

1.3 接触面

接触面考虑两种类型的接触: 一是灰缝和砌块之间的接触; 二是空心砌块外壁破坏后与内壁的撞击接触。两种接触面均采用对称罚函数法计算接触

面上的力。

灰缝和砌块之间的接触采取灰缝与砌块在初期是刚性连接, 当接触面失效后, 即释放灰缝和砌块间接触面的节点约束, 约束退化为面-面接触, 并允许砌块滑动、分离或再次接触。

接触面的失效准则为:

$$\left(\frac{F_n}{F_{nf}}\right)^2 + \left(\frac{F_s}{F_{sf}}\right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

式中: F_n 、 F_s 分别为接触面正应力(拉)和剪应力; F_{nf} 、 F_{sf} 分别为接触面的允许正应力(拉)和剪应力。

砂浆的强度等级取 M5。计算表明在 0.01MPa—0.3MPa 冲击波超压作用下, 墙体发生破坏的时间不大于 10ms, 此时砂浆强度应变率提高系数约 1.29^[10], 即砂浆抗压强度考虑应变率的影响为 $5 \times 1.29 = 6.45$ MPa; 在相同荷载作用下, 墙体底部和顶部两皮砌块受压区的应变率范围为 0.033—7.7, 在此应变率范围内混凝土强度应变率提高系数最大为 1.34^[10], 此时混凝土的抗压强度为 $1.34 \times 2.5 / 0.55 = 6.1$ MPa, 小于砂浆的抗压强度。故接触面参数参考混凝土空心砌块强度确定, 并根据工程经验取混凝土空心砌块抗剪强度的 2/3 作为接触面的允许抗剪强度; 接触面允许抗拉强度取允许抗剪强度的 0.8 倍。由于混凝土空心砌块墙在爆炸冲击波作用下的应变率变化范围较大, 故在确定接触面计算参数时根据应变率把冲击波超压分成 0.01MPa—0.1MPa 和 0.2MPa—0.3MPa 两组, 其对应的接触面参数取值如表 2 所示。

表 2 接触面参数

Table 2 Parameters of contact surfaces

超压/MPa	允许抗拉强度/MPa	允许抗剪强度/MPa
0.01—0.1	0.532	0.666
0.2—0.3	0.580	0.725

1.4 荷载

地面冲击波超压取 0.01MPa、0.03MPa、0.05MPa、0.1MPa、0.2MPa、0.3MPa 等六种工况, 因砌块墙在荷载作用初期破坏, 故地面冲击波按等切线简化, 冲击波计算参数如表 3 及图 3。

表 3 冲击波计算参数

Table 3 Parameters of blast waves

超压/MPa	ΔP_r /MPa	ΔP_s /MPa	t_s /ms	t_{90} /ms
0.01	0.021	0.0103	10.5	1516
0.03	0.07	0.0327	9.9	1231

(续 表)

超压/MPa	ΔP_r /MPa	ΔP_s /MPa	t_s /ms	t_{00} /ms
0.05	0.12	0.0576	9.4	1018
0.1	0.28	0.129	8.5	774
0.2	0.67	0.305	7.4	585
0.3	1.14	0.508	6.9	474

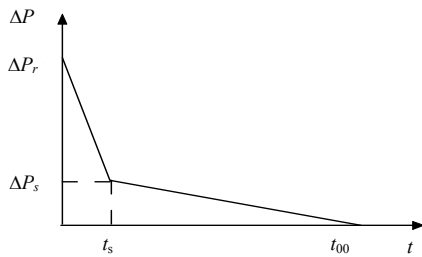


图3 冲击波荷载简图

Fig.3 Loading pattern of blast wave

2 结果分析

2.1 墙体破坏模式

图4为计算荷载工况下砌块墙的变形模式。从图4中可看出：当冲击波超压较小时，砌块墙的变形以弯曲型为主，墙体的抗力主要由其抗弯强度决定；随着冲击波超压的增大，墙体的变形逐渐从弯曲型向剪切型过渡，此时墙体的变形类似一压弯构件；当冲击波超压为0.3MPa时，墙体的破坏模式表现为整体沿支座处发生剪切破坏，此时墙体的抗力主要由墙体与支座之间接触面的抗剪强度决定。从图5也可以看出，随超压的增加，墙体端部与支座处的相对位移逐渐增大，说明当超压较大时，墙

体破坏是由于端部与支座间的接触面失效引起。具体分别介绍如下：

1) 在0.01MPa超压作用下，砌块墙未发生破坏飞散，仅在跨中出现轻微横向裂缝，如图4(a)。

2) 在0.03MPa和0.05MPa超压作用下，砌块墙端部砌块背波面一侧混凝土局部受剪压破坏，继而墙中部出现横向裂缝。墙体的破坏模式近似一压弯构件，表现为整片墙体从中间分成两片绕支座向外转动飞散，如图4(b)、图4(c)。

3) 在0.1MPa超压作用下，砌块墙首先是支座处背波面混凝土受剪压破坏，然后是端部砌块与其相邻砌块间的接触面失效，并在墙中部、1/4、3/4墙高度处相继出现贯通横向裂缝，墙体分成4片向外飞散，中间两块近似沿水平方向移动，端部两块分别绕上下支座转动飞散，如图4(d)。

4) 在0.2MPa和0.3MPa超压作用下，先是墙体端部与支座处接触面失效，如图4(e)和图4(f)。继而是墙体端部背波面混凝土受剪压破坏，端部砌块与其相邻砌块间的接触面失效，整片墙体沿冲击波作用方向移动。

从不同冲击波超压作用下墙体的变形破坏模式可看出：随着冲击波超压的增加，墙体的变形逐渐从弯曲型向剪切型过渡，剪切变形逐渐起主导作用。这是由于随着冲击波超压的增加，荷载强度增大，作用时间短，高频成份影响增大，剪力发展较快的缘故。

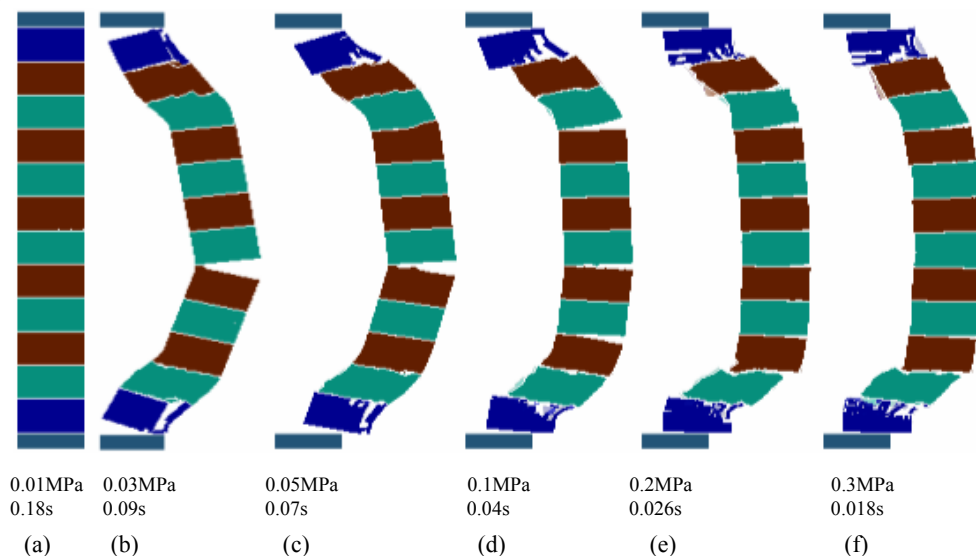


图4 不同超压下混凝土小型空心砌块的破坏模式(图中时间为墙体变形所对应的加载时间)

Fig.4 Failure modes of masonry wall under different blast loadings
(Time indicated is the corresponding moment of deformation after load application)

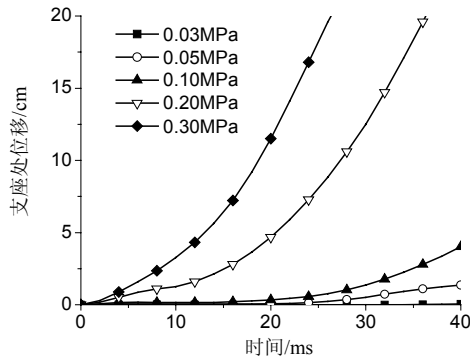


图5 墙体端部与支座间的相对位移

Fig.5 Relative displacement between wall end and bearing

2.2 墙体传给结构的荷载

在 0.01MPa 超压作用下墙体未发生破坏, 此时墙体传给主体结构的荷载可近似按作用在墙面上的压力乘以其作用面积计算。图 6 和图 7 分别为 0.03MPa—0.3MPa 冲击波超压作用下墙体支座处的剪力和轴力时程。从图 6 中可看出: 1) 核爆冲击波作用下, 墙体传给支座的荷载有明显的升压时间, 荷载时程基本呈三角形分布; 2) 超压越大, 荷载峰值越大; 3) 当超压较小为 0.03MPa—0.1MPa 时, 墙体破坏主要是由其截面的抗弯强度决定, 在剪力达到峰值时墙体与支座间基本未发生相对滑动变形(如图 5), 此时墙体传给支座的剪力为墙体端部与支座处接触面上的剪应力乘以接触面面积; 4) 当超压较大为 0.2MPa—0.3MPa 时, 墙体破坏是因其端部与支座处接触面破坏引起, 墙体和支座之间有明显的相对滑移变形(如图 5), 此时墙体传给支座的剪力等于支座处轴力乘以墙体与支座间的摩擦系数, 其分布形式也与轴力时程基本相同(图 7)。由于拱效应的影响, 墙体轴力随其整体弯曲变形的增加而增加, 进而使墙体传给支座的荷载也随之增大, 甚至超过接触面的抗剪强度。

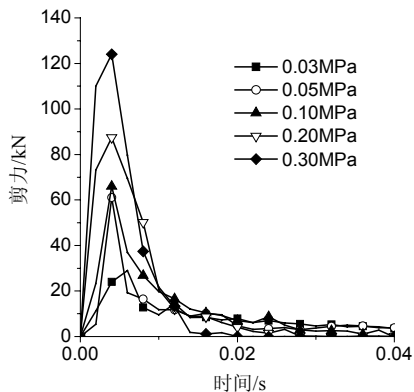


图6 墙体传给结构的剪力

Fig.6 Shear forces of structure

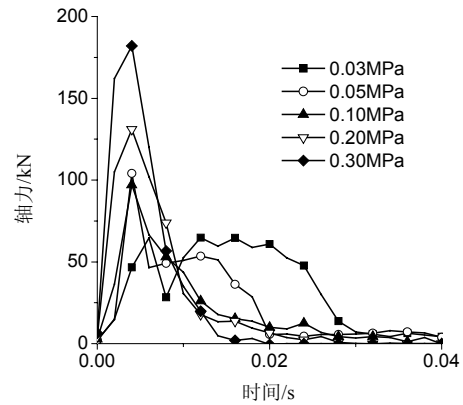


图7 墙体传给结构的轴力

Fig.7 Axial forces of structure

表4 砌块墙传给结构的荷载

Table 4 Loads of structure induced by masonry wall

超压/ MPa	荷载 冲量/(kN·s)	剪力 峰值/kN	峰值 时间/ms	允许 剪力/kN	持续作用 时间/ms
0.01	3.70	10	6	75	未破坏
0.03	7.90	29(20)	6	75(62)	33(未破坏)
0.05	11.41	61(23)	4	75(62)	15(47)
0.1	19.11	66(31)	4	75(62)	14(24)
0.2	36.84	87(59)	4	82(62)	15(13.5)
0.3	30.60	124	4	82	13

注: ()内数值为文献[2]的计算结果, 原填充墙为厚度 24cm 的砖砌体, 此处给出的为折算成标准砌块宽度的结果。

表 4 给出了墙体传给结构(支座)荷载(剪力)的计算结果。从表 4 中可以看出, 随冲击波超压的增加, 冲击波荷载冲量增加, 墙体传给主体结构的荷载峰值增加, 而荷载峰值时间则呈现如下两种特征: 1) 当超压较小为 0.01MPa—0.03MPa 时, 荷载峰值时间约为 6ms。此时墙体的变形以弯曲变形为主, 支座处剪力达到峰值的时间由墙体跨中截面抗弯强度决定; 2) 当超压大于等于 0.05MPa 时, 荷载峰值时间约为 4ms。此时墙体的变形以剪切变形为主, 支座处剪力达到峰值时墙体与支座接触面上的剪应力接近其抗剪强度、或达到其抗剪强度接触面发生滑动, 支座处剪力达到峰值的时间主要由墙体与支座接触面的抗剪强度决定。

从表 4 中可以看出本文的计算结果与文献[2]具有相同的趋势, 但荷载峰值及持续作用时间在数值上略有差别, 具体为: 1) 0.03MPa 超压作用下, 本文计算表明砌块墙破坏, 相同超压下文献[2]计算表明砖墙未发生破坏。这是因为砖墙的弯曲抗拉和抗剪强度均大于砌块墙, 砖墙的弯曲抗拉和抗剪强度约为砌块墙的 2 倍; 2) 本文的剪力峰值要大于文献[2]的计算结果。这是由于计算模型不同引起的,

文献[2]采用的计算模型是将墙体看作单自由度体系,将上下各半片墙体视为刚体绕支座转动,建立动力平衡方程,动力平衡方程中墙体的抗力曲线为弯矩-转角关系曲线。支座处剪力是取半片墙作为隔离体求得,即:剪力=冲击波荷载-墙体的惯性力,并据此推导出剪力计算公式为 $V(t)=(H\Delta P(t)+3HR(x))/8$,式中 H 为墙高, $\Delta P(t)$ 为冲击波超压, $R(x)$ 为抗力。由于墙体采用刚性假定,计算模型忽略了墙体的局部弯曲变形和剪切变形,不能考虑因墙体弯曲引起的拱效应,外荷载能量全部转换为结构的动能,因而计算得的墙体绕支座转动加速度大,惯性力大,支座处剪力小。3) 本文计算的持续作用时间小于文献[2]的计算结果。这是由于砖墙的弯曲抗拉和抗剪强度大于砌块墙,且文献[2]的计算模型不能考虑墙体端部与支座间的相对滑动变形的缘故。

3 结论

根据以上计算分析,可以得出如下结论:

(1) 核爆冲击波作用下,混凝土小型空心砌块墙的破坏模式与冲击波超压大小有关。当超压较小时,墙体近似于端部位移受限的压弯构件,墙体的变形以弯曲变形为主,破坏是由于墙体中部开裂、端部砌块压碎引起;随着冲击波超压的增加,剪切变形的影响逐渐增加,墙体的变形模式逐渐从弯曲线型向剪切型过渡,破坏是由于墙体上下端部混凝土局部压碎及墙体与支座间接触面发生剪切破坏引起。当超压足够大时,墙体的变形表现为墙体沿支座处发生滑动变形,整片墙体沿荷载作用方向飞散。

(2) 核爆冲击波作用下,对于混凝土空心砌块墙高层建筑,当超压较小外墙不破坏时,可按作用在墙面上的冲击波超压计算墙体传给结构的荷载;当超压较大外墙破坏时,外墙传给结构的荷载可取三角形分布,其峰值和持续时间可按本文表4确定。

参考文献:

[1] 陈肇元,宋二祥,郭红仙.核爆冲击波对多高层建筑人防地下室的倾覆作用及设计对策研究[R].北京:清华大学土木系,2003.

- Chen Zhaoyuan, Song Erxiang, Guo Hongxian. Ooverturning effects and design procedures on basement shelters of high rise frame structures under nuclear blast loadings [R]. Beijing: Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 2003. (in Chinese)
- [2] 陈肇元,王志浩.核袭击下城市房屋倒塌对人防工程的作用[R].北京:清华大学土木系,1991.
- Chen Zhaoyuan, Wang Zhihao. Effects on basement shelters of high rise frame structures under nuclear blast loadings [R]. Beijing: Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 1991. (in Chinese)
- [3] 张正威.核爆冲击波作用下高层建筑附建人防地下室倾覆机理研究[D].北京:清华大学,2007.
- Zhang Zhengwei. Research on the overturning mechanism of basement shelters attached to high rise buildings under nuclear blast loading [D]. Beijing: Tsinghua University, 2007. (in Chinese)
- [4] Eamon Christopher D, Baylot James T, O Daniel James L. Modeling concrete masonry walls subjected to explosive loads [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(9): 1098-1106.
- [5] Dennis Scott T, Baylot James T, Woodson Stanley C. Response of 1/4-Scale concrete masonry unit (CUM) walls to blast [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(2): 134-142.
- [6] Baylot James T, Bullock Billy, Slawson Thomas R. Blast response of lightly attached concrete masonry unit walls [J]. Journal of Structural Engineering August, 2005, 131(8): 1186-1193.
- [7] Davidson James S, Fisher Jeff W, Hammons Michael L. Failure mechanisms of polymer-reinforced concrete masonry walls subjected to blast [J]. Journal of structural Engineering August, 2005, 131(8): 1194-1205.
- [8] Mayrhofer Chr. Reinforced masonry walls under blast loading [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(6): 1067-1080.
- [9] 陆新征,江见鲸.世界贸易中心飞机撞击后倒塌过程的仿真分析[J].土木工程学报,2001,34(6):8-10.
- Lu Xinzhen, Jiang Jianjing. Simulation analysis of collapse of World Trade Center under plane impact [J]. Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 8-10. (in Chinese)
- [10] 陈肇元.抗爆结构研究报告第一集[R].北京:清华大学土木系,1971.
- Chen Zhaoyuan. Scientific study report (1) of antidetona-tiong constructsures [R]. Beijing: Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 1971. (in Chinese)