

文章编号:1671-8879(2014)02-0071-08

# 砌体结构地震倒塌过程仿真及 抗倒塌影响因素

李英民<sup>1,2</sup>, 谭 潜<sup>1</sup>, 汤 芸<sup>1</sup>, 周小龙<sup>1</sup>, 郑妮娜<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘 要:**在强震中砌体房屋易倒塌,为了对其倒塌过程仿真及对影响结构倒塌的因素进行分析,采用显式动力有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,对某结构模型进行倒塌过程仿真;同时分析了构造柱、砂浆强度、开洞率、块体密度以及窗间墙与窗下墙的刚度比等因素对砌体结构抗倒塌性能的影响。结果表明:在地震作用下,由于门窗洞口处易出现应力集中,故门窗洞口四角处先发生破坏;构造柱可以提高砌体结构的变形能力和整体性;一定程度上,砂浆强度越高,结构越难倒;墙体开洞率越大,越容易倒塌;块体强度一定时,密度相对较小有利于抗倒塌;当窗间墙与窗下墙的刚度比小于 1.0 时,窗间墙先于窗下墙破坏,窗间墙的破坏会加速结构的倒塌。

**关键词:**结构工程;砌体结构;仿真分析;抗倒塌性能;构造柱;ANSYS/LS-DYNA

**中图分类号:**TU472

**文献标志码:**A

## Simulation on collapse process and analysis of anti-collapse influencing factors for masonry structure under earthquake

LI Ying-min<sup>1,2</sup>, TAN Qian<sup>1</sup>, TANG Yun<sup>1</sup>, ZHOU Xiao-long<sup>1</sup>, ZHENG Ni-na<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area  
of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** It has been obvious that masonry structures are prone to collapse in strong earthquakes. Simulating collapse process and analyzing anti-collapse influencing factors for masonry structure is significant. The explicit dynamic FE software ANSYS/LS-DYNA was adopted to simulate collapse process. Meanwhile, the effects of tie-column, mortar strength, block density, the rate of holes, the stiffness ratio of window wall to spandrel wall on anti-collapse performance of masonry structure were analyzed. The results show that the corners of windows and doors will be damaged at first where the stress concentration occurs under the action of earthquake; deformation capacity and integrity of masonry structure can be improved by tie-columns; to some extent, the higher the strength of mortar, the harder the collapse of structure; the structure is easy to collapse while the ratio of holes on the walls becomes bigger and bigger. For the blocks with certain strength, the smaller the density, the better the seismic capacity. When the stiffness ratio of

收稿日期:2013-04-10

基金项目:国家科技支撑计划项目(2009BAJ28B01-02);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CDJXS11201167, CDJXS11200010)

作者简介:李英民(1968-),男,山东无棣人,教授,工学博士,E-mail:liyimingmin@cqu.edu.cn。

window wall to spandrel wall is less than 1.0, the window wall will failure firstly and the window wall destruction will lead to faster structure collapse. 5 tabs, 11 figs, 20 refs.

**Key words:** structure engineering; masonry structure; simulation analysis; anti-collapse performance; tie-column; ANSYS/LS-DYNA

## 0 引言

日本关东大地震及中国汶川地震的统计结果说明:砌体结构在地震中极易损毁,在震区应逐渐淘汰<sup>[1-3]</sup>。但砌体结构与中国大部分地区经济发展状况和施工技术水平相适应,仍将是近期常被使用的结构形式。由于砌体材料本身的缺陷导致结构延性较差,故地震中易发生倒塌破坏<sup>[4]</sup>。根据砌体结构倒塌部位不同,可分为:全部倒塌、上部倒塌、下部倒塌、中间层倒塌和局部倒塌,汶川地震就出现了上述几种倒塌形式<sup>[5]</sup>。

目前,主要有东京大学、纽约州立大学和清华大学等对钢筋混凝土结构的倒塌进行仿真分析<sup>[6-10]</sup>;桥梁结构倒塌模拟也在相关文献中有体现<sup>[11-12]</sup>。在砌体倒塌模拟分析上:刘海卿等通过 ANSYS/LS-DYNA 再现整个结构的倒塌过程,分析部分因素对结构倒塌的影响,分析了影响倒塌的关键技术<sup>[13]</sup>。林旭川等运用 MSC. MARC 自行编制单元生死控制子程序杀死失效单元模拟结构倒塌<sup>[14]</sup>。彭斌等用三维离散体单元模拟砌体结构的倒塌反应<sup>[15]</sup>。Bocca 等根据砌块可能发生破坏的实际情况,提出离散裂缝模型和分布裂缝模型模拟倒塌<sup>[16]</sup>。由于对砌体倒塌模拟较少,而进行原型和缩尺试验不符合经济性原则。因此,计算机仿真模拟倒塌具有重要的意义。为此,本文通过 ANSYS/LS-DYNA 实现砌体结构地震倒塌过程的仿真模拟,利用图片及动画等后处理方式对结构变形、破坏、倒塌的分析结果进行仿真输出,起到了数字振动台的作用,并在此基础上,分析不同因素对砌体结构抗倒塌性能的影响。

## 1 砌体倒塌仿真的研究方法、材料模型和本构模型

结构倒塌分析方法有:无网格法、散体单元法和有限单元法等<sup>[17-19]</sup>。对倒塌的不定边界问题采用无网格法来分析时,计算机条件难以实现。散体单元法又名离散单元法,三维连续体离散单元模型的本构关系模型难建立,数据结构复杂,对计算机要求很高。非线性动力有限元法是进行倒塌模拟的常用数值分

析方法。本文采用显式积分非线性动力有限元法对砌体结构倒塌进行模拟,加上计算机可视化模拟后处理技术,可很好地实现倒塌全过程仿真。

ANSYS/LS-DYNA 中常用来模拟钢筋混凝土的材料模型,是 3 号通用的弹塑性材料模型(\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC)。它拥有一些材料通用的参数,如定义好材料的失效准则,一般的弹塑性模型能够很好地模拟地震作用。砌体和混凝土是类似的脆性材料,本构关系曲线也较为相似。本文现浇钢筋混凝土构件和砌体均采用 3 号弹塑性材料模型。砌体、混凝土材料通常是受拉失效,可以根据关键字 \*MAT\_ADD\_EROSION 来定义材料的破坏准则,选择第一强度理论(即定义失效主应变)来判断材料是否失效。地震作用下,砌体结构的倒塌接触碰撞比较复杂,不仅存在结构自身的接触碰撞,也存在结构与地面的接触碰撞。分析时采用定义简单、求解时间少的单面自动接触方式。

本构关系是结构的基本力学性能之一,不同研究者对不同的材料提出了不同的受压应力-应变的表达式。对比各种应力-应变关系,砌体采用刘桂秋等提出的应力-应变曲线<sup>[20]</sup>,见下页图 1,表达式见式(1)、式(2)。混凝土单轴受压应力-应变曲线采用美国 Hognestad 建议的模型,见下页图 2,表达式如式(3)、式(4)。

$$\frac{\sigma}{f_m} = 1.96\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right) - 0.96\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2 \quad 0 \leq \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \leq 1 \quad (1)$$

$$\frac{\sigma}{f_m} = 1.2 - 0.2 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad 1 \leq \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \leq 1.6 \quad (2)$$

$$\frac{\sigma}{f_m} = 2.0\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right) - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2 \quad \epsilon \leq \epsilon_0 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma}{f_m} = 1 - 0.15 \frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_u - \epsilon_0} \quad \epsilon_0 \leq \epsilon \leq \epsilon_u \quad (4)$$

式中: $\sigma$  为砌体或混凝土的应力; $f_m$  为砌体或混凝土的抗压强度平均值; $f_c$  为混凝土抗压强度; $\epsilon$  为砌体或混凝土的应变; $\epsilon_0$  为峰值应变; $\epsilon_u$  为极限应变。

## 2 倒塌仿真与影响因素分析

### 2.1 结构模型

砌体结构模型为 3 层,层高 3 m,墙厚 240 mm,烧结普通砖和混合砂浆砌筑;现浇板厚 100 mm,板配筋

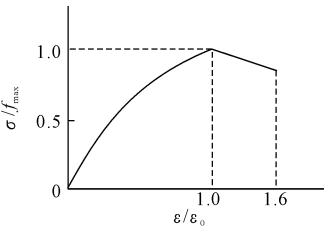


图 1 砌体受压应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of masonry structure in compression

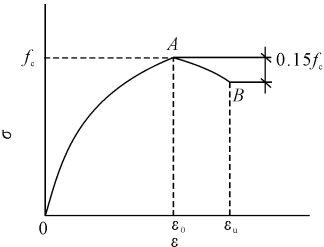
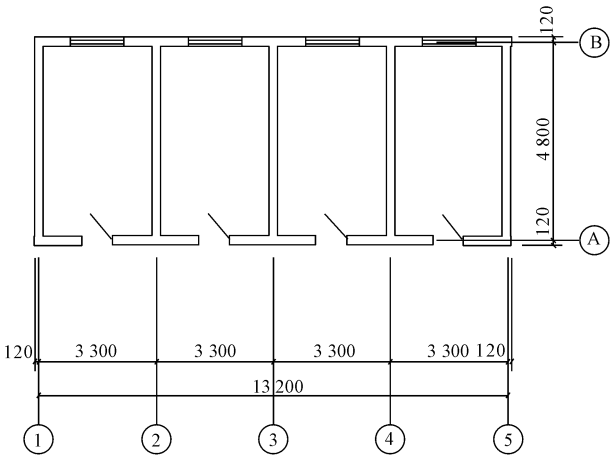


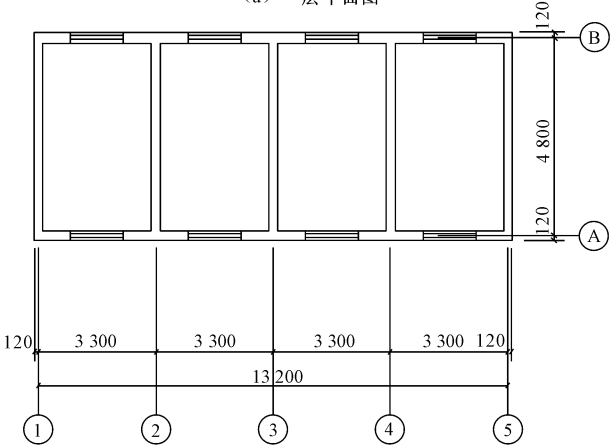
图 2 Hognestad 建议的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve suggested by Hognestad

率为 1%。构造柱和板的混凝土强度等级为 C20,构造柱纵向钢筋采用 4Φ14;模型平面图见图 3。采用等效密度法考虑结构荷载,活载标准值:楼面为 2.0 kN/m<sup>2</sup>,屋面为 0.5 kN/m<sup>2</sup>;恒载标准值:墙、板自重由程序计算,装修为 1.5 kN/m<sup>2</sup>,屋面为 2.0 kN/m<sup>2</sup>,墙面抹灰为 0.8 kN/m<sup>2</sup>。且将墙体与现浇板、构造柱等固接在一起,相互变形耦合,相当于考虑了较强的拉结筋作用,故模型中均不设拉结筋。为了研究不同因素对砌体结构在地震作用下抗倒塌性能的影响,在基础模型上变换参数,设计多个模型,结构模型概况见表 1。



(a) 一层平面图



(b) 标准层平面图

单位: mm

图 3 模型建筑平面简图

Fig. 3 Architecture layout of model

表 1 模型概况

Tab. 1 Overview of model

模型序号	构造柱	砌体强度等级	窗洞尺寸/m		门洞尺寸		抗震设防水平/度
			长	宽	宽	高	
1	无	MU10,M5	1.5	1.5	0.9	2.4	不满足抗震设防要求
2	四角设构造柱						6
3	隔开间纵横墙交接处						8
4	隔开间纵横墙交接处	MU10,M2.5	1.5	1.5	0.9	2.4	不满足抗震设防要求
5		MU10,M7.5					8
6	无	MU10,M5	1.2	1.2	0.9	2.1	不满足抗震设防要求
7	四角设构造柱						6
8	隔开间纵横墙交接处						8
9	隔开间纵横墙交接处	MU10,M5			0.9	1.5	8
10					1.2	1.2	

2.2 构造柱对砌体结构抗倒塌性能的影响及倒塌仿真结果

历次震害表明构造柱对防止砌体结构的倒塌有很大作用,可以影响结构的破坏模式、应力分布及倒

塌过程。在考虑构造柱的影响时选 2 组模型:一组是模型 1、模型 2、模型 3;二组是模型 6、模型 7、模型 8。对各模型输入不同峰值加速度进行分析,对破坏模式的影响见下页表 2。由表 2 可知:无构造柱模

型在 100 cm/s<sup>2</sup> 地震作用下最先倒塌;房屋四角设置构造柱的模型在 220 cm/s<sup>2</sup> 地震作用下倒塌;隔开间设置构造柱的模型在 310 cm/s<sup>2</sup> 地震作用下保持基本完好。表明按抗震设防要求设置构造柱且强度储备足够的砌体结构,基本上都能实现“大震不倒”的设防目标。无构造柱约束砌体结构,即使小震下有很大强度储备,也不能实现“大震不倒”的设防目标。

表 2 不同地震作用下的最终破坏形态

Tab. 2 Eventual failure mode under different earthquake actions

模型 序号	峰值/(cm·s <sup>-2</sup> )					
	56	100	220	310	400	520
1	轻微破坏	倒塌	倒塌	倒塌	倒塌	倒塌
2	未分析	轻微破坏	倒塌	倒塌	倒塌	倒塌
3	未分析	未分析	完好	基本完好	倒塌	倒塌
6	轻微破坏	倒塌	倒塌	倒塌	倒塌	倒塌
7	未分析	轻微破坏	倒塌	倒塌	倒塌	倒塌
8	未分析	未分析	完好	基本完好	中等破坏	倒塌

有无构造柱约束的砌体结构倒塌过程及方式存在一定差异,以模型 1 和模型 3 来对比分析,倒塌过程如图 4、图 5 所示。模型 1、模型 3 在 1.73 s 左右在结构底层门窗角部都出现斜裂缝,结构进入损伤耗能阶段,模型 1 在 3.03 s 开始倾斜垮塌,结构在 3.53 s 底层已经完全倒塌;模型 3 在 2.33 s 在自重作用下开始侧向倾倒,3.36 s 的破坏模式与模型 1 在 2.66 s 时相似,底层结构在 4.70 s 时完全倒塌。可见,在开裂前构造柱对墙体的刚度影响不大,不能避免或延缓墙体开裂,在开裂至发生严重破坏阶段。由于构造柱有一定的承载能力且约束了墙体,避免了墙体酥松散落,加强了砌体结构的整体性,从而使墙体能够继续支承一定的竖向荷载,防止整个结构发生瞬间倒塌,提高了结构变形耗能能力,延缓砌体结构的倒塌。

2.3 块体密度对砌体结构抗倒塌性能的影响及倒塌仿真结果

烧结多孔砖密度(1 800 kg/m<sup>3</sup>)相对普通砖小,将模型 1、模型 2、模型 3 中砌块改为烧结多孔砖,其他参数不变,分别称模型 1\*、模型 2\* 和模型 3\*。图 6 比较了使用不同块体的砌体结构发生倒塌与输入加速度峰值的关系。在 100 cm/s<sup>2</sup> 地震作用下模型 1\* 比模型 1 稍有延缓。在 220 cm/s<sup>2</sup> 地震作用下,模型 2 倒塌,模型 2\* 轻微破坏;在 400 cm/s<sup>2</sup> 地

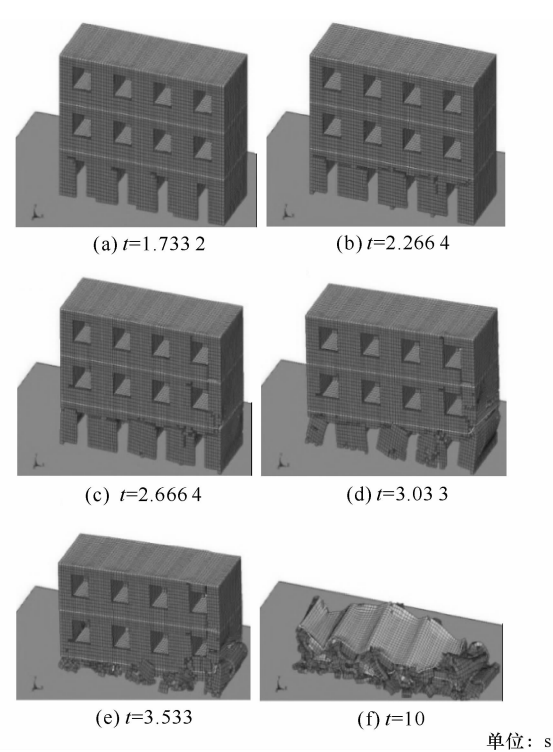


图 4 模型 1 的倒塌过程

Fig. 4 Collapse process of model 1

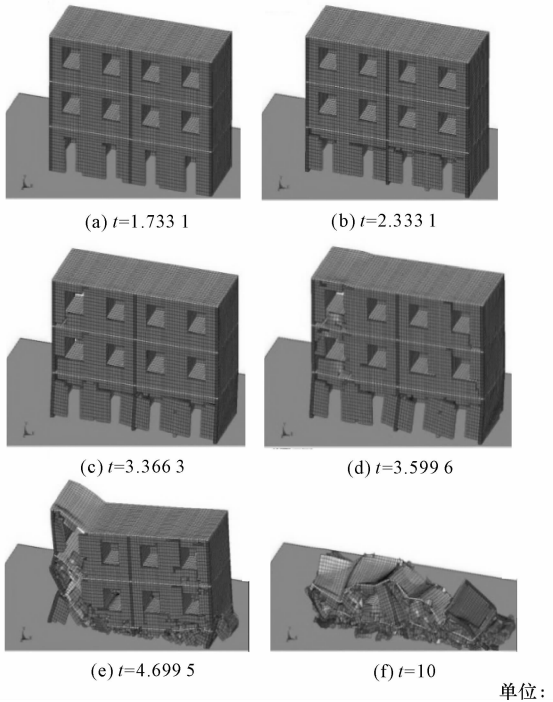


图 5 模型 3 的倒塌过程

Fig. 5 Collapse process of model 3

震作用下,模型 3 倒塌,模型 3\* 轻微破坏,在 8 度(0.20 g)大震作用下实现了“大震不倒”的设防目标。原因是烧结多孔砖相对普通砖轻,使砌体结构

质量减轻,所受地震作用减小,在一定程度上限制了结构的倒塌。

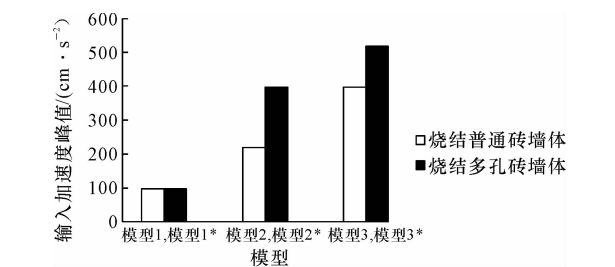


图 6 倒塌与输入加速度峰值的关系  
Fig. 6 Relationship between input peak acceleration and collapse

倒塌过程表明,当遭受强烈地震作用,使用较轻块体也不能避免砌体结构倒塌,对比模型 2 和模型 2\* 在  $400\text{ cm/s}^2$  地震作用下的倒塌过程如图 7、图 8 所示。模型 2 和模型 2\* 底层墙体裂缝分别在  $2.33\text{ s}$ 、 $5.03\text{ s}$  时贯通,结构分别在  $3.13\text{ s}$ 、 $5.67\text{ s}$  开始发生大面积倒塌,底层结构分别在  $4.4\text{ s}$ 、 $6.9\text{ s}$  时完全倒塌。说明较轻的烧结多孔砖墙体在强震下可以延缓砌体结构的倒塌。

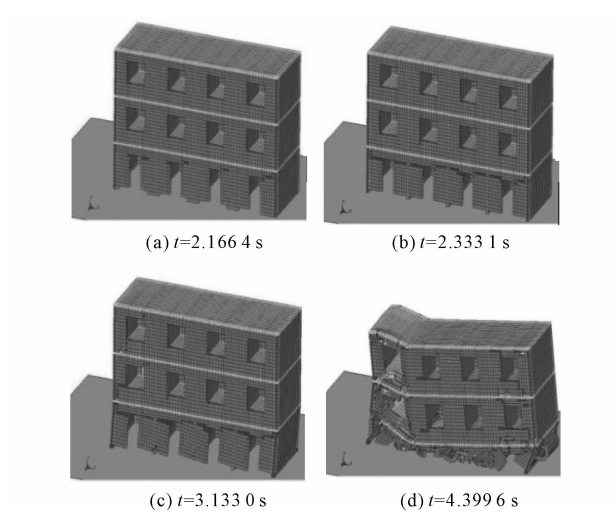


图 7 模型 2 的倒塌过程  
Fig. 7 Collapse process of model 2

## 2.4 砂浆强度对砌体结构抗倒塌性能的影响

砌体墙由砌块和砂浆组成,地震中墙体大多由于砂浆强度不足导致墙体破坏,甚至整个结构的破坏和倒塌。选取砂浆强度等级分别为 M5、M2.5 及 M7.5 块体强度相同的模型 3、模型 4、模型 5,对比砂浆强度的影响。表 3 给出了 3 个模型在不同地震作用下的最终破坏形态。在  $220\text{ cm/s}^2$  地震作用下,模型 4 倒塌,模型 3 和模型 5 保持基本完好;在  $400\text{ cm/s}^2$  地震作用下,模型 3 和模型 4 倒塌,模型 5 有中等破坏;在

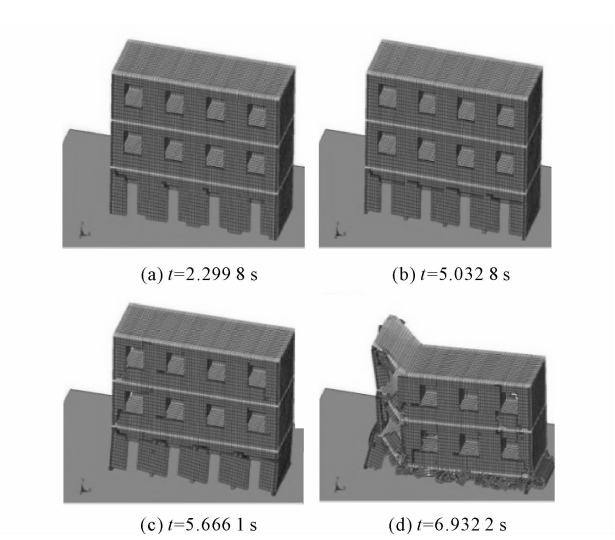


图 8 模型 2\* 的倒塌过程  
Fig. 8 Collapse process of model 2\*

$520\text{ cm/s}^2$  地震作用下,3 个模型均倒塌。砂浆强度对结构自振频率的影响如图 9 所示。相对模型 4,模型 3 和模型 5 的第 1 自振频率分别提高了  $10\%$  和  $19.5\%$ ,第 2 自振频率分别提高了  $8.4\%$  和  $14.3\%$ 。分析可知,砂浆强度相对越高,砌体结构更难倒,提高砂浆强度可以提高结构的抗倒塌能力。随着砂浆强度的逐渐增加,提高的幅度有所减缓,同时砂浆强度对结构的动力特性有一定的影响。

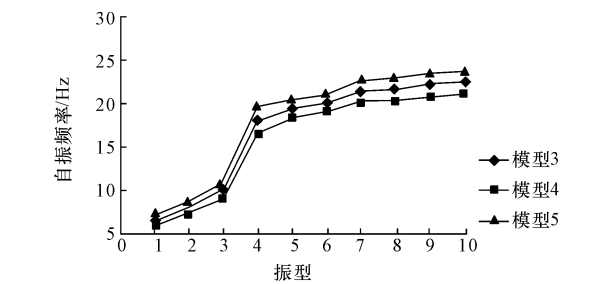


图 9 砂浆强度对结构自振频率的影响  
Fig. 9 Effect of mortar strength on natural vibration frequency

表 3 不同地震作用下的最终破坏形态

Tab. 3 Eventual failure modes under different earthquake actions		峰值/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ )				
模型序号		100	220	310	400	520
3	未分析	完好	基本完好	倒塌	倒塌	倒塌
4	轻微破坏	倒塌	倒塌	倒塌	倒塌	倒塌
5	未分析	完好	完好	轻微破坏	倒塌	倒塌

## 2.5 开洞率对砌体结构抗倒塌性能的影响

砌体结构墙体开洞后削弱了墙体截面刚度,也减弱了混凝土构造柱对结构的约束作用,使整个结构的承载力显著下降。以模型 3 和模型 8 为例,分析开洞

率对砌体结构抗倒塌性能的影响。模型 3 和模型 8 的窗洞分别为  $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 、 $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ ，图 10 为加速度峰值为  $220\text{ cm/s}^2$  时，模型 3 和模型 8 在  $t=2.27\text{ s}$  时的最大主应力分布云图。模型 3 大部分门窗角部均受到较大拉应力，特别是底层门洞角部最大拉应力达到  $1.07\text{ MPa}$ ；而模型 8 受力相对均，仅在少部分门窗角部受到较大拉应力，底层门洞角部最大拉应力为  $0.7\text{ MPa}$  左右。由此可知，在其他条件均相同的条件下，开洞率较大砌体结构门窗洞口处受到相对更大的拉应力，破坏程度相对较严重。

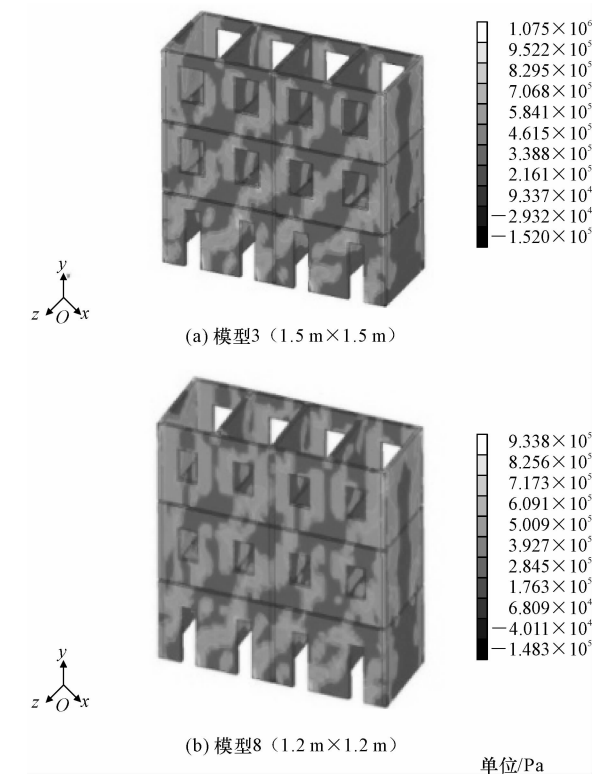


图 10 最大主应力分布云图( $t=2.27\text{ s}$ )  
Fig. 10 Distributing nephogram of maximum principal stress at 2.27 s

图 11 为计算模型未发生倒塌前  $t=2.66\text{ s}$  时刻的最大层间位移角，窗洞为  $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$  的模型 1、模型 2 和模型 3，相对窗洞为  $1.2\text{ m}\times 1.2\text{ m}$  的模型 6、模型 7 和模型 8 的最大层间位移角大。即在相同地震作用下，墙体开洞率越小，结构变形越小，减小开洞率有利于提高砌体结构的变形能力。这是由于增大开洞面积会减小结构的刚度，削弱构造柱对墙体的约束作用。

2.6 窗间墙与窗下墙刚度比对砌体结构抗倒塌性能的影响

为避开开洞不均匀及上下层刚度不均所带来的影

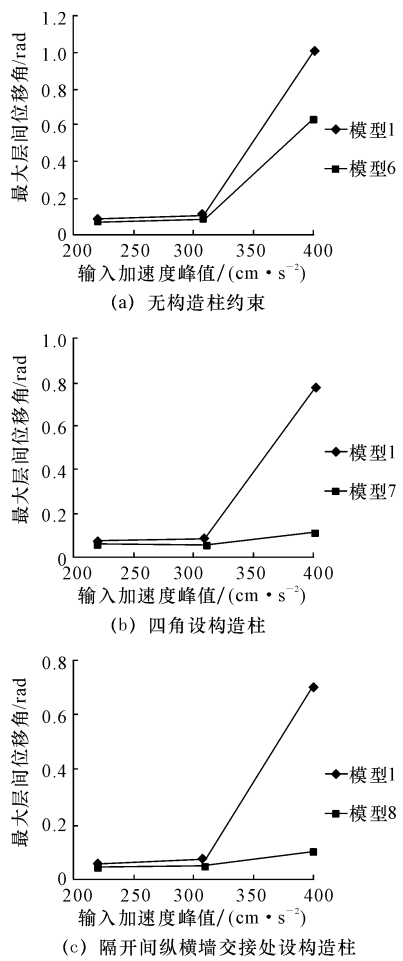


图 11 最大层间位移角的比较  
Fig. 11 Comparison of maximum story-drift angles

响，设计模型 9 和模型 10，其开洞率分别为  $13.64\%$  和  $14.55\%$ 。模型 9 的中部无构造柱窗间墙、中部带构造柱窗间墙、边窗间墙、窗下墙的刚度值分别为  $3.07\times 10^8$ 、 $3.76\times 10^8$ 、 $1.82\times 10^8$ 、 $3.74\times 10^8\text{ N/m}$ ；模型 10 的这些刚度值分别为  $3.36\times 10^8$ 、 $4.23\times 10^8$ 、 $2.19\times 10^8$ 、 $3.27\times 10^8\text{ N/m}$ 。模型中一道含有窗洞纵向墙体的窗间墙与窗下墙的刚度比值以及无构造柱的单片窗间墙与窗下墙刚度的比值计算结果见表 4。

表 4 窗间墙与窗下墙的刚度比值  
Tab. 4 Stiffness ratios of window wall to spandrel wall

模型序号	窗间墙刚度的和/ ( $10^8\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	窗下墙刚度的和/ ( $10^8\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	刚度比	
			窗间墙与窗下墙	单片窗间墙与窗下墙
9	13.54	14.96	0.905	0.821
10	15.33	13.08	1.172	1.028

窗间墙与窗下墙刚度比对砌体结构发生倒塌时间及倒塌速度有影响，结果见下页表 5。模型在  $520\text{ cm/s}^2$

地面加速度作用下均发生倒塌,模型 9 和模型 10 窗间墙与窗下墙的刚度比分别为 0.905 和 1.172,开始倒塌的时间分别为 3.06 s 和 4.20 s。模型 9 相对模型 10 更易倒塌,模型 9 窗间墙与窗下墙的刚度比小于 1,在地震作用下窗间墙先坏;模型 10 则相反,窗下墙先破坏。在水平地震作用下,窗下墙发生破坏解体后,内力重分布,此时窗间墙和其上下的墙体共同抗震,结构不会瞬间坍塌,结构更多地呈现延性破坏;窗间墙是竖向的连续墙体,当其在水平地震作用下破坏后,结构的承载能力迅速下降,导致整体结构的倒塌,结构更多呈现脆性破坏。窗下墙先破坏对延缓砌体结构倒塌更有利。

表 5 仿真计算结果  
Tab. 5 Simulation results

模型序号	开裂时间/s	开始倒塌时间/s	底层完全倒塌时间/s
9	1.76	3.06	4.76
10	1.76	4.20	5.46

3 结 语

- (1)在 LS-DYNA 软件中,选择合适的材料模型,设定合理的材料失效准则及其他参数,引入接触与碰撞算法,能较好地对砌体结构进行地震倒塌过程的仿真,相当于数字振动台。
- (2)砌体结构倒塌过程模拟表明,门窗洞口处易出现应力集中,所以砌体结构从门窗洞口四角处开始发生破坏,当继续受到地震荷载时,底层出现整体破坏甚至倒塌。
- (3)构造柱能提高砌体结构的变形能力和整体性,延缓结构倒塌;砂浆强度主要从承载力角度影响结构的抗倒塌性能;对于开洞墙体,开洞率越大,整个结构的承载力下降越多,越易倒塌;块体强度一定时,密度相对较小可以提高结构抗震承载力,利于抗倒塌;窗间墙与窗下墙的刚度比会影响墙体破坏的次序,当窗间墙与窗下墙的刚度比小于 1.0 时,窗间墙先于窗下墙破坏,而窗间墙的破坏会使结构承载力迅速下降,倒塌更迅速。
- (4)根据影响因素分析建议,砌体结构在满足设置构造柱、圈梁等构造措施的基础上,还应保证小震下的强度储备不能过少;设计中可以适当提高砂浆

强度,尽量减少开洞率,优先选择密度较小块体,保证窗间墙与窗下墙的刚度比在 1.0 以上。

参考文献:  
References:

[ 1 ] 施楚贤.砌体结构理论与设计[M].第 2 版.北京:中国建筑工业出版社,2003.  
SHI Chu-xian. Theory and design of masonry structure [M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press,2003. (in Chinese)

[ 2 ] 吴振波,周献祥,谢伟,等.汶川地震建筑震害调查统计与抗震设计思考[J].建筑结构,2010,40(增):144-148.  
WU Zhen-bo,ZHOU Xian-xiang,XIE Wei,et al. Statistics of Wenchuan earthquake investigation and some ideas on seismic design of buildings[J]. Building Structure,2010,40(S):144-148. (in Chinese)

[ 3 ] 彭建兵,马润勇,范文,等.汶川大震的科学思考[J].地球科学与环境学报,2008,30(1):1-29.  
PENG Jian-bing,MA Run-yong,FAN Wen,et al. Science contemplation for Wenchuan earthquake of 12 May,2008[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2008,30(1):1-29. (in Chinese)

[ 4 ] 谢和平,邓建辉,李碧雄.四川芦山地震灾害调查与灾后重建的相关问题分析[J].地球科学与环境学报,2013,35(2):1-7.  
XIE He-ping,DENG Jian-hui,LI Bi-xiong. Inverstigation of Lushan earthquake disasters and analysis of related problems during post-quake reconstruction in sichuan[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2013,35(2):1-7. (in Chinese)

[ 5 ] 李英民,刘立平.汶川地震建筑震害与思考[M].重庆:重庆大学出版社,2008.  
LI Ying-min,LIU Li-ping. Disaster investigation and study report of Sichuan Wenchuan earthquake [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2008. (in Chinese)

[ 6 ] Motohiko H,Kimiro M. Simulation of concrete frame collapse due to dynamic loading [J]. Journal of Engineering Mechanics,1993,119(9):1709-1723.

[ 7 ] Sivaselvan M V,Reinhorn A M. Nonlinear structural

- analysis towards collapse simulation-a dynamical systems approach[D]. New York: State University of New York, 2003.
- [8] 江见鲸, 贺小岗. 工程结构计算机仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- JIANG Jian-jing, HE Xiao-gang. Computer simulation of engineering structure[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996. (in Chinese)
- [9] 冯世平, 沈聚敏. 钢筋混凝土框架结构的地震倒塌反应[J]. 地震工程与工程振动, 1989, 9(1): 67-78.
- FENG Shi-ping, SHEN Ju-min. Collapse earthquake responses of reinforced concrete frame structures[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1989, 9(1): 67-78. (in Chinese)
- [10] 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 Xin-zheng, JIANG Jian-jing. Dynamic finite element simulation for the collapse of world trade center [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 8-10. (in Chinese)
- [11] Limin S, Cen Z, Dong Q, et al. Application of extended distinct element method with lattice model to collapse analysis of RC bridges [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 2003, 32(13): 1217-1236.
- [12] Cavicchi A, Gambarotta L. Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch-fill interaction [J]. Engineering Structures, 2005, 27(4): 605-615.
- [13] 刘海卿, 倪镇国, 欧进萍. 强震作用下砌体结构倒塌过程仿真分析[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(5): 38-42.
- LIU Hai-qing, NI Zhen-guo, OU Jin-ping. Simulation analysis of the collapse response of masonry structures subjected to strong ground motion [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(5): 38-42. (in Chinese)
- [14] 林旭川, 陆新征, 叶列平. 砌体结构的地震倒塌模拟与分析: 汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告 [R]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- LIN Xu-chuan, LU Xin-zheng, YE Lie-ping. Simulation on collapse and analysis of masonry structures subjected to ground motion; disaster investigation and reconstruction report of sichuan Wenchuan earthquake [R]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [15] 彭 斌, 顾祥林, 苗吉军, 等. 砌体结构倒塌反应的图形仿真技术[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(10): 1304-1309.
- PENG Bin, GU Xiang-lin, MIAO Ji-jun, et al. Graphic simulation technology for collapse response analysis of masonry structures [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(10): 1304-1309. (in Chinese)
- [16] Bocca P, Carpinteri A, Valente S. Fracture mechanics of block masonry: size effects and snap-back analysis [J]. Materials and Structures, 1989, 22(2): 364-373.
- [17] Belytschko T, Lu Y Y, Gu L. Element-free galerkin methods [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1994, 37(2): 229-256.
- [18] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems [C] // Cundall P A. Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics. Nancy: Springer, 1971: 2-8.
- [19] Turner M J, Clouge R W, Martin H C, et al. Stiffness and deflection analysis of complex structures [J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1956, 23(9): 805-823.
- [20] 刘桂秋. 砌体结构基本受力性能的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- LIU Gui-qiu. Research on the basis mechanical behavior of masonry structure [D]. Changsha: Hunan University, 2005. (in Chinese)

