

## 砌体结构的地震倒塌模拟与分析

林旭川, 陆新征, 叶列平

(清华大学土木工程系, 北京, 100084)

**摘要:** 四川汶川地震中大量砌体结构倒塌, 造成严重人员伤亡。为研究和预防砌体结构震害, 本文通过有限元自体接触算法和生死单元控制实现了纵墙承重砌体结构的倒塌模拟。并通过 6 个不同算例, 对影响砌体结构地震倒塌的各种关键因素, 如结构形式、材料强度、构造措施和地震动形式等进行了分析, 总结了不同的结构倒塌模式。仿真算例表明, 纵墙强度、圈梁、构造柱、廊柱等对结构抗震性能具有重要影响, 对于靠近震中的结构, 竖向地震的影响不可忽略。本文的研究为深入分析砌体结构倒塌, 提高其抗震性能研究提供了参考。

**关键词:** 砌体结构, 倒塌模拟, 有限元, 自体接触, 抗震措施

### 1 概述

四川汶川地震达 8.0 级, 砌体结构的震害最为严重, 在各类结构形式中倒塌的比例也最大, 其中有不少是学校教学楼, 如聚源中学、盖华中学、南坝镇小学等, 均出现整座教学楼完全垮塌的现象, 造成极为严重的人员伤亡。本研究基于有限元数值模型, 采用自体接触和非线性单元的生死控制, 对典型砌体结构的倒塌过程进行了模拟。通过 6 个不同算例, 对影响砌体结构倒塌的各种关键因素, 如倒塌机制、结构体系、抗震构造措施、材料强度等因素进行了讨论, 为深入的分析砌体结构的倒塌, 提高其抗震性能研究提供参考。

### 2 分析模型与仿真方法

#### 2.1 模型参数

分析以带外走廊、大开间、纵墙承重的三层预制楼板的典型砌体结构为例。基本模型见图 1, 结构层高 3000mm, 每层 3 个房间, 尺寸为 8m×6m, 外挑走廊宽 1.2m。每个房间走廊一侧纵墙有两个门洞(900mm×2400mm)和一个窗洞(1800mm×1500mm), 如图 1(a), 无走廊的一侧纵墙有三个窗洞(1800mm×1500mm), 如图 1(b)。

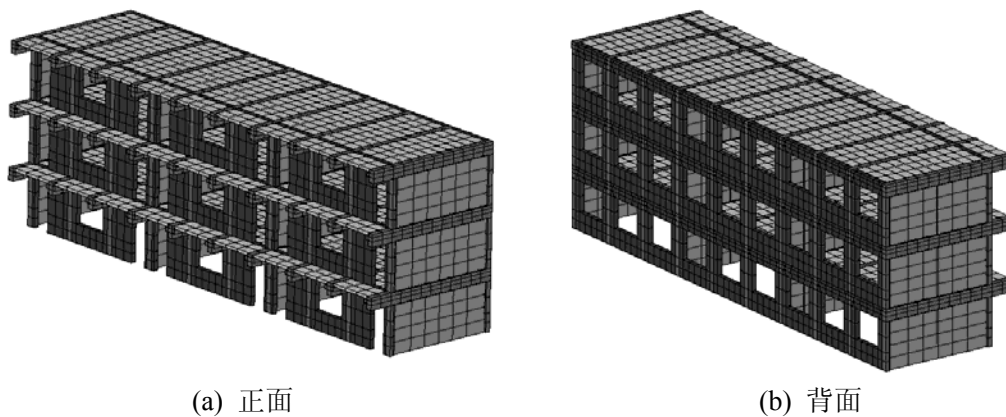


图 1 教学楼结构模型图

结构的传力路径为: 竖向楼面荷载由预制板传递给进深梁, 再由梁传递给纵墙; 水平地震作用由两个方向的横墙和纵墙分别抵抗。为了分别研究各因素(包括材料强度、圈梁、构造柱、廊柱、楼板拉结措施、地震波方向等)对结构倒塌模式的影响, 本研究设计了多个算例分别进行计算分析, 具体见如表 1。

表 1 分析算例参数比较

算例 参数	Case1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
墙体强度(MPa)	2.5	4	2.5	2.5	2.5	2.5
圈梁、构造柱	无	无	有	无	无	无
廊柱	无	无	无	有	无	无
地震波方向	纵向	纵向	纵向	纵向	纵向+ 横向	纵向+横向 +竖向
楼板拉结	无	无	无	无	无	无
算例分析因素	参照算例	墙体强度	圈梁构造柱	廊柱	地震动	

## 2.2 倒塌模拟原理与计算

结构倒塌模拟是一个从连续体向非连续体转变的复杂数值过程,要求数值模型既能较好的考虑发生倒塌前结构各项行为,又能反映在部分构件破坏后,结构碎片的刚体位移以及破损块体部分之间的相互接触、碰撞等行为,因此对数值模型提出了很高的要求,国内外学者已进行了大量研究<sup>[1-10]</sup>,并在非连续数值模型基础上(离散元法, DDA 法等)进行了一些倒塌的模拟<sup>[11-14]</sup>。文献[15]曾用刚体离散单元模型对砌体结构的倒塌进行了分析,取得了一定的效果,但是由于非连续数值方法在准确计算复杂三维结构进入倒塌阶段前受力行为上存在一定困难,故在模拟实际工程的倒塌前后的情况还存在一些不足。

基于有限元法并考虑单元非线性(单元生死)和接触非线性的数值模型,则可以较好模拟结构进入倒塌阶段前的受力行为,对倒塌早期阶段的模拟也可满足工程要求,且有大量的已有程序和代码支持<sup>[16]</sup>,具有更好的通用性。本研究采用非线性能力较强的通用有限元软件 MSC.MARC 进行分析,采用接触算法及非线性(生死)单元,以实现结构倒塌过程的模拟。倒塌模拟的实现方法如下:

(1) 为实现塌落构件的撞击、堆载过程,采用接触算法,将结构各个部件之间设置为接触关系,将构件内部单元设置为自体接触;

(2) 为实现构件失效、塌落过程,运用 MSC.MARC 提供的用户子程序接口,自行编制单元生死控制子程序以杀死最大应变超出预定限值的单元(墙体压碎应变和拉碎应变均取 0.00125,钢筋拉断应变取 0.01,预制板和梁不考虑单元生死)。

模型主要采用实体单元,钢筋采用杆单元。墙体和混凝土梁采用 MSC.MARC 自带的各向同性理想弹塑性的 Von Mises 模型,并考虑开裂影响。砌体墙抗压强度见表 1,开裂强度取 0.5MPa,开裂后软化刚度取-2000MPa;混凝土抗压强度为 20MPa,预制板设为弹性。计算采用动力时程分析,地震波采用为 1940 年的 El Centro 波,并按比例放大得到,纵向最大地面峰值加速度为 400gal,横向为 275gal,竖向为 265gal。

## 3 倒塌模拟结果分析

### 3.1 参照算例 Case 1 震害分析

参照算例 Case 1,基本没有采取任何抗震措施,在 400gal 地面加速度作用下,快速倒塌。其倒塌过程如下:

(1) 0.70s,第二层、第三层边上一侧房间对应位置的梁下墙体先后损毁,其上部支承的混凝土梁开始下落,如图 2(a);

(2) 0.90s,垮塌的梁带动周围预制板一起下落,预制板的下落导致其相邻的梁失去侧向支撑,在地震作用下向掉落预制板一侧发生偏移,如图 2(b);

(3) 1.0s,发生侧移的梁又导致其上下的墙体损毁、倒塌,如图 2(c);

(4) 墙体垮塌后,导致其他墙体压力增大,引发结构连续倒塌,1.5s 后已出现大面积垮塌,如图 2(d)。

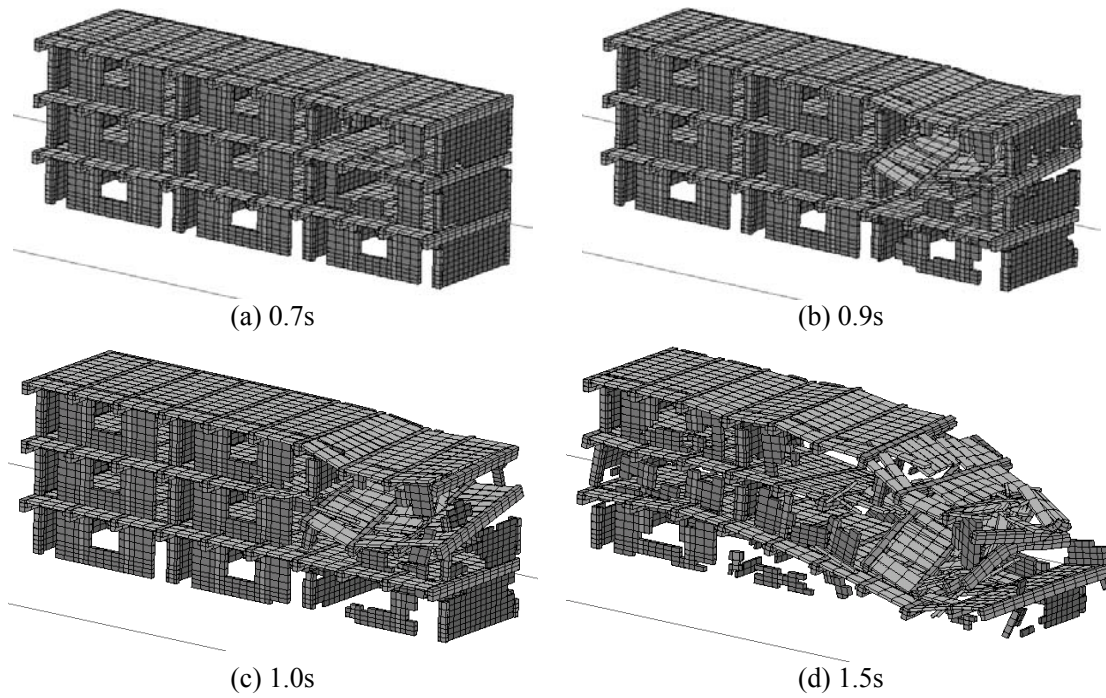


图 2 Case 1 倒塌过程

另外, 倒塌前还发现, 梁下部和门窗角部开裂较严重。梁下部开裂是由于梁在水平力作用下有发生转动的趋势, 会导致周围砖墙开裂; 而门窗角部开裂是由于角部应力集中导致。

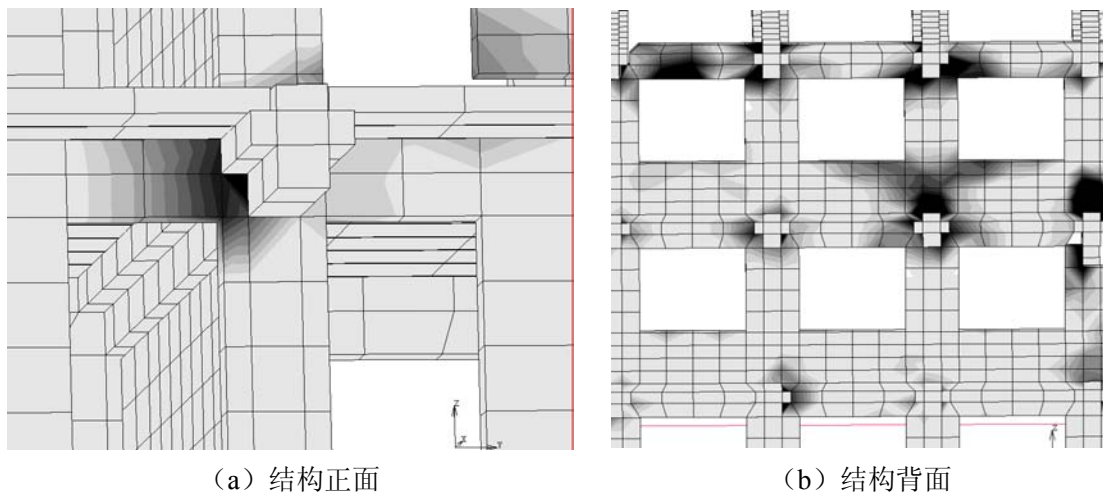


图 3 梁下部及门窗角部开裂 (深色为开裂区域)

### 3.2 墙体强度的影响

Case 2 的墙体强度为 4.0MPa, 比 Case 1 高, 结构的抗倒塌效果提高非常明显。1.5s 时, Case 1 已经大面积垮塌, 而 Case 2 则基本完好 (图 4a), 可见墙体强度的提高可以延缓结构倒塌开始时间。1.7s 时, 首层部分墙体损坏, 有预制板掉落, 上部梁开始塌落 (图 4b)。2.5s 时, 整个首层全部垮塌, 第二层基本丧失承载力 (图 4c)。3.1s 后, 结构完全垮塌 (图 4d)。

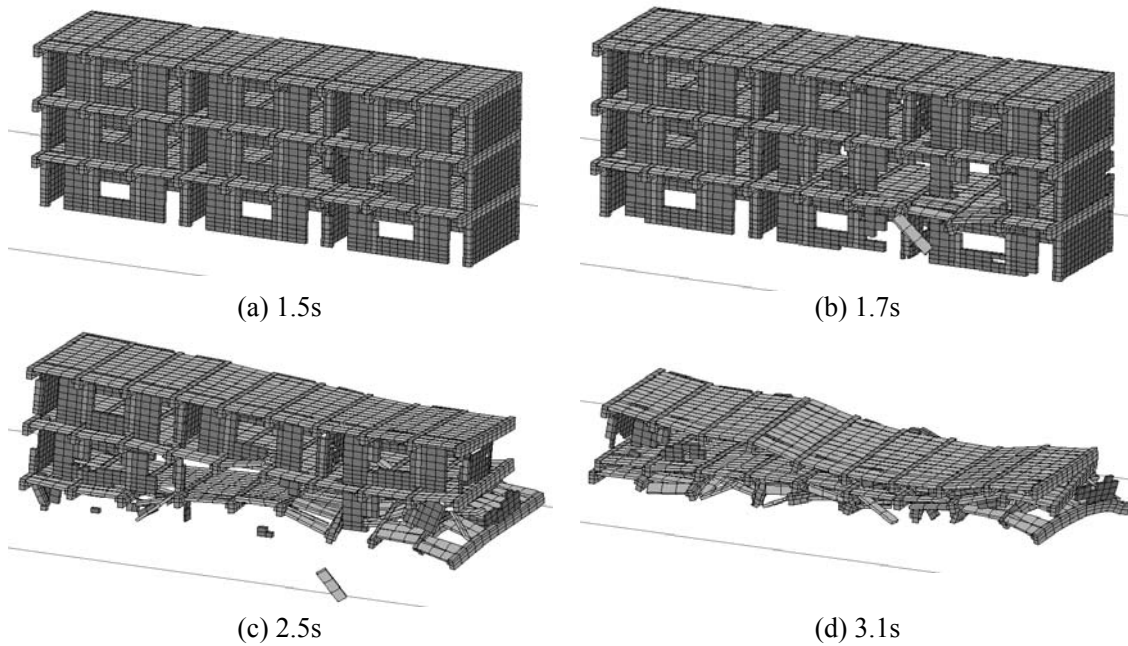


图 4 Case 2 倒塌过程

### 3.3 圈梁和构造柱对抗震性能的影响

Case 3 是在 Case 1 的基础上, 每层楼板位置增设一道圈梁, 每根梁下部设置构造柱, 圈梁和构造柱单元的钢筋和混凝土分别用 MSC.MARC 提供的混凝土本构模型和分离钢筋模型加以模拟。圈梁构造柱使结构具有很好的整体性, 在 3.0s 时, 外侧横墙的梁坠落, 搭在梁上的预制板掉到三层楼板上, 如图 5(a)。之后, 结构没有产生严重损伤, 主要问题是预制板坠落。由此也可看出, 如果不能保证预制楼板的拉结锚固, 则即使保证了墙体质量, 也难以完全避免楼板坠落而引起破坏和伤亡。这次在灾区观察到的雁门中心小学教学楼破坏, 就存在类似现象。

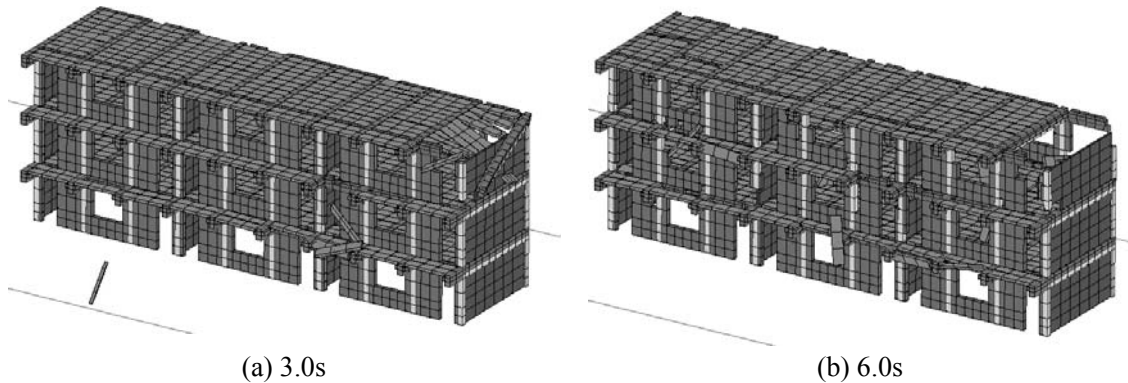


图 5 Case 3 在地震下的损坏

### 3.4 廊柱的影响

Case 4 在 Case 1 基础上, 增加了砖廊柱。2.5s 时, 结构一端的底部墙体丧失承载力, 开始垮塌; 0.7s 后出现明显大面积垮塌, 如图 6。垮塌的特点是, 失效的顺序是由下到上, 结构沿长向梁端损伤更严重。由于砖廊柱的存在, 结构大面垮塌的过程被延后。其原因是: 一方面, 砖廊柱可以分担少量走廊的竖向荷载, 使梁下部墙体损坏的时间延后, 一定程度上改善了结构的抗震性能; 另一方面, 廊柱对梁有一定的约束作用, 可以减少因梁转动而引发的墙体开裂, 但由于是砖柱, 该作用有限。

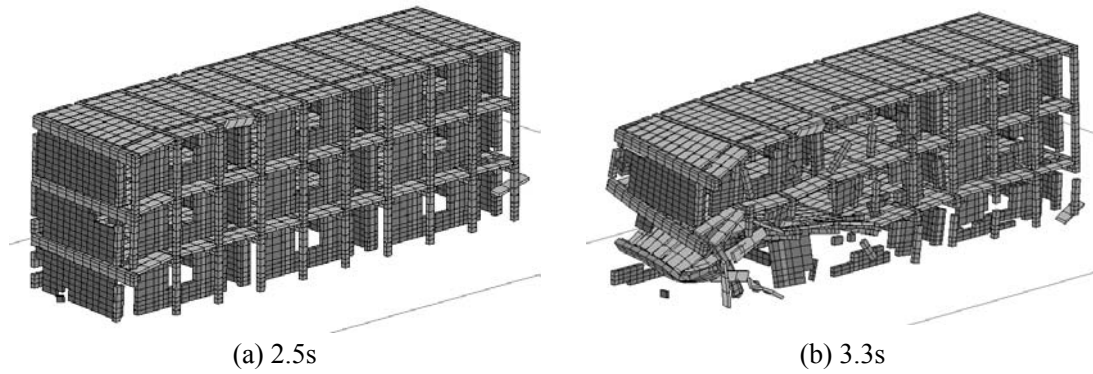


图 6 Case 4 倒塌过程

### 3.5 地震动差异的影响

同一次地震, 由于建筑离震源距离不同, 场地条件不同, 建筑朝向不同, 结构受到的地震动作用也不同。Case 1、Case 5 和 Case 6 输入的地震波形式分别为单向、双向和三向。Case 5 在 0.6s 时底部两层右侧教室纵墙首先出现损伤, 并导致墙体上方的几根梁塌落, 如图 7。Case 6 首次出现破坏的位置为底层纵墙中部, 但后续破坏从三层的纵墙开始, 如图 8。而 Case 1 则在 0.7s 时在二层右侧教室出现损坏。

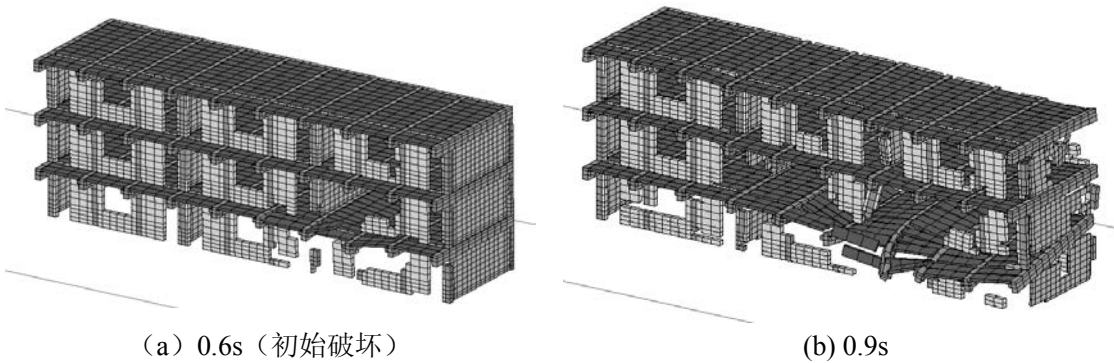


图 7 Case 5 在双向水平地震下的破坏形态

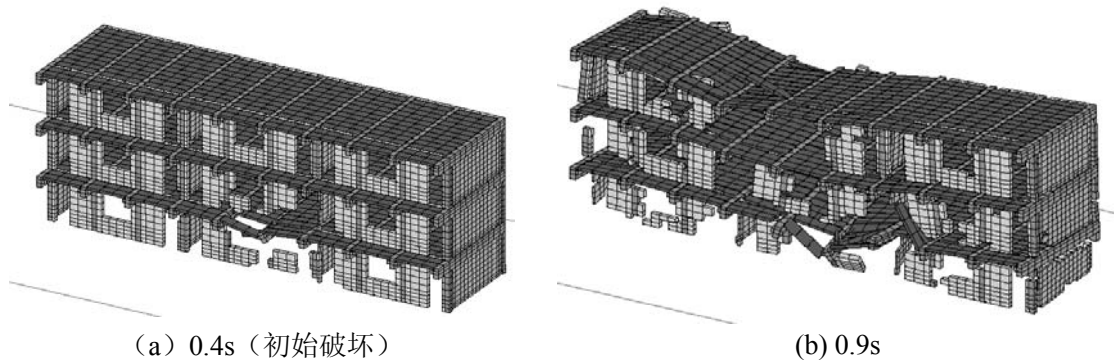


图 8 Case 6 在三向地震作用下的破坏形态

由于砌体墙体和预制楼板构成的结构, 其整体性较差, 在多向地震动作用下结构更容易垮塌, 算例中三向地震作用下的 Case 6 出现明显局部垮塌的时间最早, 而单向地震作用下的 Case 1 则最迟。可见, 竖向地震动对砌体结构的影响比较明显, 由于砌体强度一般较低, 有时不能轻易忽略竖向地震动对结构的影响。

## 4 倒塌破坏模式及各措施比较

根据分析的算例, 砌体结构在罕遇地震作用下主要有以下破坏模式:

1) 连续垮塌模式: 若未设置圈梁、构造柱, 砌体结构的整体性较差, 梁下部的承重纵墙首先出现损伤、垮塌, 损伤的局部墙体将导致其他纵墙进一步损伤, 梁失去足够的支撑而下落, 预制板掉落, 加上纵墙损伤的扩大, 进一步导致周围的梁失去竖向或纵向支持, 引发连续倒塌。尽管连续倒塌的模式沿着: 承重墙→梁→预制板的方向进行, 但是随着地震作用、材料强度、构造措施的不同, 结构各个部分先后垮塌顺序各异, 如逐层垮塌型 (Case 2, 4, 6), 单侧垮塌型 (Case1、Case 4) 等。一般情况下, 结构边缘墙体破坏比中间墙体严重, 底层墙体比上层严重, 这与实际震害调查结果一致。

2) 局部垮塌模式: 结构具有较好整体性, 墙体受到的作用力较均匀, 仅出现预制板掉落或顶层边梁拉结失效而坠落的现象 (Case 3)。一般情况下, 悬挑走廊和结构两侧的预制板最易坠落。这种垮塌模式可以通过增强预制板的拉结来抵抗。

从以上算例可以看出, 提高墙体的强度、设置圈梁和构造柱、设置廊柱等措施都可以提高砌体结构的抗震性能, 但是各种措施的效果不同。显然, 墙体的强度是一个很重要的因素, 但砌体结构刚度大、变形能力小, 在罕遇地震作用下, 通过提高墙体强度是从提高承载力角度出发, 一定程度延缓了结构倒塌, 但无法提高结构整体性和变形能力。设置外廊柱, 可以减小走廊一侧纵墙的压力, 并对上部梁也有约束作用, 从而延缓墙体局部出现损伤坍塌, 但砖柱的碎散性导致这种功能有限。设置圈梁和构造柱是针对砌体结构整体性差的特点, 加强结构的整体性 (当然也提高承载力), 从而显著提高结构抗震性能, 这一措施是最有效的, 本文算例及以往震害都说明了这一点。另外预制板端部可靠拉结对防止预制板坠落有重要影响。

## 5 结论与建议

1) 基于有限元方法, 本文提出了采用自体接触算法和生死单元方法模拟结构构件碎散、堆载过程, 实现了砌体结构在罕遇地震下的倒塌全过程分析。

2) 通过 6 个不同算例的分析, 考查了材料强度、构造措施、廊柱等措施对结构抗震性能影响。提高墙体的强度、设置圈梁和构造柱、设置廊柱等措施都可以提高砌体结构的抗震性能, 其中设置圈梁和构造柱的措施最为有效。

3) 根据算例分析, 砌体结构倒塌次序和破坏程度的不同, 可以分为整体连续倒塌模式和局部倒塌模式。整体倒塌模式是由纵墙失效、坍塌引起的连续倒塌; 局部倒塌主要是边梁或预制板的掉落。

4) 砌体结构整体性相对较差, 建筑离震源距离不同, 场地条件不同, 建筑朝向不同, 结构的倒塌过程也明显不同, 竖向地震对整体性较差结构的影响不可忽略。

5) 本文的仿真表明, 砌体结构应保证纵墙具有足够的强度储备, 并设置必要的圈梁、构造柱, 楼板需采取拉结措施, 梁底部及门洞、窗洞角部应加强和进行构造处理。

## 参考文献

- [1] Lynn, KM, Isobe, D. Structural collapse analysis of framed structures under impact loads using ASI-Gauss finite element method[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF IMPACT ENGINEERING, 34 (9): 1500-1516 SEP 2007
- [2] Lynn, KMf. Finite element code for impact collapse problems of framed structures[J]. INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING 69 (12): 2538-2563 MAR 19 2007
- [3] Pekau, OA; Cui, Y. Progressive collapse simulation of precast panel shear walls during earthquakes[J]. COMPUTERS & STRUCTURES, 84 (5-6): 400-412 JAN 2006.
- [3] Khandelwal, K. and El-Tawil, S., Multiscale Computational Simulation of Progressive Collapse of Steel Frames, Proceedings of the ASCE Structures Congress, May 2005, NY, NY.
- [4] Kaewkulchai, G., and Williamson, E.B., Beam element formulation and solution procedure for dynamic progressive collapse analysis, Computers & Structures, Vol. 82, 639-651.
- [5] Isobe, D., and Tsuda, M.. Seismic collapse analysis of reinforced concrete framed structures using the finite

- element method[J], *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.32, No.13, 2027-2046.
- [6] XUAN Gang; GU Xiang-lin; LU Xi-lin. Numerical analysis of collapse process for RC frame structures subjected to strong earthquakes[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, 23(06):24-30. (in Chinese)
- [7] Lu Xinzhen Jiang Jianjing. Dynamic finite element simulation for the collapse of world trade center[J]. *China Civil Engineering Journal*. 2001, 34(6):8-11. (in Chinese)
- [8] Dorn, M. Computer prediction of the damage to and collapse of complex masonry structures from explosions[J]. *STRUCTURES UNDER SHOCK AND IMPACT*, VI 8: 277-286 2000
- [9] Yutaka Toi, Daigoro Isobe. TI: Adaptively shifted integration technique for finite element collapse analysis of framed structures[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1999, Vol:36(14): 2323-2339. (in Chinese)
- [10] Mattern, S., Blankenhorn, G., Breidt, M. Comparison of building collapse simulation results from finite element and rigid body models. *IUTAM SYMPOSIUM ON MULTISCALE PROBLEMS IN MULTIBODY SYSTEM CONTACTS: 257-267 2007*.
- [11] ZHOU Jian, QU Jun-tong, JIA Min-cai. Numerical Simulation of Concrete Frame Collapsing Process with PFC2D Program[J]. *Journal of Seismological Research*. 2005, 28(3):288-293. (in Chinese)
- [12] Munjiza, A. The combined finite-discrete element method for structural failure and collapse[J]. *ENGINEERING FRACTURE MECHANICS* 71 (4-6): 469-483 MAR-APR 2004
- [13] JIA Jin-he YU Ya-lun. Applying FEM and DDA to Simulate the Demolition of Frame Structure[J]. *Blasting*, 2001, 18(01): 27-30. (in Chinese)
- [14] QIN Dong; FAN Li Chu. Numerical Simulation on Collapse Process of Reinforced Concrete Structures[J]. *Journal of Tongji University*. 2001, 29(01):80-83. (in Chinese)
- [15] Miao Ji Jun, Gu Xiang Lin. Numerical Simulation Analysis for The Collapse Response of Masonry Structures under Earthquakes[J]. *China Civil Engineering Journal*. 2005, 38(9):45-52. (in Chinese)
- [16] Jiang JJ, Lu XZ, Ye LP. Finite Element Analysis of Concrete Structures[M]. Tsinghua University Press, Beijing, China, 2005. (in Chinese)