

文章编号: 1000-4750(2011)05-0071-07

## 漩口中学典型框架结构震害模拟与分析

\*马玉虎, 陆新征, 叶列平, 唐代远, 李 易

(清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 该文以汶川地震震中附近的漩口中学教学楼和办公楼框架结构震害为背景, 对其进行了模拟分析。针对震害特征, 提出了微观-宏观多尺度有限元分析模型, 以更准确的模拟结构的实际震害。在此基础上, 为提高计算分析效率, 结合微观-宏观多尺度有限元分析模型, 提出能考虑楼板影响和基础转动的改进宏观有限元分析模型。采用多尺度模型和改进的宏观模型, 用弹塑性动力时程分析模拟了漩口中学教学楼和办公楼框架结构的倒塌过程, 对其倒塌模式、倒塌机理及其影响因素进行了分析比较, 找出了影响结构抗倒塌能力的关键部位, 为改进框架结构抗震倒塌能力设计提供了参考。

**关键词:** 汶川地震; 框架结构; 倒塌模式; 多尺度有限元模型; 轴压比

**中图分类号:** TU375.4; TU311.3 **文献标识码:** A

## SEISMIC DAMAGE SIMULATION AND ANALYSIS OF TYPICAL RC FRAMES OF XUANKOU SCHOOL

\*MA Yu-hu, LU Xin-zheng, YE Lie-ping, TANG Dai-yuan, LI Yi

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The seismic damage of typical reinforced concrete (RC) frames based on the classroom buildings and office buildings of the Xuankou School, which are close to the epicenter of Wenchuan Earthquake, is simulated and analyzed. According to the seismic damage characters, a micro-macro multi-scale finite element (FE) model is proposed to accurately simulate the seismic damage of the structures. Based on the multi-scale FE model, an improved macro FE model considering the influence of slabs and footing rotations is proposed to improve the computational efficiency. With the micro-macro multi-scale FE model and the improved macro FE model, the collapse process of classroom buildings and office buildings is simulated with elastic-plastic time-history analysis. By comparing the collapse modes and failure mechanisms of the structures, critical positions that influence seismic collapse resistance of a structure are found, which could be used for a reference for the improvement of seismic collapse prevention design of RC frame structures.

**Key words:** Wenchuan earthquake; frame structure; collapse mode; multi-scale finite element model; axial force ratio

在汶川地震中, 大量建筑物发生倒塌破坏, 但是也有很多建筑物成功的避免了倒塌, 包括部分位于极震区的建筑。研究这些建筑物抗震能力, 尤其

是抗倒塌能力差异的原因, 进而提出经济有效的建筑物抗地震倒塌措施, 对提高我国建筑安全具有很大的借鉴意义<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2009-10-22; 修改日期: 2010-02-22

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAJ28B01); 国家自然科学基金重点项目(90815025)

作者简介: \*马玉虎(1986—), 男, 大连人, 硕士生, 从事混凝土结构抗震研究(E-mail: daxture2008@gmail.com);

陆新征(1978—), 男, 芜湖人, 副教授, 博士, 从事数值模拟与防灾减灾研究(E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn);

叶列平(1960—), 男, 扬州人, 教授, 博士, 博导, 从事混凝土结构与结构抗震研究(E-mail: ylp@mail.tsinghua.edu.cn);

唐代远(1988—), 男, 北京人, 硕士生, 从事混凝土结构抗震研究(E-mail: tdy05@mails.tsinghua.edu.cn);

李 易(1981—), 男, 襄樊人, 博士生, 从事结构抗连续倒塌研究(E-mail: chinaboyrecoba@gmail.com)。

漩口中学位于汶川地震震中的映秀镇(图 1),其教学区楼群(教学楼 A、教学楼 B、教学楼 C)和办公楼 H 等,均为 2007 年建成投入使用的框架结构。这些框架按照我国目前最新的抗震规范:《建筑抗震设计规范 GB50010-2001》<sup>[3]</sup>设计,设防烈度为 7 度。由于漩口中学处于汶川震中极震区,遭遇烈度达到 11 度,因而震害比较严重,教学楼 A、教学楼 B 完全倒塌,教学楼 C 底部两层倒塌,其余框架结构均有不同程度的损坏。



图 1 漩口中学震害总体情况(新华网陈树根摄)

Fig.1 General information of the seismic damage of Xuankou School

这些建筑设计、建造条件相同,位于同一场地,但是震损情况却差异显著<sup>[4-6]</sup>。因此,对漩口中学不同建筑的震害加以研究,并深入分析不同类型框架结构的震害原因和抗倒塌能力差异,对改进现行建筑结构抗震计算模型和设计方法具有重要意义。

## 1 震害概况与问题分析

### 1.1 漩口中学教学楼 A

根据文献[4-6]和本文作者的震害调查,漩口中学教学楼 A(图 1)的主要结构特征和震害现象包括:

1) 教学楼 A 为 5 层框架结构,局部 6 层,柱下独立基础。梁、板、柱的混凝土强度等级均为 C30,受力钢筋采用 HRB335 级钢筋,填充墙体采用 MU10 空心砌块, M5 砂浆砌筑。

2) 结构整体向南倒塌(见图 2),其中东侧完全倒塌,西侧因有其他结构支撑,残留顶层。另外,与教学楼 A 类似的教学楼 B、教学楼 C 均发生不同程度的倒塌破坏,见图 3、图 4。

3) 教学楼的倒塌规律一般为,底层向走廊一侧倾倒,上部楼层向教室一侧倾倒,见图 5。

4) 大量出现柱铰破坏,框架柱破坏明显比框架

梁要严重。底层柱顶出铰比柱底破坏严重(见图 2)。



(a) 北面中央楼梯间东侧走廊倒塌破坏



(b) 北面中央楼梯间西侧走廊倒塌破坏

图 2 教学楼 A 的震害照片

Fig.2 Photos of the seismic damage of Classroom Building A



图 3 教学楼 B 的震害照片

Fig.3 Photos of the seismic damage of Classroom Building B



图 4 教学楼 C 的震害照片

Fig.4 Photos of the seismic damage of Classroom Building C

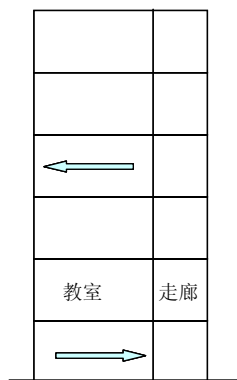


图5 教学楼的倒塌方向

Fig.5 Collapse mode of classroom buildings

### 1.2 漩口中学办公楼 H

根据文献[4-6]和本文作者的震害调查,漩口中学办公楼 H(图 1)的主要结构特征和震害现象包括:

1) 办公楼 H 为 4 层框架结构,局部 3 层,柱下独立基础。材料设计强度与教学楼 A 相同。

2) 办公楼 H 整体震害较轻,且未发生倒塌,底层框架轻微破坏,如图 6(a)所示。

3) 因倒塌的教学楼 A 碰撞,造成局部破坏,见图 6(a)。

4) 入口处外砌填充墙体因与主体结构缺乏有效拉结,大量脱落开裂,见图 6(b)。



(a) 局部碰撞破坏



(b) 入口门厅填充墙破坏

图6 办公楼 H 震害照片

Fig.6 Photos of the seismic damage of Office Building H

### 1.3 震害问题分析

由上述震害现象可以发现以下问题:

虽然漩口中学位于震中附近,遭遇烈度远超过设防烈度,但是仍然有不少建筑物成功避免了倒塌。表明通过合理设计,有希望实现特大地震不倒。

位于同一场地,建设年代相同,按照同样规范标准设计的教学楼 A 和办公楼 H,其震害程度差异非常明显。教学楼 A 的震害显著重于办公楼 H。且根据文献[1]的震害调查发现,教学楼的震害普遍比办公楼和住宅等严重。除去发生地震时间正好为上课时间,教学楼人员密集、荷载相对较大,而办公楼荷载相对较小这一偶然原因外,现行设计规范在抗地震倒塌能力方面可能存在差异和问题,值得深入研究。

从震害现场可以明显看出,框架柱震害明显比框架梁严重,不符合一般框架结构抗震的“强柱弱梁”原则,这一现象在汶川地震中也普遍存在<sup>[1]</sup>。

底层多处发现柱顶破坏比柱脚严重。汶川地震大量震害统计规律也表明,柱顶的破坏程度比柱脚破坏程度大很多。除了部分结构柱脚破坏被埋在地面以下难以观察外,柱顶破坏比柱脚严重的问题也与一般抗震设计要求不符。

## 2 计算模型与震害模拟

### 2.1 计算模型概述

为研究汶川地震中暴露出来的类似漩口中学的震害问题,特别是教学楼的震害问题,以及与传统框架结构抗震设计概念存在差异的震害现象(如“强梁弱柱”,底层柱顶震害重于底层柱底等),本文以漩口中学的教学楼 A 与办公楼 H 作为典型案例,对其进行了震害模拟分析。考虑到缺少结构详细配筋数据和材料实测强度,本文根据所获得的教学楼 A 与办公楼 H 的建筑图确定分析模型的结构尺寸,并按《抗震规范 GB50011-2001》要求,用 PKPM 重新设计了配筋。分析模型材料强度采用《混凝土结构设计规范 GB50010-2002》<sup>[7]</sup>建议的标准值。这样,虽然分析模型与实际结构并非完全一致,但可从设计规范角度对不同结构抗地震倒塌能力的差异给予说明。

此外,根据实际震害现象,教学楼基本上都是沿短轴方向倒塌,破坏方向性比较明显,故为简化计算工作,突出主要问题,教学楼 A 建模采用二维平面框架模型。为便于与教学楼 A 的分析结果相比

较, 办公楼 H 也按短轴方向建立二维平面框架模型。两个框架均选取结构高度最高的一榀框架建立二维模型。

大量研究表明, 对于钢筋混凝土框架结构, 纤维梁模型可以取得较好的模拟效果<sup>[8-9]</sup>。但是, 由于纤维梁模型是一种宏观模型, 故而对节点、基础等部位的模拟存在困难, 如果这些部位的模型简化不合理, 则预测的震害将与实际情况有较大差异。本文首先基于目前结构设计中常用的计算模型, 对教学楼 A 的震害现象进行了模拟, 发现预测震害与实际存在较大差异, 具体细节将在 2.2 节中详细介绍。

因此, 为了解决宏观模型难以准确模拟节点和基础等部位的微观破坏情况这一困难, 本研究采用本课题组提出的微观-宏观多尺度分析方法<sup>[10]</sup>, 对结构破坏最为严重的首层、基础和地基采用三维实体有限元模型进行了更加细致的模拟。之后, 再基于多尺度分析结果, 对宏观模型加以改进, 从而实现了基于宏观模型对震害现象的模拟, 并对现有计算模型中存在的问题进行了讨论。

地震动输入采用汶川地震中获得的什邡-八角波(NS+UD)<sup>[2]</sup>, 并根据漩口中学所在场地的实际地震动强度估计, 将 NS 方向的 PGA 调整到 1.0g(其他方向同比例调整)。

## 2.2 目前常用计算模型存在的问题

在目前的结构抗震设计和抗震分析中, 钢筋混凝土框架结构多采用以下计算模型:

1) 计算模型中只考虑框架梁柱, 只近似考虑楼板对梁的刚度增强, 基本不考虑楼板对梁的承载力影响。

2) 框架柱脚视为固定支座, 一般不考虑结构与地基和基础的相互作用。

按照上述建模原则, 基于纤维梁模型建立了教学楼 A 的宏观计算模型(该模型称为“宏观模型 1”)。纤维梁模型采用清华大学开发的 THUFIBER 程序, 该程序已与大量实验结果进行了对比, 验证了其可靠性<sup>[9]</sup>。根据教学楼 A 的朝向, 输入前述放大后的什邡-八角地震波 NS 和 UD 分量, 计算得到教学楼 A 框架结构的破坏模式如图 7 所示。

对比图 7 的破坏模式和实际震害破坏模式, 可以看出, 二者差异显著, 主要表现为:

- 1) 塑性铰多位于梁内而非柱内。
- 2) 底层柱脚破坏比柱顶破坏严重, 倒塌始于底

层柱脚。

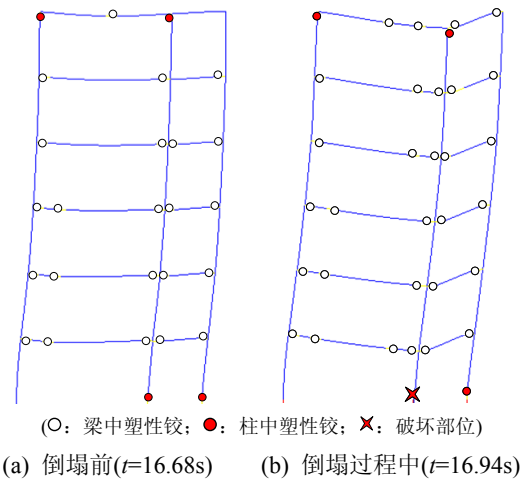


图 7 “宏观模型 1”模拟的破坏模式

Fig.7 Failure mode predicted by ‘Macro-model 1’

根据文献[1,11-12]的研究, 实际框架结构震害柱铰多于梁铰的原因, 主要是由于现浇楼板与框架梁共同工作, 从而提高了框架梁的抗弯承载力, 使得“强柱弱梁”屈服机制无法实现。故而对上述“宏观模型 1”进行了修改, 将框架梁按照 T 形梁建模。T 梁的翼缘代表与梁共同工作的楼板, 其厚度和配筋率与楼板相同, 翼缘每侧宽度取楼板厚度的 6 倍。考虑了楼板的纤维梁模型称为“宏观模型 2”。对“宏观模型 2”同样输入前述什邡-八角地震波, 计算得到破坏模式如图 8 所示。从图 8 可以看出, 考虑了楼板对框架梁的增强作用后(“宏观模型 2”), 柱铰破坏明显比梁铰破坏严重。与“宏观模型 1”相比, 更接近与实际震害。但是, 柱脚破坏比柱顶破坏严重, 倒塌仍然始于底层柱脚, 这仍与实际震害现象不符。故而有必要对底层柱脚和基础进行更加细致的分析。

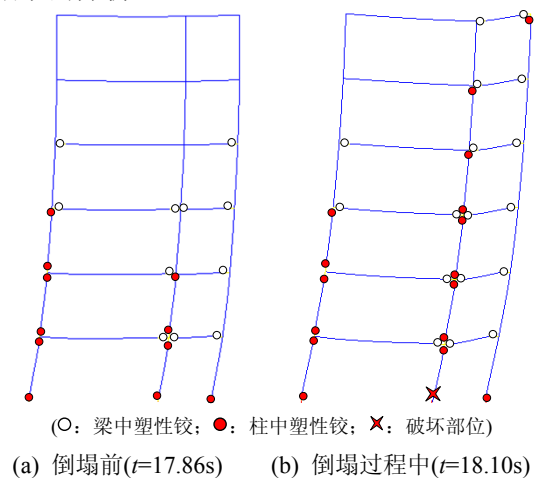


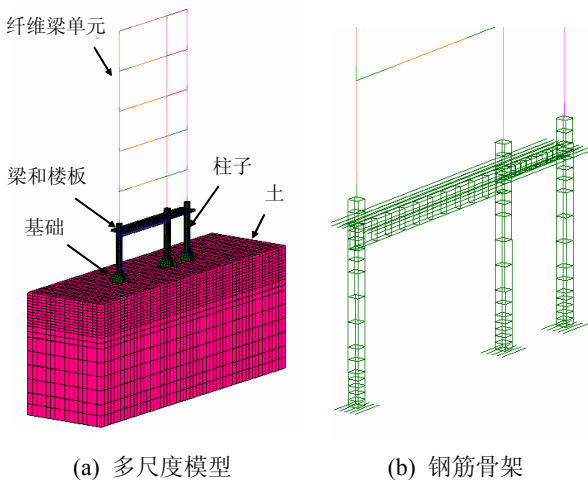
图 8 “宏观模型 2”模拟的破坏模式

Fig.8 Failure mode predicted by ‘Macro-model 2’

### 2.3 微观-宏观多尺度模型计算结果

为了更好地解释教学楼 A 的底层破坏更为严重问题, 本文采用文献[10]建议的多尺度分析方法, 对结构倒塌具有关键影响的底层采用更加精细的模型加以分析。在多尺度分析中, 对于某些需要详细研究的部位, 可采用基于实体单元的微观模型加以模拟, 而对于其他部位, 则仍可采用基于梁单元或壳单元的宏观模型加以模拟, 以减少计算量。文献[10]建议了宏观模型和微观模型的界面处理方法, 可保证二者之间的受力平衡和变形协调, 且不会引入多余约束。

本文建立的微观-宏观多尺度模型如图 9 所示。对于导致结构破坏最为关键的底层梁、柱、楼板、基础和地基, 采用基于实体单元的微观模型建模, 对于上部结构, 仍采用基于纤维梁的宏观单元建模。微观和宏观模型的过渡部位采用文献[10]中的处理方法。为考虑楼板影响, 框架梁采用 T 形截面, 楼板有效翼缘宽度取 6 倍板厚<sup>[13]</sup>。地基土体宽度取基础底面宽度的 5 倍, 基础和地基之间采用接触关系模拟其相互作用(见图 9(a))。对于底层梁、柱和楼板, 混凝土采用实体单元, 其受压采用 MSC.MARC 软件提供的三维弹塑性本构模型, 受拉采用弥散裂缝模型, 而钢筋采用桁架单元和基于 von Mises 准则的弹塑性本构模型。钢筋和混凝土之间的共同工作采用 MSC.MARC 的嵌入技术(Insert)实现位移协调。考虑到混凝土单元划分网格尺寸, 在保证体积配箍率相同的情况下, 对钢筋骨架加以简化, 如图 9(b)所示, 这样既可较好地模拟箍筋对混凝土的约束作用, 又可以减少计算和建模工作量。

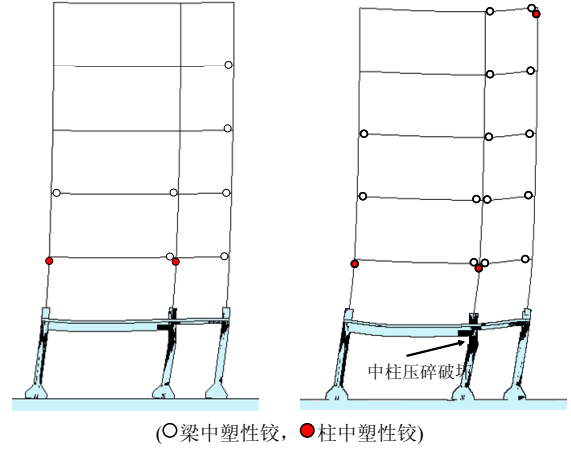


(a) 多尺度模型 (b) 钢筋骨架

图 9 微观-宏观多尺度模型

Fig.9 Micro-macro-multi-scale model

对多尺度模型输入前述什邡-八角地震波, 计算得到结构的倒塌破坏模式如图 10 所示。由图 10 可以看出, 结构的柱下独立基础转动明显, 底层柱顶破坏明显比柱脚破坏严重, 倒塌始于底层中柱柱顶, 与实际震害一致。



(a) 倒塌前( $t=17.42s$ ) (b) 倒塌过程中( $t=17.72s$ )

图 10 微观-宏观多尺度模型模拟的结构破坏模式

Fig.10 Failure mode predicted by micro-macro multi-scale model

由此可以看出, 对于类似教学楼 A 这样的柱下独立基础, 其嵌固刚度有限, 将其近似为固定端, 会过高估计其约束能力, 在罕遇地震作用下, 计算得到的结构内力分布会和实际内力分布有所差异。故而在结构地震弹塑性分析, 特别是结构倒塌分析时, 应合理考虑上部结构和地基及基础的共同作用。

### 2.4 考虑楼板作用和基础转动作用的宏观模型

多尺度模型为解释漩口中学框架结构的破坏现象提供了有力工具。但是, 多尺度模型计算量较大, 且建模比较复杂, 不便于在一般工程计算分析和设计。为此, 基于多尺度模型提供的结构基础变形数据, 本文建议可采用考虑楼板作用和基础转动作用的宏观模型(称为“宏观模型 3”)用于工程弹塑性计算。

“宏观模型 3”与“宏观模型 2”类似, 用纤维梁单元建立模型, 用 T 形梁来考虑楼板与框架梁的共同工作。不同之处在于, 根据多尺度模型推覆分析结果, “宏观模型 3”的柱脚设置转动弹簧, 转动弹簧的转动刚度由多尺度模型的推覆分析得到, 约为  $7000kN \cdot m/rad$ 。

对改进后的“宏观模型 3”输入汶川 NS+UD 地震记录, 计算得到结构的顶点位移时程关系如图 11 所示, 结构的破坏模式如图 12 所示。从顶点

位移时程关系和结构倒塌模式对比可以看出,改进后的“宏观模型 3”和多尺度模型计算结果吻合较好。破坏过程、塑性铰分布和倒塌起始位置、倒塌时间等均基本相同。

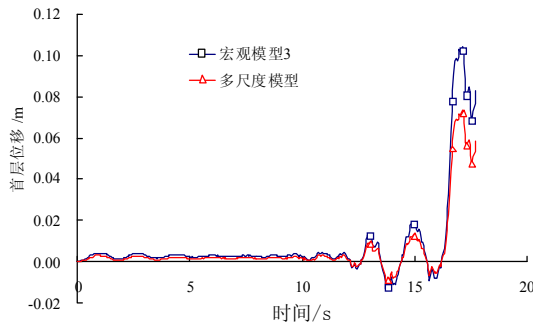


图 11 教学楼 A 在汶川地震波下的顶点位移时程曲线

Fig.11 Roof time-history displacement of Classroom Building A subjected to Wenchuan ground motion

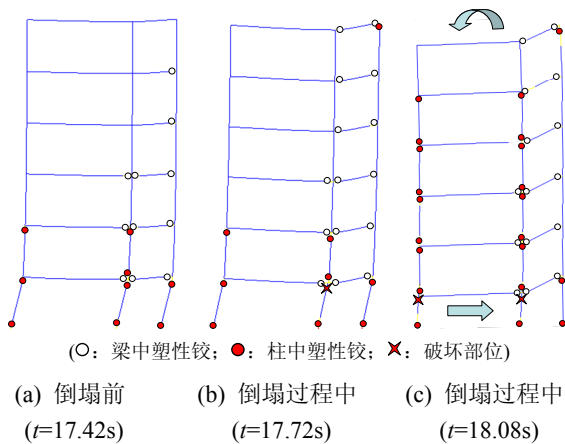


图 12 “宏观模型 3”模拟的结构倒塌过程和倒塌模式

Fig.12 Failure process and failure mode predicted by 'Macro-model 3'

由于改进后的宏观模型能获得比较稳定的结构倒塌过程,进而可以更好的了解倒塌破坏现象的一些机理。如图 12 所示,结构初始倒塌始于底部中柱,底层的倒塌方向倾向于走廊一侧,与震害现象一致。在底层层间变形达到一定程度后,底层中柱柱顶在弯矩和轴力的共同作用下开始进入破坏阶段(图 12(b))。随着中柱柱顶的压溃,教室一侧边柱的轴压力突然增加,紧接着也发生柱顶破坏(图 12(c))。此时底部楼层的倒塌方向仍然是朝向走廊一侧,如图 12(c)中底部箭头所示。由于走廊的竖向荷载较小,故而走廊一侧边柱的破坏相对滞后,随着底部教室一侧两根立柱的破坏,上部几层都向教室一侧倾倒,如图 12(c)顶部箭头所示。该破坏现象和现场的倒塌现象非常相似,说明该模型模拟结果与实际震害比较接近。

同样,对办公楼 H 也建立相应的考虑楼板作用和基础转动作用影响的改进宏观纤维梁模型,根据其朝向输入汶川地震 EW+UD 波(PGA=1.0g),计算得到的最大位移和地震结束时刻的变形模式和塑性铰分布如图 13 所示,塑性铰主要位于底部楼层,梁铰延性系数约为 2 左右,而柱铰延性系数为 4-6,尽管仍呈现一定程度的“弱柱强梁”的破坏模式,底层最大层间位移角为  $1/68.8$ ,柱的破坏程度已接近倒塌,但由于本模型未考虑填充墙的贡献,实际层间位移角明显小于分析结果,这是办公楼 H 能成功的经受了地震作用而没有发生倒塌破坏的原因之一。此外,办公楼 H 顶部楼层破坏很少,这些也均与实际震害现象相吻合。

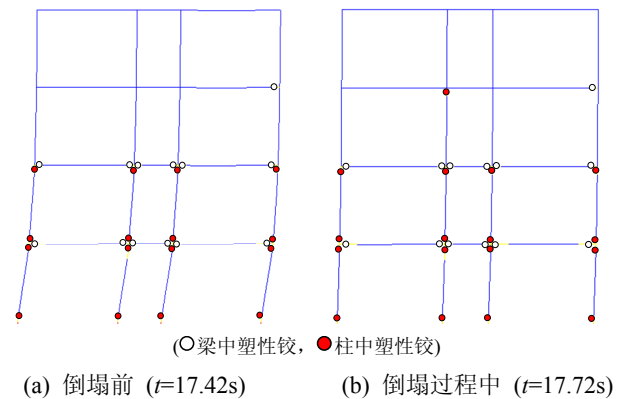


图 13 模拟的办公楼 H 在汶川 EW+UD 波下的破坏  
Fig.13 Predicted failure mode of Office Building H subjected to EW+UD components of Wenchuan ground motion

对比图 12 教学楼 A 和图 13 办公楼 H 的破坏模式,可以看出,教学楼 A 在抗震方面存在以下不利表现:

1) 教学楼 A 的抗震存在明显的薄弱环节。底层框架柱,特别是底层框架柱中柱,由于轴压比较大,因而延性和变形能力较差,破坏较早,并由此引起整个结构的连续倒塌。

2) 教学楼 A 进入倒塌前,除底层外,上部楼层的构件大部分未进入塑性,未能很好发挥耗能能力,而办公楼 H 的塑性铰数量比教学楼 A 要多,分布也更加均匀,结构整体耗能能力发挥较充分。

3) 教学楼 A 底层左柱、中柱、右柱的轴压比分别为 0.305、0.393、0.155,最大最小轴压比相差 254%,中柱轴力明显大于边柱,且结构不对称。而办公楼 H 结构对称,中柱和边柱的轴压比分别为 0.195 和 0.146,差别不大,整体工作性能更好。

### 3 结论

本文基于漩口中学典型框架结构建筑震害,提出了多尺度模型和能考虑楼板影响及基础转动的改进宏观有限元模型,对震害进行了模拟分析,得到以下结论:

(1) 按我国规范设计的框架结构,当跨度和荷载较大时,抗地震倒塌能力较差。因此,建议对跨度和荷载较大的框架结构适当提高有关抗震措施,如框架柱轴压比的采用更严的控制,或进一步提高柱端弯矩增大系数。

(2) 楼板作用和基础转动作用对框架结构的破坏模式有较大影响。不考虑楼板的影响会导致结构设计无法实现“强柱弱梁”,而不考虑基础转动的影响则会使底层柱顶抗震能力存在不足。

(3) 由于填充墙的力学模型比较复杂,本文分析中未考虑填充墙的影响。现场震害调查表明,填充墙的数量和布置对框架结构的抗倒塌能力也有很大影响,这有待今后进一步开展研究。

#### 参考文献:

- [1] 清华大学,西南交通大学,北京交通大学土木工程结构专家组.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4):1-9.  
Civil and structural groups of Tsinghua University, Xinan Jiaotong University, Beijing Jiaotong University. Analysis on building seismic damage in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 1-9. (in Chinese)
- [2] 林旭川,潘鹏,叶列平,陆新征,赵世春.汶川地震中典型 RC 框架的震害仿真与分析[J].土木工程学报,2009,42(5):13-20.  
Lin Xuchuan, Pan Peng, Ye Lieping, Lu Xinzhen, Zhao Shichun. Analysis on damage mechanism of a typical RC frame in Wenchuan Earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(5): 13-20. (in Chinese)
- [3] GB 50011-2001, 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2001.  
GB50011-2001, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [4] 叶列平,李易,潘鹏.漩口中学建筑震害调查分析[J].建筑结构,2009,39(11):54-57.  
Ye Lieping, Li Yi, Pan Peng. Investigation of the seismic damages of building structures of Xuankou Middle School in Yinxiu Town [J]. Building Structure, 2009, 39(11): 54-57. (in Chinese)
- [5] 孙柏涛,闫培雷,张明宇,胡春峰.汶川 8.0 级大地震极重灾区映秀镇不同建筑结构震害概述及原因简析[J].地震工程与工程振动,2008,28(5):1-9.  
Sun Baitao, Yan Peilei, Zhang Mingyu, Hu Chunfeng. Overview on seismic damage to different structures in Yingxiu Town during Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(5): 1-9. (in Chinese)
- [6] 叶列平,陆新征,赵世春,李易.框架结构抗地震倒塌能力的研究——汶川地震极震区几个框架结构震害案例的分析[J].建筑结构学报,2009,30(9):67-76.  
Ye Lieping, Lu Xinzhen, Zhao Shichun, Li Yi. Seismic collapse resistance of RC frame structures — Case studies on seismic damages of several RC frame structures under extreme ground motion in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(9): 67-76. (in Chinese)
- [7] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.  
GB50010-2002, Code for design of concrete structure [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [8] Spacone E, Filippou F, Taucer F. Fiber beam-column modeling for non-linear analysis of R/C frames [J]. Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25(7): 711-725.
- [9] 叶列平,陆新征,马千里,汪训流,缪志伟.混凝土结构抗震非线性分析模型、方法及算例[J].工程力学,2006,23(增刊 II):131-140.  
Ye Lieping, Lu Xinzhen, Ma Qianli, Wang Xunliu, Miao Zhiwei. Seismic nonlinear analytical models, methods and examples for concrete structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(sup.II): 131-140. (in Chinese)
- [10] 陆新征,林旭川,叶列平.多尺度有限元建模方法及其应用[J].华中科技大学学报(城市科学版),2008,25(4):76-80.  
Lu Xinzhen, Lin Xuchuan, Ye Lieping. Multiscale finite element modeling and its application in structural analysis [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition), 2008, 25(4): 76-80. (in Chinese)
- [11] 叶列平,曲哲,马千里,林旭川,陆新征,潘鹏.从汶川地震框架结构震害谈“强柱弱梁”屈服机制的实现[J].建筑结构,2008,38(11):52-59.  
Ye Lieping, Qu Zhe, Ma Qianli, Lin Xuchuan, Lu Xinzhen, Pan Peng. Study on ensuring the strong column-weak beam mechanism for RC frames based on the damage analysis in the Wenchuan Earthquake [J]. Building Structure, 2008, 38(11): 52-59. (in Chinese)
- [12] 马千里,叶列平,陆新征,马玉虎.现浇楼板对框架结构柱梁强度比的影响研究 [C]//陈肇元,钱稼茹.汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告,北京:中国建筑工业出版社,2008:263-271.  
Ma Qianli, Ye Lieping, Lu Xinzhen, Ma Yuhu. Influence of cast-in-site floor slabs to the 'column-beam' strength ratio of frame structures [C]// Chen Zhaoyuan, Qian Jiaru. Building seismic damage investigation and rebuilding analysis of Wenchuan Earthquake, Beijing: China Building Industry Press, 2008: 263-271. (in Chinese)
- [13] 叶列平,马千里,缪志伟.钢筋混凝土框架结构强柱弱梁设计方法的研究[J].工程力学,2010,27(12):102-113.  
Ye Lieping, Ma Qianli, Miao Zhiwei. Study on weak-beam-strong-column design method of RC frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(12): 102-113. (in Chinese)