

汶川地震中底层框架砖房震害特点及分析*

李碧雄^{1,2}, 王哲¹

(1. 四川大学建筑与环境学院, 四川成都 610065;
2. 四川大学水利水电学院, 四川成都 610065)

摘要: 底层框架砖房是一种混合结构形式, 底部一层全部或部分采用钢筋混凝土框架承重, 上部多层采用砖墙承重, 在我国城镇地区应用非常广泛, 通常具有“上刚下柔”的结构特性。512汶川地震中不同烈度地区均有大量该类建筑严重破坏甚至倒塌, 也有部分位于极震区的底框砖房表现出很好的抗震性能。地震发生后, 四川大学组织了考察队, 对地震灾区建筑物的震害情况进行了广泛深入的科学调查。在介绍和总结了汶川地震中底框砖房的表现——底层过大的水平侧移、过渡层严重破坏或完全坍塌、底层严重破坏或房屋完全倒塌、上部砌体整体发生侧移、以及设计和施工质量良好的底层抗震墙砖房“大震不倒”的基础上, 得出以下结论和建议: 在抗震设防地区应禁止使用部分底框砖房, 地震中过渡层的实际受力情况与设计所采用的受力状态有明显的区别, 规范应考虑砌体和钢筋混凝土材料的不同力学性质来制定上下层刚度比要求, 明确对过渡层的延性和强度要求, 明确该类结构抗震概念设计的具体措施。

关键词: 汶川地震; 底框砖房; 震害特征; 抗震性能

中图分类号: TU352 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2010)02-0022-06

Lessons from the Performance of Masonry Structure with Ground RC Frame during Wenchuan Earthquake

LI Bixiong^{1,2}, WANG Zhe¹

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, 610065, China;
2. College of Resource & Hydropower, Sichuan University, Chengdu, 610065, China)

Abstract: An 8.0 magnitude earthquake attacked the northwestern margin of the Sichuan Basin on May 12, 2008. A large number of buildings suffered damage to different degree in the epicenter regions. Sichuan University reconnaissance team investigated the performance of residential masonry structure buildings with ground R. C. frame for commercial purpose following the Earthquake. This kind of structure style is widely taken in the epicenter area. Many of them suffered severe damage or even collapsed totally, however, some of them had perfect performance during the Earthquake. Many structural deficiencies and mistakes were highlighted, which including excessive horizontal displacement in the ground, more severe damaged transition layer (the first masonry structure layer), ground with farraginous structure, and poor construction quality. Finally, lateral stiffness ratio of the second to ground story in masonry buildings with RC frame structure at the bottom will be optimized following difference of materials between the ground floor and the upper floors. The strength and the ductility of transition layer, as well as shear walls in the ground floor, are crucial to keep the building standing during large earthquake.

Key words: Wenchuan earthquake; masonry structure building with ground RC frame; damage characteristics; seismic property

* 收稿日期: 2009-04-07

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50639100), 国家自然科学基金重大国际合作研究资助项目(50620130440), 科技部国际科技合作资助项目(2007DFB60100)

作者简介: 李碧雄(1970年生), 女, 副教授, 博士研究生; E-mail: libix@126.com

1 过渡层砌体的破坏特点

类似于唐山地震中底框砖房的震害特点^[7], 汶川地震中无论是严格还是未严格按照规范设计的底框砖房, 其过渡层砌体结构变形集中和破坏集中的现象非常普遍。图 2 (a) 所示六层建筑物位于绵竹市汉旺镇, 调查发现, 该建筑底层框架基本完好, 过渡层严重破坏。图 2 (b) 所示四层底框砖房位于汉旺镇, 第二层完全垮塌, 调查发现, 底层

框架柱间采用实心粘土砖填充墙, 由于实心粘土砖砌体的刚度和强度都较大, 因此底层的抗震承载力和抗变形能力均较高, 薄弱层转移至第二层, 导致过渡层坍塌, 由于上部结构整体性较差, 导致上部结构下坐的过程中发生了严重破坏。图 2 (c) 所示建筑位于此次地震震中附近映秀镇, 断裂带从该建筑旁边通过, 过渡层完全坍塌。调查发现, 该建筑底层框架结构中设置了一些钢筋混凝土剪力墙, 底层竖向结构基本完好, 结构的破坏集中在第二层。



(a) 过渡层严重破坏

(b) 过渡层完全坍塌 (汉旺镇)

(c) 过渡层完全坍塌 (映秀镇)

图 2 过渡层砌体破坏现象

Fig. 2 Damage to masonry transition layer

深入调查分析表明, 造成上述过渡砌体结构层典型破坏的原因有以下两方面:

(1) 现阶段对于地震作用下底框砖房中第二层 (过渡层) 的工作机理乃至整个结构的抗震性能还存在诸多认识上的盲点, 现行规范采用的设计方法不能反映过渡层的实际工作状态;

(2) 抗震规范关于第二层与底层刚度比的规定, 基于整个结构各层结构材料相同的情况。由于钢筋混凝土框架的变形和耗能能力优于砌体结构, 考虑到砌体为脆性材料, 延性系数小, 抗拉、抗剪强度低等不利因素, 现行规范中以强制性条文严格规定第二层与底层刚度比不应小于 1.0, 以保证底层框架的刚度不超过上部砌体结构层的刚度, 在地震中更好地发挥底层良好的抗震性能。但在实际结构设计中, 填充墙体对底层框架刚度的贡献没有量化的计算方法, 由于填充墙体的加入, 特别是实心砖填充墙, 使底层刚度和强度都显著增大^[9], 导致薄弱层向上转移, 破坏集中于第二层。

2 底框砖房典型震害特点及反思

2.1 底层梁柱与砌体墙混合承重

底层结构体系的合理布置是保证底框砖房获得良好抗震性能的重要前提。作者所在课题组调研发现, 由于建造年代较早等原因, 绝大多数房屋的底

层未按现行规范要求采用底框 - 抗震墙结构形式, 而是采用钢筋混凝土梁柱与砌体墙混合承重的结构形式。

荷花池小区是此次汶川地震中都江堰市破坏最为严重的街区之一。该小区大部分房屋的底层采用梁柱与砌体墙混合承重的结构形式, 其底层临街面框架承重, 背街面砌体承重, 并且均未设置钢筋混凝土抗震墙。汶川地震导致该小区数栋房屋完全倒塌, 大部分房屋严重破坏, 特别是底层框架柱顶、柱底钢筋屈服出现灯笼状的破坏现象以及底层承重墙体严重破坏的现象随处可见。

图 3 (a) 为荷花池小区一栋典型部分底框结构房屋的破坏情况, 图 3 (b) 为该栋建筑临街受损非常严重的一部分, 图 3 (c) 为该部分的平面布置示意图。从图和照片可以看出, 底层临街面两道纵轴线采用框架梁柱承重, 背街面纵轴线采用砖墙承重, 上面四层为砌体结构。由于钢筋混凝土梁柱组成的框架和砌体墙的力学性质不同, 再加之采用预制板楼屋盖结构, 建筑物的整体性较差, 在水平和竖向地震作用下, 框架和砌体墙不能很好的协同工作, 尤其是在结构部分或整体进入塑性状态后。因此, 地震作用在框架柱和砌体墙之间的分配, 不再简单地遵循抗侧刚度的比例, 在建筑物振动过程中可能是一个动态的分配状态。同时, 由于

框架和砌体墙变形不一致，可能改变竖向荷载的传递路径。调查发现，该建筑临街面框架柱顶底发生严重剪压破坏，混凝土已完全压碎，钢筋压屈呈灯

笼状。而背街面砌体承重墙则发生严重的剪切破坏，几乎完全丧失承载能力。

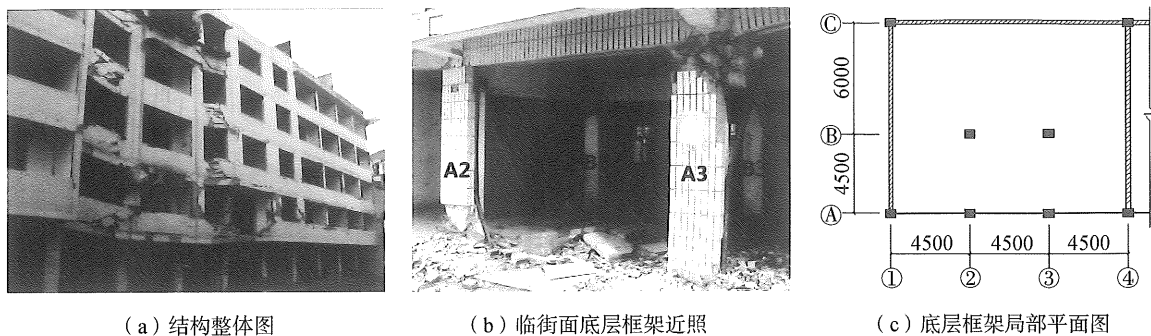


图 3 底层框架柱发生剪压破坏

Fig. 3 Shear failure on column of bottom frame

2.2 建筑物底层发生过大的水平侧移

相比于结构底层混合承重的破坏形态，结构底层发生过大的水平侧移也是一个不可忽视的问题，出于使用功能方面的考虑，底层墙体数量比上层少，故其侧移刚度比上部其他层低，结构的侧移刚度沿房屋的竖向不连续，从而形成上刚下柔的结构形式，若底层的强度低，则形成明显的抗震薄弱层，导致地震作用下底层发生显著的层间位移^[10-11]。

震中底层发生明显的水平侧移。据现场调查，柱子最大水平侧移约 20 cm。图 4 (b) 为房屋右侧局部平面布置图，该房屋的⑥~⑧轴线之间由于需要较大的商业空间，局部采用框架结构，而①~⑥轴线之间仅在临街面采用钢筋混凝土梁柱承重，横墙的数量明显多于⑥~⑧轴线之间。为了满足商业用途，从结构平面布置图可以看出，纵墙的数量较少，底层纵向抗侧刚度小，导致建筑物沿房屋纵向发生明显的水平侧移。加之框架柱的设计和施工也不能满足现行规范的要求，因此，柱子上下端出现塑性铰或发生其他的破坏形态，如图 4 (c) 所示。

图 4 (a) 为一栋部分底框五层砌体结构房屋，该楼位于都江堰市景中路，房屋纵向与街道平行，底层临街面为商业用房，二层以上为住宅，汶川地

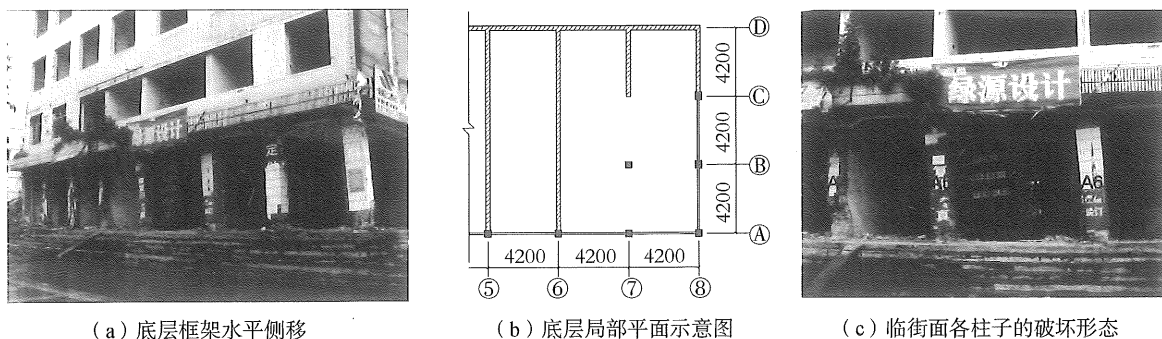


图 4 底层框架沿房屋纵向发生水平侧移

Fig. 4 Horizontal displacement of ground frame in the longitudinal direction

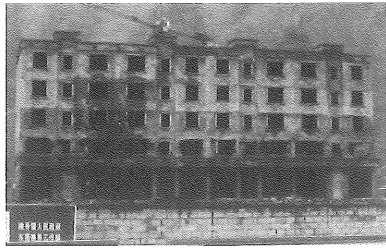
2.3 砌体在底层框架梁顶界面上发生水平侧移

由于底框砖房为两种完全不同材料结构的竖向组合，若框架与砌体结构交界处处理不当，地震作用下该处可能成为相对薄弱面而发生破坏。如图 5

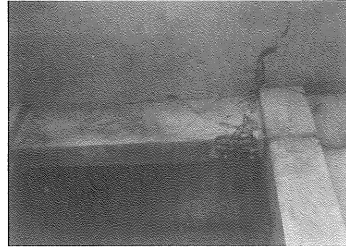
为位于汉旺镇的六层底框砖房，汶川地震中上部五层砌体结构与底层框架发生整体错动，端部山墙最大水平侧移值达 15 cm，山墙两侧清晰可见严重破坏的构造柱。



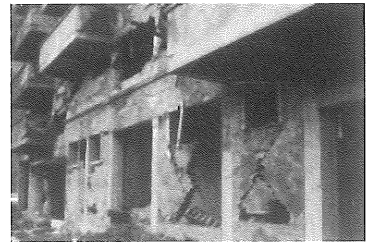
图 5 上部砌体结构整体水平侧移
Fig. 5 Horizontal displacement of the upper masonry stories



(a) 5层底框结构房屋



(b) 框架梁端产生交叉斜裂缝

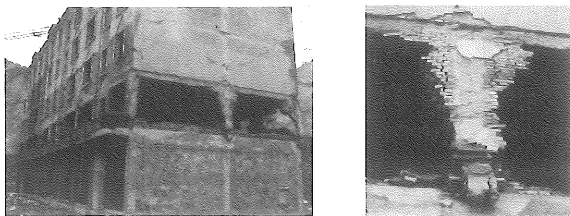


(c) 底层填充墙的破坏情况

图 6 底框抗震墙砖房“大震不倒”

Fig. 6 Non-collapsed masonry structure with ground RC frame

分框架表现的“弱柱强梁”不同，现场勘查未发现该建筑框架柱上出现塑性铰。第二层（过渡层）纵向窗间墙和端部山墙严重破坏，如图 7（a）所示，上部各层的重量基本由构造柱来承受，图 7（b）所示构造柱良好的构造措施和施工质量使第二层实现了“大震未倒”。内部窗间墙和横墙部分完全倒塌、部分出现严重的剪切斜裂缝。



(a) 过渡层砖墙的破坏特点 (b) 过渡层构造柱的细部构造

图 7 过渡层的破坏情况和构造

Fig. 7 Damage to second floor and detailing of tied-column

经深入现场调研及分析，其成功抵御 11 度地震烈度的原因主要为以下几方面：

(1) 严格按照抗震规范设计及计算，竖向和平面刚度布置合理，荷载传递途径明确，使设计时假

3 典型成功案例分析

在为数众多底框或部分底框砖房严重破坏的背后，也不乏表现优秀的底框砖房。如图 6（a）所示房屋位于距离震中最近的映秀镇，底层为框架-抗震墙结构，上部四层为砌体结构，工程主体结构完工。汶川地震中映秀镇的烈度达到 XI 度，在绝大多数房屋倒塌的情况下，这栋底框结构房屋虽然严重破坏，但实现了“大震不倒”。现场勘查发现，底层多处框架梁端出现塑性铰，如图 6（b）所示。底层部分填充墙发生剪切破坏、出平面破坏或局部挤压破坏，如图 6（c）所示。与此次地震中绝大部

定的受力模式与实际地震作用下的情形接近。

(2) 由于在底层设置了钢筋混凝土抗震墙，有效地控制了第二层和底层的刚度比，避免了底层形成软弱层。

(3) 底层抗震墙的设置不仅增大了底层的刚度，也有效地提高底层竖向结构的强度，从而实现了“强柱弱梁”，大震下梁端塑性铰的出现有效地吸收和耗散了一部分地震能量，从而降低了对其他构件的影响。

(4) 底层砌体填充墙充当了抗震第一道防线的的作用，填充墙的破坏吸收和耗散了一部分地震能量。

(5) 整个建筑物采用钢筋混凝土现浇楼、屋盖，上部各层砌体结构严格按照现行规范要求设置了构造柱和圈梁，有效地保证了整个结构的整体性。同时由于构造柱和圈梁设置合理，施工质量得到了保证，使该类结构中最薄弱的第二层（过渡层）具有足够的承载力和变形能力，实现了大震未倒。

另一方面，该栋建筑物所呈现的破坏特征再次说明，底框砖房过渡层的受力复杂，按目前规范给出的设计方法难以实现大震不倒。

4 结 语

汶川大地震造成众多底框结构房屋的破坏,作者课题组深入重灾区进行了广泛的实地调研,并结合现行规范,对底框结构在地震中的表现进行了总结及分析。综合汶川地震中底框砖房的表现,得到了以下结论:

(1) 由于底层框架刚度不够,底框砖房的侧移显著集中在底层;

(2) 对地震作用下过渡层的工作机理还存在认识上的盲点,过渡层是底框砖房的抗震薄弱环节;

(3) 部分底框砖房,结构体系混乱是其发生严重破坏或坍塌的关键原因;

(4) 确保上部砌体和框架梁界面之间有可靠连接是保证底框砖房共同工作的重要前提;

(5) 设计和施工质量好的底框砖房能实现“大震不倒”。

根据本次地震中底框砖房的表现,本文提出以下建议:

(1) 抗震设防地区应禁止采用部分底框砖房;

(2) 抗震设防地区应严格控制底框砖房第二层与底层的刚度比,并考虑砖砌体和钢筋混凝土两种材料的力学性质的差异,深入研究不同刚度比下底框砖房的抗震性能,提出更合适的刚度比范围;

(3) 由于过渡层受力复杂,地震时过渡层的地震反应与按现行规范的计算结果可能存在较大差异,建议对此进行深入研究,在设计规范中明确对过渡层的延性和强度要求;

(4) 重视结构概念设计的重要性,希望在规范中对于抗震概念设计能有操作性更强的条文出现。

参考文献:

- [1] 刘航,蓝宗建,梁书亭,等. 底层框架多层砖房模型振动台试验研究[J]. 东南大学学报. 1996,26(5):131-136.
- [2] 刘雁,薛华培,邹筱静,等. 底部两层框架砖房 1/5 比例模型的制作研究[J]. 扬州大学学报:自然科学版, 2000,3(3):67-70.
- [3] 高小旺,王菁,肖伟,等. 底部两层框架-抗震墙砖房的抗震性能[J]. 建筑结构,1999(11):7-11.
- [4] 高小旺,孟俊义,廖兴祥,等. 七层底层框架抗震墙砖房 1/2 比例模型抗震实验研究[J]. 建筑科学,1995(4):18-23.
- [5] 高小旺,肖伟,王菁,等. 底部两层框架-抗震墙砖房侧移刚度分析和第三层与第二层刚度比的合理取值[J]. 建筑结构,1999(11):9-11.
- [6] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震设计规范(GBJ11-89)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [7] 国家地震局科研处. 唐山地震考察与研究[M]. 北京:地震出版社,1981.
- [8] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震设计规范(GB 50011-2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [9] LI Bixiong, WANG Zhe, MOSALAM Khalid M, et al. Wenchuan earthquake field reconnaissance on reinforced concrete framed buildings with and without masonry infill walls[C]. The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008: S31-35.
- [10] 沈聚敏,周锡元,高小旺,等. 抗震工程学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [11] 王亚勇,白雪霜. 台湾 9.21 地震中钢筋混凝土结构震害特征[J]. 工程抗震, 2003(1):1-7.