

汶川地震村镇建筑结构震害调查与分析

李 钢*, 刘 晓 宇, 李 宏 男

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:汶川地震给四川地区特别是村镇地区造成了灾难性的破坏.介绍了四川村镇地区的主要建筑结构形式,及此次地震村镇建筑的震害特点,并对地震中村镇房屋的常见破坏形式进行了分析,提出了村镇建筑抗震方面的建议.通过本次村镇建筑震害调查发现:我国村镇建筑结构普遍缺乏必备的抗震构造措施,存在较大隐患,与村镇建筑相适应的实用抗震技术有待进一步系统化、规范化;村镇房屋建设还缺少完善的国家技术规范指导,村镇建筑抗震能力亟待进一步提高.

关键词:村镇建筑;土木结构;木结构;砌体结构

中图分类号: TU312.3; P315 **文献标志码:** A

0 引 言

近年来,我国进入地震发生频繁期,2008年5月12日14时28分,在四川东部龙门山构造带汶川附近发生的8.0级强烈地震惊动了整个世界.不仅给震中区附近造成灾难性的破坏,而且在四川省和邻近省市大范围造成破坏.在此次地震中,沿地震带大部分地区建筑结构均遭受了不同程度的损坏,其中,村镇建筑遭受到的破坏程度最为严重.

村镇建筑的抗震水平可以反映一个国家的整体抗震能力.发达国家,如美国、日本等非常重视民房的地震安全问题,其村镇建筑普遍具有较强的抗震能力.在发展中国家,由于农村地区地震造成的人员伤亡巨大,各国政府也已开始重视村镇建筑地震安全问题,如哥斯达黎加、洪都拉斯、印度、伊朗、尼泊尔、哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、阿尔及利亚、摩洛哥等国家在村镇建筑抗震技术研究和村镇建筑抗震加固方面进行了程度不同的探索^[1~3].然而,受经济发展水平的限制,大部分发展中国家尚未将村镇建筑建设纳入国家规范管理范围,对村镇建筑抗震技术推广应用进展较慢,其抗震能力仍普遍低下.在国内,自唐山地震以来,大陆共发生了几十次破坏性地震,其中绝大多数

发生在广大农村和乡镇地区.由于广大农村和乡镇地区经济相对落后,农村民居和村镇公共建筑设施防震能力薄弱,在遭受同等地震烈度的条件下,农村人口伤亡和建筑的倒塌破坏程度远高于城市,越贫穷的地区,受灾越严重.自党的十六届五中全会提出建设社会主义新农村的重大历史任务以来,我国村镇正在进行较大规模的基础设施建设.从2005年统计结果来看,全国有 595.8×10^4 户村镇农(居)民新建住宅,占总户数的2.27%,全国村镇房屋竣工建筑面积 $9.78 \times 10^8 \text{ m}^2$,其中住宅 $6.88 \times 10^8 \text{ m}^2$.可以看出,我国村镇住宅面积不断增长,村镇建筑抗震能力成为我国防灾减灾事业中的一个重要问题.本文主要针对汶川地震中四川地区村镇建筑结构的震害特点加以介绍,对作者在灾区调研过程中发现的破坏现象加以分析,给出村镇建筑结构抗震设计相关建议,为以后村镇建筑的抗震设计工作提供参考.

1 四川地区村镇建筑结构形式

四川村镇地区建筑结构形式主要包括土木结构、木结构和砌体结构三类.其中,以砌体结构形式居多,土木结构和木结构数量相对较少,各种结构形式具有如下方面的特点.

收稿日期: 2009-03-15; 修回日期: 2009-07-12.

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ06B03); 沈阳建筑大学结构工程重点实验室开放基金资助项目.

作者简介: 李 钢* (1979-),男,博士,讲师;李宏男(1957-),男,博士,长江学者奖励计划特聘教授,博士生导师.

1.1 土木结构

土木结构指以生土墙或土坯墙作为主要承重构件并采用木屋盖的结构体系。土木结构的历史悠久,具有方便就地取材、可重复利用、造价低廉、居住舒适、能耗低、绿色环保及耐火性高等特点。目前,四川村镇地区的土木结构房屋主要分为土坯墙承重和夯土墙承重两种形式。土坯墙通常指将湿泥和干草搅拌均匀制成块体,晾干后用泥浆砌筑而建成房屋的内外墙。夯土墙则是用掺以一定干草的生土为材料,两侧立模分层夯实而成。两种形式的房屋均采用硬山搁檩的“人”字式木屋架,屋面铺瓦自然排水,也存在少量土坯和夯土混合而成的墙体。

1.2 木结构

木结构通常以木材制成的构件作为主要承重构件,采用木板、土、砖、石等材料作为填充墙体的一种结构形式。在世界范围内,木结构可以称为最古老的一种建筑结构形式,在我国更是有着悠久的历史,很多古建筑均采用木结构的形式。目前我国村镇建筑中有很多仍沿袭古代木结构的形式,如采用抬梁式、穿斗式以及混合式的结构形式,梁柱采用卯榫连接形式,柱底与础石采用卯榫连接或直接将柱子搁置于础石上,屋面仍采用瓦的自然排水等。

1.3 砌体结构

砌体结构是一种常见的建筑形式,在我国的建筑史上起着重要作用。随着经济的发展,人们对住房条件的高要求以及土地费用提高等因素影响下,大量村镇新建房屋更多地采用砌体结构。四川民用住宅一般以二三层较常见,房屋由纵横墙承重,墙体由砖块和水泥砂浆砌筑而成,硬山搁檩的木屋架,屋面采用瓦来进行排水处理,这种房屋多为百姓自己建造,未经过正规的抗震设计。

2 村镇建筑震害特点与震害分析

2.1 土木结构

震害调研中发现,四川村镇地区土木结构相对较少,大多数位于偏远地区,从观察到的土木结构震害特点,可归纳出如下两种常见的破坏形式:

(1) 纵横墙连接破坏

四川地区土木结构形式的村镇建筑绝大部分由居民自建,纵横墙连接处强度明显不足,尤其以土坯墙体承重的房屋最为严重,绝大部分土坯墙外墙转角处发生严重破坏,如图 1 所示。此外,地

震作用下,由于纵横墙缺少连接,墙体发生撞击,纵墙或横墙外闪,出现大面积倒塌破坏,如图 2 所示。



(a)



(b)

图 1 纵横墙连接处破坏

Fig. 1 Damage to the joint between longitudinal and cross wall



(a)



(b)

图 2 纵墙外闪倒塌

Fig. 2 The whole longitudinal wall collapsed

纵横墙及转角处墙体破坏的主要原因在于：第一，墙体转角处缺乏必要的连接和加固措施；第二，很多土木结构房屋建造年代久远，大部分房屋没有进行防潮处理，墙体经过长时间的风雨侵蚀，土坯墙及夯土墙的强度衰退，如图 3 所示. 加之当地居民自制的土坯本身强度低，如图 4 所示，地震作用下引发墙体倒塌。

(2)山墙破坏

调研中发现，绝大多数土木结构山墙出现竖向贯通裂缝，且裂缝较宽. 这主要由于四川地区的土木结构房屋一般分为两层，底层为住房，上层储存粮食或杂物。房屋的山墙都较高，并且采用硬山搁檩，地震作用下屋架与山墙碰撞，搁檩处山墙未

放置垫块，墙体内也没有适当的拉结，使得山墙出现竖向裂缝，如图 5 和图 6 所示。



图 3 破坏土坯房屋的墙体

Fig. 3 Damage to the wall of collapsed adobe house



图 4 房屋的土坯

Fig. 4 The adobe of house



图 5 山墙的竖向开裂

Fig. 5 The cracks of gable wall



图 6 山墙破坏严重

Fig. 6 Serious damage to the gable wall

2.2 木结构

以往及此次地震的震害分析均表明：木结构房屋抗震性能整体表现较好，其主要原因在于木结构房屋质量轻，地震作用力小，由于木结构在我国具有悠久的历史，无论从连接和构件防腐处理等方面技术均较为成熟，未出现严重的倒塌破坏现象. 轻微的破坏特征主要表现在：

(1)填充墙体破坏

虽然木结构构件自身连接牢固，但木结构房屋中木柱与墙体、屋架与墙体之间缺少连接措施。

由于木构件与填充材料的材质不同，表现出的力学特性也不尽相同，加之没有有效连接，在地震中不能保持协同工作，地震时出现填充墙体破坏严重，图 7 所示的村民住宅，穿斗木框架、屋架和屋面瓦均保持完好，但是填充墙破坏较为严重。

(2)木构件破坏

木构件的破坏主要是由于一些木结构房屋年久失修，对木构件没有进行有效的防腐处理，使得部分木构件腐坏、强度下降造成的。这些构件在地

震力作用下产生破坏，并造成房屋其他部分破坏，如图 8 所示。



图 7 木结构填充墙体破坏

Fig. 7 Damage to the infill wall of timber house

2.3 砌体结构

(1)墙体出现 X 形裂缝

X 形裂缝是地震作用下砌体结构最容易出现的一种破坏形式，是墙体承受平面内水平地震剪力造成的，当墙体内产生的主拉应力大于其所能承担的应力时，发生与水平向成 45°角方向的剪

切破坏,在往复地震作用下形成 X 形裂缝^[4]. 调研中发现,四川村镇地区砌体结构的墙体大部分出现 X 形裂缝,甚至部分墙体出现倒塌,如图 9、10 所示.



图 8 木屋架塌落
Fig. 8 The roof of the timber house collapsed



图 9 外墙出现“X”形裂缝
Fig. 9 X-shaped cracks of the exterior wall



图 10 内墙出现“X”形裂缝
Fig. 10 X-shaped cracks of the inner wall

(2)纵横墙连接处破坏

村镇地区砌体结构绝大多数为自建建筑,没有经过正规抗震设计,未设置圈梁和构造柱,门窗洞口也没有设置过梁.墙体与墙体、楼板与墙体之间缺少可靠的连接措施,这样就大大降低了房屋的空间刚度和整体性.墙体在短时间内发生外闪倒塌破坏,使得结构整体失去承载能力,如图 11~14 所示.



图 11 房屋一角坍塌
Fig. 11 Damage to the corner of brick house



图 12 建筑缺少构造柱面墙外闪倒塌
Fig. 12 Exterior wall collapsed due to without constructional columns



图 13 外墙外闪倒塌
Fig. 13 Exterior wall collapsed



图 14 墙角处局部墙体外闪倒塌
Fig. 14 Part of the wall at corner collapsed

(3)扭转破坏

村镇居民自建房屋时对结构体形选择比较随意,不了解建筑体形对抗震能力的影响.为了满足使用要求和外形美观等要求,设计的房屋体形复杂.此外,平面内的布置也没有考虑刚度影响,如 L 形砌体结构,在建筑物端部破坏较为严重,有些房屋还把楼梯间布置在房屋的一端,这样都造成了地震作用下的扭转破坏,如图 15、16 所示.



图 15 楼梯在一端的房屋的破坏
Fig. 15 Damage to the staircase room

(4)墙体孔洞处破坏

此种破坏形式主要由于村镇居民缺乏基本的抗震设计意识,在墙体上随意开设门窗,随意改变

墙体位置和墙厚,由此造成窗口、门等位置角部出现应力集中,而产生裂缝,如图 17、18 所示.



图 16 L 形房屋破坏
Fig. 16 Damaged L-shaped house



图 17 墙体随意开洞的破坏
Fig. 17 Damage to the wall
due to arranging
hole optionally



图 18 随意改变墙体位置造成的裂缝
Fig. 18 The cracks due to changing
position of the wall

(5)悬挑梁根部处山墙开裂

调研中发现,在悬挑梁根部处山墙出现开裂破坏较多,总结其震害特点主要包括两个方面:第一,村镇地区砌体结构多采用木屋架形式,加之个别二层建筑由于设置外廊或屋檐,在外纵墙上部设置悬挑梁,并铺设混凝土楼盖板,而悬挑梁与屋架之间缺乏连接措施,且悬挑部分自重要远远大于屋架部分,地震作用下悬挑屋檐产生的水平地震剪力全部由外纵墙承担,屋顶整体刚度较小,对墙体约束力较小.因此,在悬挑梁根部山墙处产生较大的贯通裂缝,个别建筑出现整体倾覆倒塌现象,如图 19 所示;第二,部分两层以上的砌体结构为增大建筑面积,较多地设置悬挑部分,且悬挑部位下面并未发现支撑柱或支撑墙体,地震时由于悬挑部位承重较大,沿悬挑梁或悬挑板根部产生斜裂缝,使悬挑部分产生倾覆破坏,如图 20 所示.

(6)屋顶破坏

由于四川村镇地区砌体建筑多采用木屋顶结构形式,此次地震中绝大部分屋面瓦均遭到破坏,木屋架破坏现象也屡见不鲜,如图 21、22 所示.



图 19 木屋架与屋檐交接处裂缝
Fig. 19 The cracks of gable wall at the connection of
timber roof truss and eave



图 20 悬挑处倾覆破坏
Fig. 20 Overturn failure on
cantilever beam



图 21 房屋屋顶破坏
Fig. 21 Roof of brick house
collapsed



图 22 临街房屋屋顶破坏
Fig. 22 Damage to the roofs of
houses at side street

其主要原因在于:第一,地震时“鞭梢效应”使得屋顶的摆动较大,大量的屋面瓦脱落,屋架产生错位或塌落破坏;第二,木屋架与墙体之间缺少有效连接,木架本身较轻,因此容易发生移位脱落,这在其他震害现象中也有所体现^[5];第三,在村民自行设计房屋时认为屋架部分属于附属结构,出于节省的角度考虑,用做屋架的木材质量均较差,屋架连接强度和材料本身强度均无法达到要求,导致屋架破坏严重。

3 讨论与建议

通过对“5·12 汶川地震”后四川地区村镇房屋震害的调查和分析可知:目前,我国村镇地区建筑存在较大隐患,从政策管理到技术措施有相当大的不足。我国是一个农业大国,有近9亿农民,占总人口约4/5的比重,提高村镇地区建筑结构的整体抗震性能直接关系到我国房屋建筑的整体质量,也直接影响到我们国家建筑设施抵抗灾害、防御灾害的整体能力。国内学者已经逐渐将研究重点从大城市的高楼大厦转移到村镇建筑上来,提出了一系列村镇建筑的技术措施与方法^[6~13]。这里仅针对本次调研中发现的问题,给出以下几方面的建议:

3.1 政策、法规方面

目前,村镇地区房屋建设还缺少完善的国家技术规范指导,以及相关的法律、法规的约束和保障。通过这次地震再次看到村镇地区防震减灾工作仍存在大量问题,其中包括村镇居民普遍缺乏抗震意识、村镇民居基本未做抗震设计、农民建房仍未纳入统一的管理、村镇规划未考虑地震安全等。随着经济的发展、时代的进步,新时期的村镇建设对防震减灾事业提出了更高的要求,各级政府应把广大农村房屋的地震安全问题提到议事日程,大力推进地震安全农居工程的规划和实施,加强建设管理。此外,应当针对村镇常见的结构形式建立设计规范和操作规程,并对施工人员进行正规的培训,提高其技术水平;同时要重视抗震知识的普及,使村镇的建筑人员能在建房之初就避免一些造成伤亡的隐患,且政府部门应投入更多的精力,监督规范和各措施的实施。

3.2 技术措施

(1)对于土木结构形式而言,应提高土墙承重房屋的整体性,夯土墙承重的房屋,应该选择黏性较好的土进行夯筑,并在土中加入适量的稻草、石

灰等。房屋的墙体应分层连续交错夯实,尤其在内外墙、纵横墙连接处应同时整体夯筑,并设置足够的拉结措施,如埋入竹片、荆条等^[14]。对于土坯墙承重的房屋,在制作土坯时应加入稻草,利用模具成形,砌筑时应满足错缝搭接,避免形成通缝。此外,由于土木房屋有很多生态方面的优点,在全国仍有很多地方建造。因此,需要考虑对传统建筑采用一些新的技术,例如利用机械压制土坯来代替传统的人工风干的土坯,在建造夯土墙承重的房屋时,采用现代化的夯实机。

(2)对于木结构形式而言,应加强填充墙体与木框架的连接。因木结构本身有良好的受力性能,它对于瞬间冲击荷载和周期性疲劳破坏具有良好的延展性,其破坏过程是一个渐变的屈服过程。当房屋在地震中晃动时,木结构骨架仍然可以保持结构的整体稳定^[15]。所以木框架与围护墙的连接是关键,围护墙应与木结构可靠拉结,可以采用木板条将木柱和填充墙连成一个整体。除此以外,应增加对先进生产和建造技术的学习与借鉴,在西方发达国家,木结构已经随着新科技的出现而得到改进和发展,现在仍然在使用和建造,欧洲和北美洲国家的低层木结构房屋设计、建造以及批量化的生产技术已经很成熟,可以借鉴其先进的生产和建造技术。

(3)对于砌体结构而言,从此次地震的震害可以看出:砌体结构中构造柱和圈梁的作用很大,当圈梁和构造柱联合使用时,可以大大提高房屋的空间刚度和整体性。制定村镇地区砌体结构建筑规范和操作规程是提升村镇地区砌体结构抗震性能的根本性措施。在目前村镇地区无指导性规范时,可采用现行的《砌体结构设计规范》^[16]作为设计参考。

4 结 语

村镇建筑抗震设防是一项涉及面广,又受经济条件制约的工作。应该看到,影响村镇房屋抗震能力不足的根本性原因仍是村镇居民普遍缺乏防震减灾意识,村镇建筑缺乏必备的抗震构造措施,以及与村镇结构相适应的经济、实用抗震技术。但也应该看到随着科学技术在村镇地区日益推广,已享受到科学技术带来巨大经济成果的农民,在建设自己住宅的时候会逐渐摆脱传统习惯的束缚,接受科学的建房观念,这是推进村镇建设抗震设防工作的大好时机。深入总结汶川地震中村镇

建筑结构的震害特点,以此来提高村镇居民的抗震设防意识和村镇建筑的综合抗震性能,争取将未来的地震灾害减小到最低限度,以保护村镇人民生命财产安全.

致谢:本次地震现场调查过程中得到了国家地震局工程力学研究所的大力支持,并得到了孙柏涛研究员、李山有研究员、戴军武研究员等的帮助,在此表示衷心的感谢.

参考文献:

- [1] TAGHIKHANY T, TEHRANIZADEH M, ARABAMERI M. Vulnerability of hybrid masonry building under seismic action [C] // **The 14th World Conference on Earthquake Engineering**. Beijing: Tsinghua University Press, 2008
- [2] SOLTANI M, XUEHUI A, MAEKAWA K. Cracking response and local stress characteristics of RC membrane elements reinforced with welded wire mesh [J]. **Cement and Concrete Composites**, 2004, **26**:389-404
- [3] GAMBAROTTA L, LAGOMARSINO S. Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. Part I: The mortar joint model and its applications [J]. **Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamic**, 1997, **26**(4):423-439
- [4] 于文,葛学礼,朱立新. 四川汶川8.0级地震都江堰周边村镇房屋震害分析[J]. 工程抗震和加固改造, 2008, **30**(4):45-49
- [5] 袁中夏,谭明,马占虎. 汶川大地震四川省青川县

- 砖混结构村镇房屋震害分析[J]. 西北地震学报, 2008, **30**(4): 317-325
- [6] 石玉成,马尔曼,何文贵,等. 2003年甘肃民乐-山丹6.1、5.8级地震震害特点及启示[J]. 世界地震工程, 2006, **22**(3):95-101
- [7] 李宏男,肖诗云,霍林生. 汶川地震震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2008, **29**(4):10-19
- [8] 李爱群,周铁钢. 汶川地震绵竹城区及村镇建筑震害纪实分析与思考[J]. 建筑结构, 2008, **38**(7):10-14
- [9] 任卫教,孟履祥,刘立渠. 关于汶川地震中村镇房屋震害的几点思考[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, **30**(4):99-101
- [10] 孙景江,马强,石宏彬,等. 汶川地震高烈度区城镇房屋震害简介[J]. 地震工程与工程振动, 2008, **28**(3):7-15
- [11] 清华大学土木结构组,西南交通大学土木结构组,北京交通大学土木结构组. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, **29**(4):1-9
- [12] 吴华伟. 村镇木构架房屋抗震性能试验研究[D]. 天津:河北工业大学, 2006
- [13] 娄宇,叶正强,胡孔国,等. 四川汶川5·12地震房屋震害分析及抗震对策建议[J]. 建筑结构, 2008, **38**(8):1-7
- [14] 许丽萍,马全明. 夯土墙在新的乡土生态建筑中的应用——浙江安吉生态屋夯土墙营造方法解析[J]. 四川建筑研究, 2007, **33**(6):214-217
- [15] 贡忠义. 砌体结构抗震措施整体作用研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2003
- [16] 中华人民共和国建设部. GB 50003—2001 砌体结构设计规范[S]. 北京:中国建设工业出版社, 2006

Seismic damage investigation and analysis on rural buildings in Wenchuan earthquake

LI Gang*, LIU Xiao-yu, LI Hong-nan

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Wenchuan earthquake resulted in a lot of houses in villages or towns damage or collapse. To understand the primary weakness of rural houses, the typical construction form is introduced, and the typical building damage form in towns and villages caused by Wenchuan earthquake is investigated. Furthermore, several seismic fortification measures and suggestions about reconstruction are proposed. The conclusions are drawn through the seismic damage investigation and analysis on the rural buildings in this earthquake that rural buildings have some shortages on seismic fortification measures and the applied seismic technologies for these buildings should be summarized systematically. In order to improve the seismic capability of rural buildings, more fully state codes should be presented as soon as possible.

Key words: rural houses; adobe-timber structure; wood frame structure; masonry structure