

徐超, 陈波, 李小军, 陈学良, 吕红山, 耿飞, 温增平. 2013. 芦山 $M_s7.0$ 地震建筑结构震害特征. 地震学报, 35(5): 749–758.

Xu Chao, Chen Bo, Li Xiaojun, Chen Xueliang, Lü Hongshan, Geng Fei, Wen Zengping. 2013. Seismic performance characteristics and damage of buildings in Lushan $M_s7.0$ earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 35(5): 749–758.

芦山 $M_s7.0$ 地震建筑结构震害特征^{*}

徐 超 陈 波 李小军 陈学良
吕红山 耿 飞^{*} 温增平

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

摘要 基于 2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M_s7.0$ 地震灾区的房屋建筑震害调查资料, 初步分析了这次地震中建筑结构的震害特征. 结合典型建筑结构震害案例, 从抗震概念设计和抗震构造措施的角度对震害机理进行了探讨, 总结了结构抗震设计方面的经验和教训并给出了相关的建议. 分析表明, 农村自建的砖木和土木结构房屋的抗震能力普遍较差; 砖混结构和砌体-框架混合结构的抗震性能需要严格的抗震构造措施给予保证, 包括合理设置钢筋混凝土构造柱和圈梁, 合理设置承重墙的数量以及承重墙上开洞的数量和位置; 由于鞭梢效应造成的突出屋顶的楼梯间和加层的破坏需引起重视.

关键词 芦山地震 房屋建筑 震害特征 震害机理

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.05.013 中图分类号: P315.9 文献标志码: A

Seismic performance characteristics and damage of buildings in Lushan $M_s7.0$ earthquake

Xu Chao Chen Bo Li Xiaojun Chen Xueliang
Lü Hongshan Geng Fei^{*} Wen Zengping

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: The performance of buildings in the Lushan, Sichuan, $M_s7.0$ earthquake of April 20, 2013, caused a considerable loss of property. The damage mechanism is analyzed from the seismic conceptual design and aseismic measure. Furthermore, the lessons learned from structures and the damage characteristics for typical buildings are summarized. Analysis results show that the seismic resistance capacity of masonry-timber roof truss buildings and adobe-wood buildings are generally very poor in rural areas. Strict earthquake-resistant measures are needed to guarantee the seismic capacity of masonry buildings and masonry-frame hybrid buildings, so that it must be given a reasonable set of

^{*} 基金项目 国家科技支撑项目(2012BAK15B01)、国家自然科学基金青年基金项目(51208476)、地球物理研究所基本科研业务专项(021907, 021901)资助.

收稿日期 2013-05-18 收到初稿, 2013-06-20 决定采用修改稿.

^{*} 通讯作者 e-mail: gf-6325007@163.com

reinforced concrete constructional columns, ring beams and a reasonable set of the number of bearing walls as well as the number and location of openings on bearing walls. The damage of outshoot roof staircases and adding story caused by whipping effect should be avoided.

Key words: Lushan earthquake; building structures; seismic damage characteristic; seismic damage mechanism

引言

2013年4月20日8时2分,四川省雅安市芦山县(30.3°N , 103.0°E)发生 $M_s7.0$ 地震,地震震源深度13 km. 这是继2008年5月12日汶川特大地震之后龙门山断裂带又一次灾难性地震事件. 震中距成都约110 km,距汶川大地震震中不足100 km. 截至4月28日8时,共记录到余震5531次,其中 $M_s \geq 3.0$ 地震113次,最大余震为 $M_s5.4$. 截至4月24日14时30分,共造成196人遇难,失踪21人,11470人受伤,累计造成231余万人受灾(中国地震局,2013a). 地震发生后,中国地震局地球物理研究所立即启动应急响应,地震现场工作队于当天上午出发奔赴灾区开展现场震害调查、灾害损失评估等工作. 通过对芦山县、天全县、荥经县、汉源县和石棉县的震害调查,收集了灾区各种典型建筑结构的震害资料. 基于这些震害资料,本文初步分析了这次地震中土木结构、木结构、砖木结构、砖混结构、砌体-框架混合结构及框架结构房屋的震害特征,并结合典型建筑结构震害案例,从抗震概念设计和抗震构造措施的角度对震害机理进行了探讨,旨在为今后的建筑物抗震设计提供参考.

1 房屋建筑震害特征

芦山地震发生在四川西部山区,震中位于雅安市芦山县龙门乡、宝盛乡、太平镇交界,距芦山县城只有10 km. 根据中国地震局发布的地震烈度图,震中烈度高达IX度,全部受灾面积约 18682 km^2 ,如图1所示. 由于当地经济相对比较落后,多数民房破坏严重,特别是偏远山区,道路极不方便,房屋多以土木和砖木结构为主. 有些房屋由于受汶川地震等因素影响,还没有来得及重建或者加固,在这次地震中破坏也很严重. 在汶川地震之后重建或者加固的房屋,大多表现良好.

震区房屋建筑的结构形式多种多样,本文将其主要分为以下几类:木结构、土坯-木屋架结构、砌体-木屋架结构、砖混结构(包含砌体-框架混合结构)及钢筋混凝土框架结构. 此外,芦山县人民医院的主楼,是国内首个经历大地震检验的隔震建筑,在震后受到广泛的关注,本文将其单独列出加以分析. 下面分别介绍各类建筑的震害特征.

1.1 土坯-木屋架房屋

部分偏远山区,如汉源县小堡藏彝族自治乡,由于经济落后,交通不便,水泥、砂石、钢筋等运送很不方便,绝大多数房屋仍然是以土坯墙为承重结构,屋架大梁直接搭在横山墙上. 而且这样的房屋多数年代久远,房屋土坯墙体底部大多已剥蚀严重,墙体承载力低,抗震性能较差. 虽然远离极震区,但仍然受到不同程度的损害,如墙体开裂、木屋架塌陷等,如图2所示.

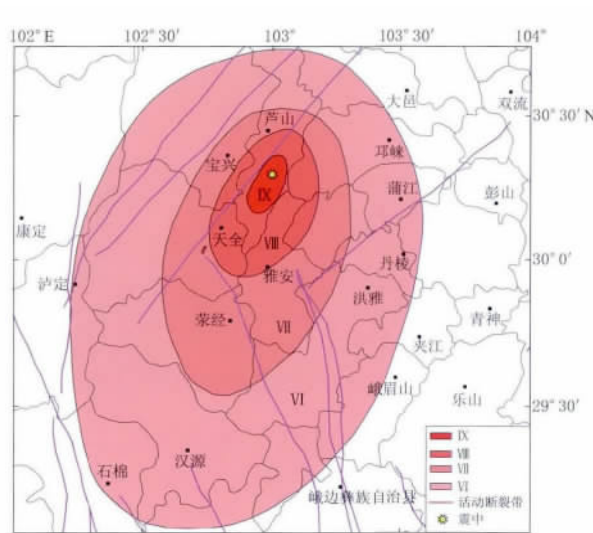


图 1 2013 年 4 月 20 日四川省芦山 $M_s 7.0$ 地震烈度图
(据中国地震局(2013b)2013 年 4 月 25 日发布的烈度图修改)

Fig. 1 Seismic intensity map of Lushan, Sichuan, $M_s 7.0$ earthquake occurred on 20 April 2013 (revised after the seismic intensity map issued by China Earthquake Administration (2013b) on 25 April 2013)



图 2 土木结构房屋的震害。(a) 墙体开裂;(b) 木屋架塌陷

Fig. 2 Seismic damages of adobe-wood buildings. (a) Wall crack; (b) Collapse of timber roof truss

1.2 木结构

由于木材可以就地取材,相对造价较低,在一些乡村,木结构房屋还是一种比较常见的结构形式。由于木结构房屋具有较好减震耗能连接方式,如榫卯节点、柱脚“平摆浮搁”以及斗拱等(潘毅,王超,2012)。在此次地震中,多数这类房屋并未出现结构性损坏。但这类房屋往往年代久远,甚至上百,年久失修,部分房屋出现梁柱歪斜,屋面坍塌,甚至完全倒塌的情况。也有一些房屋内的隔墙使用砌体或者土坯,由于与主体结构连接不够,出现倾倒情况。该类房屋的震害如图 3 所示。

1.3 砌体-木屋架结构

砌体-木屋架结构房屋采用砖墙承重,屋面采用硬山搁檩,檩条上直接铺瓦的结构形式;无钢筋混凝土构造柱和圈梁。这类房屋在灾区较为常见,以民房居多。由于没有抗震构造措施,其抗震性能普遍较差,加之为了节约成本,农民自建房中很多采用“12”墙承重,

导致了该类房屋在这次地震中遭受了较为严重的破坏. 其震害主要表现为严重掉瓦、屋架坍塌、墙体严重开裂、墙体倒塌等, 典型震害如图 4 所示.

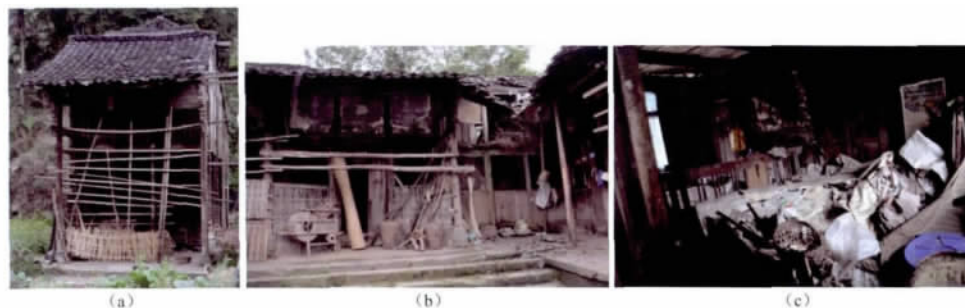


图 3 木结构房屋震害. (a) 基本完好; (b) 屋架局部塌陷; (c) 隔墙倒塌

Fig. 3 Seismic damages of wood buildings. (a) Basically well-remained; (b) Local collapse of roof truss; (c) Collapse of partition wall



图 4 砌体-木屋架房屋震害. (a) 掉瓦; (b) 屋架坍塌; (c) 墙体严重开裂; (d) “12”厚墙体外闪倒塌

Fig. 4 Seismic damages of masonry-timber roof truss buildings. (a) Drop of tile; (b) Collapse of roof truss; (c) Serious crack of wall; (d) Collapse of 12 cm thick wall

1.4 砖混结构

地震区村镇的住宅、教学楼、医院, 城市的一些旧的居民楼、办公楼多采用的砖混结构, 是震区非常常见的一种结构类型. 灾区的砖混结构墙体多采用烧结普通粘土砖, 也有个别使用混凝土小型空心砌块. 此次地震中, 该类型房屋的震害主要表现为承重墙及窗间墙的严重开裂(X 形剪切裂缝)、局部压碎或坍塌. 少数房屋出现完全倒塌的情况, 但也有相当一部分砖混结构由于墙体严重损坏已经不能再继续使用. 砖混房屋的震害如图 5 所

示. 比较典型的破坏原因有: 墙体单薄, 承载力不足(承重墙有为数不少的“18”墙和“12”墙); 采用强度较低的石灰砂浆代替水泥砂浆砌筑; 未设置构造柱和圈梁, 开窗较大和较多, 结构整体性较差.



图 5 砖混结构震害. (a) 承重墙剪切裂缝; (b) 承重墙严重破坏; (c) 窗间墙剪切裂缝; (d) “18”厚承重墙局部垮塌; (e) 非承重墙外闪倒塌; (f) 毁坏的砌体结构

Fig. 5 Seismic damage of masonry buildings. (a) Shear cracks of bearing wall; (b) Serious damage of bearing wall; (c) Shear cracks of wall between windows; (d) Local collapse of 18 cm thick bearing wall; (e) Collapse of non-bearing wall; (f) Destroyed masonry building

1.5 砌体-框架混合结构

砌体-框架混合结构主要指底框砖混结构(竖向混合, 底部框架或者部分框架, 上部砖混), 也有部分框架-部分砖混(水平混合)的结构. 这类结构的体系大多比较混乱, 在这次地震中遭受了不同程度的损坏. 底框结构的底层往往作为商铺使用, 开间较大, 填充墙设置较少, 导致底层的抗侧刚度不足, 形成薄弱层, 在地震作用下极易发生破坏. 而对于部分框架-部分砖混的水平混合结构, 框架和砌体承重墙抗侧力构件的承载力和变形能力的不协调, 以及平面抗侧刚度的极不均匀都会加重震害. 砌体-框架混合结构的震害主要表现为底部框架由于变形集中在柱脚和梁柱, 节点处出现塑性铰, 底部填充墙出现严重剪切破坏甚至倒塌; 上部砌体结构的破坏. 图 6 所示为这类结构的主要震害情况.

1.6 框架结构

在调查区域, 框架结构较为少见. 该类房屋一般都经过正规的抗震设计, 震害也较轻. 图 7 所示为汶川地震后重建的龙门乡街道上的框架结构, 只有极少数的填充墙出现轻微裂缝.

1.7 隔震结构

芦山医院综合楼采用了橡胶垫减震技术, 是震区唯一, 也是我国第一栋经历地震检验



图 6 砌体-框架混合结构震害。(a) 受损的底框结构;(b) 底层柱顶破坏;(c) 底层柱底破坏;
(d) 底层柱中剪切裂缝;(e) 底层填充墙破坏;(f) 上部砌体结构破坏

Fig. 6 Seismic damage of masonry-frame hybrid buildings. (a) Damaged of bottom frame structure;
(b) Damage of the top of column; (c) Damage of the bottom of column; (d) Shear crack at the middle
of column; (e) Shear cracks of infill wall; (f) Damage of the masonry structure on the top



图 7 框架结构填充墙轻微裂缝

Fig. 7 Slight cracks on infill walls of
reinforced concrete frame building

的隔震建筑,其全貌如图 8a 所示。该建筑在此次地震中表现良好,除局部个别墙体出现轻微裂缝外(图 8b),主体结构以及附属结构(门、窗、吊顶、装饰等)均未出现损坏。而与之相距不足 100 m 的芦山博物馆却遭受了更为严重的损伤(图 8c)。值得注意的是,由于加了减震技术的综合楼在地震作用下,其整体侧向位移要大于一般结构,从而导致了主楼与底层附属结构连接处发生损坏,以及主楼与附属楼产生碰撞造成连接处门诊楼的梁柱发生破坏(图 8d, e)。这是隔震结构在建造过程中需要注意的问题,应在主体结构与周围附属结构之间设置一定的隔震措施,防止由于主体结构过大的水平位移造成附属结构的破坏。

2 典型震害的原因分析

2.1 开窗对抗震性能的影响

与汶川地震中建筑结构的震害类似(熊立红等, 2008; 李小军等, 2008),许多自建的砌体结构底层存在门窗面积过大、开洞过多且位置不合适等问题,这不仅会造成结构抗侧刚度的不足,而且会导致应力集中现象,加重墙体的破坏程度。另外,承重墙过多的开窗会使得窗间墙体形成“短柱”,在地震作用下由于短柱效应极易出现剪切破坏。不合理开窗造成的震害现象如图 9 所示。



图 8 采用隔震结构的芦山医院在芦山地震中的表现. (a) 芦山医院全貌; (b) 填充墙轻微裂缝; (c) 医院对面芦山博物馆的震害; (d) 主楼与附属结构连接处的破坏; (e) 主楼与附楼连接处的破坏
Fig. 8 Seismic performance of isolated building. (a) Lushan Hospital; (b) Slight cracks on infill wall; (c) Damage of Lushan Museum opposite to Lushan Hospital; (d) Damage of connection between main building and attachment; (e) Damage of connection between main building and attached building



图 9 不合理开窗造成的震害加重. (a) 承重墙不合理开窗; (b) 承重墙开窗过大; (c) 非承重墙开窗过大; (d) 墙体开窗过多造成短柱效应

Fig. 9 Inappropriate location of windows increasing the seismic damage. (a) Inappropriate location of windows on bearing wall; (b) Oversized window on bearing wall; (c) Oversized window on non-bearing wall; (d) Short column effect caused by excessive windows on the wall

2.2 不规则结构的震害

我国建筑抗震设计规范对建筑体型均匀规整性有明确要求(中华人民共和国建设部, 2001), 历次地震的震害现象多次说明了体型均匀规整的重要性(温增平等, 2009; 李巨文等, 2013). 然而这种平面或者立面布置不规则的结构在灾区仍然非常常见, 震害往往都比较严重. 例如图 10a 所示的二层外挑的竖向不规则砖混结构在灾区尤为普遍, 这类建筑由于“头重脚轻”, 加之底层墙体普遍较少, 结构整体的竖向刚度存在突变, 很容易造成底层的严重破坏. 图 10b 所示为结构平面呈不规则多边形的砖混房屋, 这类房屋容易在扭转地震作用下出现严重的破坏. 图 10c, d 为平面呈“L”型, 竖向有质量和刚度突变的建筑; 由于传力途径不明确, 在复杂的地震作用下均遭受了严重的破坏, 已失去使用功能.



图 10 不规则布置造成的震害加重. (a) 头重脚轻; (b) 平面呈多边形; (c), (d) 平立面均不规则

Fig. 10 Damage of irregular buildings. (a) Vertical uneven mass distribution; (b) Polygon layout; (c), (d) Irregular layout of both horizontal and vertical

2.3 屋顶楼梯间和加层的震害

调查中发现, 一些建筑的楼梯间或者顶部加层相对于主体结构发生更为严重的破坏, 如图 11 所示. 这种屋顶突起物, 由于“鞭梢效应”会增加其地震反应, 容易出现较主体结构更明显的震害, 在房屋设计时应尽量避免. 图 11d 所示的屋顶局部加层的严重震害是值得关注的问题. 这种屋顶的局部加层往往缺乏与主体结构的有效连接, 不能与主体结构有效形成整体; 加之“鞭梢效应”的存在, 很容易出现墙体闪落甚至顶部结构垮塌的现象. 笔者

曾经在调查玉溪市房屋建筑特征时发现大量此类屋顶加层的房屋, 对其抗震性能一直心存疑虑, 希望此次地震的经验教训可以为相关部门提供一定的参考价值。



图 11 突出屋顶的楼梯间和加层的破坏。(a) 屋顶楼梯间墙体开裂;(b) 屋顶楼梯间墙体开裂;
(c) 屋顶楼梯间垮塌砸坏主体结构;(d) 屋顶加层结构发生墙体闪落

Fig. 11 Damage of outshoot roof staircases and adding story. (a) Wall cracking of outshoot roof staircases;
(b) Wall cracking of outshoot roof staircases; (c) Damage of main structure caused by collapsed
outshoot roof staircases; (d) Collapse of walls of adding story

2.4 建筑之间的碰撞

由于不同相邻建筑结构形式, 其高度、刚度和重量的不同, 在地震作用下, 往往结构运动不协调, 容易发生碰撞, 进而加重结构损坏。例如如图 12 所示为两栋高度不同的相邻建筑之间未采取任何防震措施, 由于相互碰撞造成了一定的破坏, 而与之相近的另外两栋建筑中间设置了一定的空间而未发生任何损坏。这种现象在历次地震的震害中也比较多见, 应引起足够的重视, 在规划和设计时应采取相应措施以避免这种情况的出现。

3 结论和建议

每一次大地震所造成的灾难都值得广大土木工程从业人员深思, 地震中各类建筑物的表现极大地丰富了人们对其抗震性能的认识。本文通过对芦山



图 12 碰撞造成的破坏
Fig. 12 Damage caused
by collision

$M_s7.0$ 地震中房屋建筑的震害分析,得到以下几点认识:

1) 由于当地经济相对落后,自建民房以土木、砖木等造价较低的结构为主。此外,为了节省成本,许多承重墙厚度和砌筑砂浆不满足要求,导致其抗震性能普遍较差。随着我国经济的发展,在资金充裕的前提下,应选择更有利于抗震的结构形式,逐步提高农村中自建民房的抗震能力。

2) 砖混结构和砌体-框架混合结构的抗震性能需要严格的抗震构造措施给予保证,包括合理设置钢筋混凝土构造柱和圈梁,合理设置承重墙的数量和开洞位置,加强承重墙的安全储备,以及选择规则的结构平面和竖向布置等。

3) 屋顶突起物及屋顶局部加层所形成的“鞭梢效应”,以及相邻建筑物之间的相互碰撞都会加重震害,在规划和设计时应采取相应的措施以避免以上情况的出现。

4) 为了提高经济落后地区建筑结构的抗震能力,建议加强各级政府、行政部门和普通群众的抗震防灾意识,加强结构抗震体系和概念设计的教育,并在抗震构造措施方面严格执行设计规范的规定。对于农村自建住宅,政府应组织专业技术人员给予指导,合理选择结构形式并设置抗震措施,以最大程度地减少因建筑物抗震能力不足倒塌破坏造成的人员伤亡和经济损失。

参 考 文 献

- 李巨文,薄景山,卢滔,蔡晓光,张建毅,张宇东. 2013. 玉树 7.1 级地震学校建筑震害分析[J]. 自然灾害学报, 22(1): 124-129.
- 李小军,于爱勤,甘朋霞,李敏,刘浪. 2008. 汶川 8.0 级地震北川县城区灾害调查与分析[J]. 震灾防御技术, 3(4): 352-362.
- 潘毅,王超. 2012. 汶川地震中木结构古建筑的震害调查与分析[J]. 建筑科学, 28(7): 103-106.
- 温增平,徐超,陆鸣,杜修力,李鸿晶,熊立红,刘爱文,李小军,周正华. 2009. 汶川地震重灾区典型钢筋混凝土框架结构震害现象[J]. 北京工业大学学报, 35(6): 753-760.
- 熊立红,杜修力,陆鸣,李立云,温增平,李鸿晶,刘爱文. 2008. 5·12 汶川地震中多层房屋典型震害规律研究[J]. 北京工业大学学报, 34(11): 1166-1172.
- 中国地震局. 2013a. 四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震已造成 196 人死亡[EB/OL]. [2013-04-24]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/468/553/100342/100345/20130424151225623554842/index.html>.
- 中国地震局. 2013b. 中国地震局发布四川芦山“4·20”7.0 级强烈地震震烈度图[EB/OL]. [2013-04-25]. <http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/464/100285/20130504223531716501562/index.html>.
- 中华人民共和国建设部(主编). 2001. 中华人民共和国国家标准: 建筑抗震设计规范(GB50011-2001)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 8-10.

作者简介



郭 晓 中国地震局兰州地震研究所高级工程师。2005 年中国地震局兰州地震研究所固体地球物理学专业毕业，获硕士学位。主要从事卫星遥感在地震预测预报中的应用、数字化地震波资料处理与应用和地震活动性安全性评价等研究工作。中国地震学会会员。



徐 超 中国地震局地球物理研究所助理研究员。2006 年华中科技大学土木工程专业毕业，获学士学位；2009 年中国地震局地球物理研究所城市防灾减灾与防护工程专业毕业，获硕士学位；2012 年中国地震局地球物理研究所固体地球物理学专业毕业，获博士学位。主要从事地震动工程特性和结构抗震方面的研究。



洪海春 江苏省地震局高级工程师，国家二级注册地震安全性评价工程师，国家初级注册地震灾害调查评估师。2007 年河海大学岩土工程专业毕业，获博士学位。曾从事边坡岩体锚固工程方面的研究。现主要从事地震岩土工程、地震灾害预防和地震应急救援方面的研究与开发。江苏省地震学会会员。

注：孟令媛、刘瑞丰、蒋长胜、马钦忠、王玉石的简介分别见本刊：Vol. 33, No. 5；Vol. 25, No. 1；Vol. 27, No. 3；Vol. 26, No. 3；Vol. 32, No. 2。