

芦山 7.0 级地震芦山县老城区房屋建筑 震害特征与因素研究*

洪海春, 杨伟林, 黄伟生, 彭小波, 李细兵

(江苏省地震局, 江苏 南京 210014)

摘要: 根据芦山 7.0 级地震芦山县老城区房屋建筑的震害现场调查资料, 进行震害特征与因素研究。结果表明: 典型的房屋建筑震害特征包括砖混结构、砖木结构和砖石结构房屋全部或者部分倒塌、墙体错动和贯通开裂以及房顶瓦片滑落等, 框架结构房屋构造柱变形、断裂和墙体开裂等; 房屋建筑遭到破坏的内在因素包括缺少圈梁和构造柱、荷载分布不当、选址不规范等; 其破坏成因机理可以归结为近场大震强地震动作用、局部场地效应、行波效应和施工质量较差等。同时, 讨论了砖混结构、砖木结构、框架结构和砖石结构抗震设计的加固方法和改善抗震性能的构造措施等, 为房屋建筑抗震设防和减轻震害损失等提供参考。

关键词: 芦山 7.0 级地震; 震害特征与因素; 局部场地效应; 行波效应

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)04-0634-08

0 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7.0级地震, 地震造成房屋大面积倒塌。笔者在震后奔赴芦山地震灾区, 进行了地震现场的烈度调查、灾害评估、地震科考等工作。

芦山县老城区房屋建筑的建筑结构类型主要包括砖混结构、砖木结构、砖石结构和框架结构。李碧雄等(2009), 王翠坤和杨沈(2008), 李宏男等(2008), 李志强等(2013), 贺秋梅等(2007), 洪海春等(2011)针对汶川大地震造成房屋建筑不同程度破坏, 根据震害调查统计和典型震害分析, 总结出不同类型的房屋建筑所表现的反应特征各不相同。砖混结构、砖木结构、砖石结构的震害程度比框架结构要严重, 造成这种现象的原因, 吕伟荣等(2012), 蔡勇(2011)从砌体材料的抗剪等力学性质进行了分析; 周云等(2009), 谭皓等(2011), 伍圣喜等(2007), 袁建力(2013), 金波等(2013)提出改进砌体结构抗震性能的具体措施; 吴波等(2011), Bozdogan(2009), Lu(2002), Shieh-Beygi 和 Pietruszczak

(2008), 韦锋等(2009), Panagiotakos 和 Fadis(2001), Pantazopoulou 和 French(2001), 陈再现等(2011)则在试验研究成果的基础上探讨了框架结构的剪力墙和构造柱等抗震构造措施。从整体情况来看, 在芦山县老城区结构类型、建筑年代和施工质量等相同情况下的房屋建筑, 从南到北震害逐渐加强, 自西向东震害逐渐严重, 造成这些差异的主要原因初步推测为局部场地条件等对震害的影响, 但在这方面相关的分析和探讨相对较少, 有待于进一步深入研究。同时, 已有的研究成果缺乏对于近场大震强地震动作用、行波效应等的分析和探讨。

笔者对芦山地震极震区和重灾区交界处的芦山县老城区的部分房屋建筑进行抽样调查, 分析总结了芦山县老城区在芦山地震中的震害特征, 研究了其破坏形成的原因, 旨在为将来改善房屋建筑的抗震性能等提供参考。

1 房屋建筑震害特征

1.1 砖混结构房屋建筑震害

砖混结构房屋建筑是芦山老县城的大多数房屋结构类型, 不同的房屋布局、不同建造年代和不同

* 收稿日期: 2013-11-27.

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51208234)和江苏省地震局长科研基金(201401)联合资助.

地点，其纵墙和横墙的破坏程度不同，内纵墙和内横墙大多数形成交叉裂缝，有的墙体被“震酥”、有的局部倒塌（图1），不可修复。部分砖混结构房屋在门窗洞口容易出现水平裂缝（李宏男等，2008，周云等，2009，；洪海春等，2011）。

红军广场旁边的两层砖混结构房屋出现阳台塌落、墙体局部倒塌的现象，承重横墙剪切破坏和开裂。同时，部分横墙墙体突出、部分横墙墙体凹陷。窗间墙的中心部位是突出最明显的部分，与墙体凹陷部分的最大差值达到10 cm（图1）。



图1 砖混结构房屋局部倒塌

Fig. 1 Local collapse of brick concrete building

有些砖混结构房屋建筑的走廊护栏、女儿墙、挑檐等是用厚12 cm砖砌筑而成的，在地震时部分或者全部掉落，这是因为这些房屋缺乏抗震构造措施，在水平地震作用下，砖砌护栏与楼板接触部位抗剪强度低而导致的。

汉城大酒店对面的砖混结构房屋，构造柱与圈梁的节点部位上方靠近窗户处发生箍筋变形和弯曲（图2），致使箍筋基本失效，混凝土开裂、



图2 砖混结构的构造柱开裂和变形

Fig. 2 Column fracture and deformation of brick concrete building

剥落，纵筋受压屈服（吕伟荣等，2012；蔡勇，2011；周云等，2009；谭皓等，2011；伍圣喜等，2007），主要是由于构造柱与圈梁设置不太合理、承重墙体面积突变产生应力集中，也有可能是构造柱的箍筋配置不足，这种震害现象在高烈度区较为普遍。

由于“鞭梢效应”作用，部分三、四层砖混结构房屋的顶层钢筋混凝土预制楼板被地震水平作用晃动甩出，掉落在地面上成碎块。预制楼板厚度较薄、强度较低，其中放置的钢筋数量较少、直径较小，其厚度约为8 cm（图3）。但是，个别二层砖混结构房屋的预制楼板整体掉落、比较完整。由此可知，直接将预制梁和楼板浮放在承重墙体上导致施工质量较差，预制楼板间的连接构造、配筋和施工质量等不能满足有关规范的要求（GB50003—2001；JGJ161—2008；GB50011—2010）。



图3 砖混结构房屋的预制楼板掉落

Fig. 3 Fall of prefabricate slab of brick concrete building

芦山河岸坡出现局部小范围崩塌，部分在芦山河岸边新修建的砖混结构房屋，由于开间宽、层高大，选址不当、地基处理不到位，设置圈梁不合理、缺乏构造柱，使得整体结构严重破坏，二层出现局部倒塌（图4）。当地居民认为靠近芦山河旁边风景好，房屋地基没有经过特殊处理，房屋的横向、纵向跨度大，导致房屋局部倒塌或者严重破坏。

砖混结构房屋墙体绝大多数发生破坏，破坏类型主要为沿门窗洞口的斜向裂缝、水平裂缝或者交叉裂缝（李碧雄等，2009；王翠坤，杨沈，2008；贺秋梅等，2007；洪海春等，2011）。纵横墙交接处

是抗震的薄弱点(镇(乡)村建筑抗震技术规程, 2008), 但由于纵横墙之间的联接部位处理措施不到位, 不符合相关的规范, 使得纵横墙出现通天的竖向裂缝, 纵横墙墙体位移量达到 10 cm (图 5)。



图 4 芦山河岸边砖混结构房屋严重破坏
Fig. 4 Serious destruction of brick concrete building in the side of Lushan River



图 5 砖混结构房屋墙体位移
Fig. 5 The deformation of wall of brick concrete building

在地震作用下多层砖混结构房屋顶层楼梯间突屋面(阁楼)部分严重破坏, 出现贯通裂缝, 有的甚至发生局部垮塌或全部倒塌, 造成楼梯间被倒塌的砖块填塞。由于砖块与砖块之间的砂浆配合比不当、砂浆不饱满(王威等, 2011), 导致砂浆强度低、粘结性差。同时, 现浇钢筋混凝土楼梯也出现平行于梯段板的裂缝, 但是没有暴露出钢筋。芦山县检察院家属楼部分多层砖混结构房屋楼梯间墙肢破坏严重, 导致现浇混凝土楼板倒塌(图 6)。

为了防暑降温, 部分居民在自建房屋的房顶蓄水, 有的甚至在房顶培土种植蔬菜和花草, 屋

顶的水荷载在地震作用下, 使得荷载分布更加不均匀(洪海春等, 2012), “头重脚轻”现象加剧, 容易产生剪切破坏, 从而导致地震破坏加剧, 有的墙体出现交叉裂缝、墙体渗水(图 7)。有的房屋出现裂缝后, 水沿着缝隙下漏, 墙体承载能力和房屋抗震性能进一步削弱。



图 6 楼梯间现浇混凝土楼板倒塌
Fig. 6 Collapse of cast-in-place concrete floor in the stairs



图 7 砖混结构房屋楼顶蓄水
Fig. 7 Saving water of the roof of brick concrete building

两层砖混结构房屋由于横墙和纵墙的结合部位没有构造柱, 在距离地面高约 2 m 处, 横墙和纵墙在水平两个方向均出现贯穿型开裂、错动和位移, 其值均达到 15 cm (图 8)。造成这种破坏的主要原因是房屋纵横墙连接部位缺乏必要的抗震构造措施。纵横墙连接处由于受到两个方向地震力的作用, 受力比较复杂, 容易产生应力集中, 特别是墙角部位受到房屋的约束相对较弱, 更容易破坏(李碧雄等, 2009; 王翠坤, 杨 沈, 2008;

李宏男等, 2008; 李志强等, 2013; 贺秋梅等, 2007; 洪海春等, 2011)。

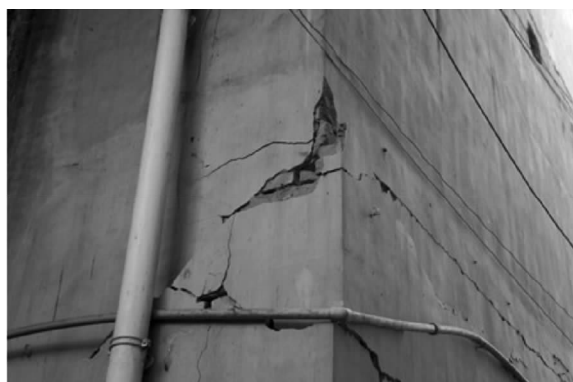


图8 砖混结构房屋在水平两个方向位移
Fig. 8 Deformation of the wall of brick concrete building in two directions

1.2 砖木结构房屋建筑震害

砖木结构房屋建筑是芦山老县城的少数房屋结构类型, 部分自建砖木结构房屋通常没有正规的设计和施工, 如砖柱内有木梁直接埋入, 破坏了砖柱的整体性, 导致该类房屋抗震性能较差。带砌体墙的穿斗木构架结构房屋严重破坏或者毁坏, 局部墙体倒塌、屋脊破坏和屋顶瓦片掀翻、滑落, 部分连接较差的木屋顶出现脱榫现象 (图9)。



图9 砖木结构房屋严重破坏
Fig. 9 Serious destruction of brick wood building

砖木结构房屋的主要震害表现为房顶和房脊瓦片滑落、落瓦严重 (图10), 墙体破坏严重甚至局部垮塌, 出屋面房间破坏严重, 木屋架整体或者部分垮塌。有的泥土砌筑隔墙比砖砌隔墙的震害更严重, 因此, 隔墙的施工质量和建筑材料等对砖木结构整体抗震性能的影响较大, 在结构设计中应当予

以充分考虑。部分砖木结构房屋采用砌体填充墙, 由于承重构件之间相互没有可靠联接和咬合, 纵横墙开裂严重, 局部有砖块倒塌、脱落等, 木屋架也出现歪斜和损毁等严重破坏。因此, 木屋架各构件应采用圆钉、扒钉或者铁丝等相互连接 (镇 (乡) 村建筑抗震技术规程, 2008)。



图10 房顶瓦片掀翻
Fig. 10 Tiles of roof tilting

1.3 框架结构房屋建筑震害

底框或者局部底框 (上部砖混结构或者砖木结构) 的混合结构房屋在芦山地震中破坏比较常见。部分房屋建筑由于附属结构和主体结构碰撞而导致破坏严重、错位甚至垮塌, 特别是在刚度突变、形状突变、建筑材料突变或者窗户尺寸过大、窗户位置设置不妥等情况下。

混凝土框剪结构中框架与剪力墙的力学行为差异及其分布的多样性, 使得它们在共同抵御强震作用时存在复杂耦合效应 (吴波等, 2011; Bozdogan, 2009; Lu, 2002; Shieh-Beygi, Pietruszczak, 2008)。部分二、三层底框或者局部底框 (上部砖混结构或者砖木结构) 的混合结构房屋, 其内纵墙出现交叉裂缝、承重横墙出现斜裂缝, 导致墙体破坏严重, 部分处于全部或者局部倒塌的边缘, 木屋架普遍毁坏。这类混合结构房屋大多为经营门面房, 在承重构造上采用砖砌柱体 (金波等, 2013)。一方面, 有的砖砌柱体没有地圈梁连接而浮放在基础上, 在地震竖向作用下使得砖砌柱体被整体全部拔起, 这是导致混合结构毁坏的重要原因。另一方面, 砖柱之间缺乏横梁的相互连接, 砖砌柱体和木结构或者砖砌结构的结合部位也不牢固, 在地震水平作用下使得砖柱拦腰截断和位错 (约3 cm) 等, 最终导致混合结构房

屋整体倒塌。然而,钢筋混凝土柱体没有出现拔起、截断和位错的现象。

玉溪花园小区新建的多层框架结构房屋底部的填充墙局部开裂破坏、局部空心砖劈裂,下部两层墙体的粉刷水泥灰出现小面积脱落、装修瓷砖局部脱落(图 11),但是,主体结构无倾斜、柱脚无压溃、梁和柱的肉眼可见裂缝和变形不明显、门窗洞口处填充墙未错位等,属于轻微破坏。同时,有少数楼房局部出现地基不均匀沉降、梯段板的施工缝处发生剪切错动(钢筋无明显屈服)导致抹灰掉落等轻微破坏。从下往上,随着层数的升高,震害逐渐减轻,到达顶层时基本完好。总体而言,框架结构房屋建筑的震害较轻。



图 11 框架结构房屋轻微破坏

Fig. 11 Slight damage of frame structure building

在玉溪花园小区东侧的水泥道路路面出现起伏变形,变形长度约 20 m,在分界线的北侧,伸缩缝的东侧相对西侧要低,而在分界线的南侧,伸缩缝的东侧相对西侧要高,最高处与最低处的最大高差约 10 m(图 12)。



图 12 水泥道路出现起伏变形

Fig. 12 Rise and fall deformation of the cement road

1.4 砖石结构房屋建筑震害

芦山老县城存在个别砖石结构房屋建筑,有部分砖石结构房屋的基础是浮放在地基上的,在地震作用下由于基础的光滑完整,鹅卵石相互之间缺乏粘结力,在砌筑时仅用石灰浆垒砌,抗震性能很差,导致个别鹅卵石脱落和基础破坏(图 13),有的甚至导致承重墙体局部倒塌或者严重破坏,而橱柜、电视柜、书柜等室内物品翻倒,有的出现窗户和纱窗掉落的现象。



图 13 砖石结构基础破坏

Fig. 13 Damage of foundation of brick stone building

1923 年日本关东大地震、1948 年原苏联阿什哈巴德地震和 1976 年中国唐山地震等国内外的震害研究表明,砖石结构房屋表现出较强的脆性,其严重破坏和倒塌的比率高达 75% 以上。由于砌体材料、粘结材料和施工工艺等因素,使得砖石结构房屋对地震破坏作用非常敏感(袁建力, 2013),造成门窗洞口等薄弱部位发生扭转、变形和位错等,其基本上处于毁坏状态,建议将其全部拆除重建。

2 破坏成因机理分析

2.1 近场大震强地震动作用

在中国地震局(2013)发布的《四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震烈度图》中,芦山县老城区地震烈度为Ⅷ~Ⅸ度。芦山飞仙强震台是距离芦山老县城最近的强震台(大约 10 km),获取的主震三分量加速度记录(未校正)如表 1 所示,加速度峰值分别为 -387.410、-356.989 和 267.381 gal,芦山老县城的抗震设防烈度为Ⅷ度,其设计基本地震加速度为 0.15 g。由此可见,芦山

地震对芦山老县城的地震动作用远高于房屋建筑 50 年设计基准期内预计可能遭遇到的地震动作用。因此，在强地震动作用下，芦山县老城区相当于正规设计的房屋建筑遭到了严重破坏，超过其抗震设防烈度。

表 1 芦山飞仙强震台记录
Tab. 1 Recording at the Feixian strong motion station

测量方向	加速度值/gal	峰值加速度时间/s	持续时间/s
EW（东西）	-387.410	12.74	40
NS（南北）	-356.989	13.10	40
UD（垂直）	267.381	4.9	40

2.2 局部场地效应

由于场地条件不利或者地基、基础处理不当，地震时容易出现地裂缝和震陷，加剧地基的不均匀沉降，导致房屋发生严重破坏或者倒塌，大多数房屋建筑没有进行岩土工程勘察。在地震中房屋建筑地基的不均匀变形是导致房屋结构破坏较重的主要原因，修建在山坡上、孤山上等的房屋建筑，工程场地地形对地震动的放大效应影响是重要因素。

居民自建房屋的场址应避开潜在的地震滑坡、崩塌、塌陷地带等不利地段，并根据灾害可能的影响范围确定避让距离（建筑抗震设防设计规范，2010）。当条件不允许避开不利地段时，应采取可靠措施，使房屋建筑在地震时不致由于地基基础失稳而破坏，或者产生过量下沉或倾斜。

砖混结构和砖木结构房屋建筑由于缺乏圈梁和构造柱（采用砖砌的构造柱或者构造柱位置设置不合理）、墙体单薄、窗户开洞较大、施工质量差、地基处理不当等，导致房屋破坏严重、基础不均匀沉降、丧失承载能力等。造成房屋建筑破坏的主要原因除结构本身不合理外，局部场地效应是比较重要的客观因素。通常情况下，基岩埋深较浅的场地，其上覆土层较薄，对低矮的、刚性较大的二、三层房屋结构破坏较大，因此，地震灾害相对较重。

2.3 行波效应

研究表明，造成墙体不在一个平面的原因在于地震动以波的形式向四周传播，在传播过程中，不仅有时间上的变化特性，而且存在着明显的空间变化特性，不同地震波到达时间的差异由所产生的行波效应所导致。红军广场旁边的砖混结构

房屋墙体震后不在同一平面（图 1）、玉溪花园小区水泥道路出现起伏变形（图 12）的原因主要是行波效应。

因此，对于少部分桥梁、博物馆、影剧院、会展中心等重要的建设工程，虽然其跨度较小，但考虑到建设工程的重要性、遭遇地震破坏后的严重性，在抗震设计时需要研究地震动的行波效应。

2.4 施工质量差

砖混结构的墙体强度较低，建筑材料用量较多，结构的自重较大，因此，地震破坏作用也较强。改善砌体材料的力学特性、粘结材料的强度，保证圈梁和构造柱等构造措施，墙体厚度、纵横墙交接处、门窗洞口过梁等符合相关规范要求，这样才能保证房屋建筑有较好的施工质量（王翠坤，杨沈，2008；李志强等，2013；贺秋梅等，2007；洪海春等，2011，2012）。

砖木结构房屋采用粘土砖或者单匹砖作为填充墙的施工工艺应当摒弃（李志强等，2013；贺秋梅等，2007），在必须要使用的情况下，可以采用篱笆墙，同时，加密横梁和立柱，改善其抗震性能。此外，砖木结构房屋填充墙体的厚度为 12 cm，不符合相关规范的要求。

砖石结构房屋由于建筑材料的尺寸规格不同，难以保证砌筑规整以及粘结材料的强度和牢固性。此外，砖石结构房屋缺乏拉结构件，耗散变形能力较低，因此，容易发生受拉、受剪破坏等，其施工质量更应该严格控制。

3 讨论

3.1 房屋抗震性能及其安全鉴定

在芦山县老城区，大部分汶川地震后新建或者经过加固的房屋建筑在此次芦山地震中总体表现较良好（李志强等，2013），但是仍有不同程度的破坏，如何评估房屋结构的地震作用破坏和损伤（陈再现等，2011），选择合理的维修和加固手段，并对维修和加固后的房屋结构进行安全鉴定，正确解答维修和加固后的房屋结构在地震作用下的抗震性能，是值得深入研究的问题。

3.2 抗震构造措施的改进

砖砌体结构房屋典型的震害现象是纵横墙开裂、歪斜、外闪，全部或者局部倒塌，楼梯间突

出屋面部分严重毁坏。缺少构造柱的约束机制是纵横墙破坏的主要原因,而“鞭梢效应”和应力集中是楼梯间突出屋面部分毁坏的主要原因。因此,应尽力使得砖砌体结构房屋在平面和立面保持布置整齐,房屋尽量按照“平面简单、规则、对称均匀”的原则来设计,使刚度中心与质量中心重合,避免不对称造成结构扭转破坏、应力集中等。同时,保证抗震构造措施到位,采用合理的构造措施,正规设计和施工。

框架结构房屋具有较好的抗震性能(韦锋等,2009),特别是强柱弱梁机制、隔震减震方法等抗震措施能做好时,可以作为中小城市和镇(乡)村等主要以居民自建房屋为主地区的发展趋势,但其工程的造价比有圈梁和构造柱的砖混结构可能要高10%左右(王翠坤等,2009),建议在有条件的情况下推广使用框架结构。

4 结语

(1) 由于砌体结构的建筑材料具有明显的脆性性质,因此,其抗拉、抗弯、抗剪强度均较低。震害经验表明,相对于钢筋混凝土结构(包括框架结构)和钢结构房屋而言,砌体结构房屋的抗震能力较差。由于建造年代、地理位置和施工质量等不同,芦山县老县城大多数单层和多层砌体结构房屋建筑震害特征呈现出较大的差异性,主要表现为砌体结构房屋全部或者部分倒塌、墙体错动、贯通开裂以及房顶瓦片滑落等。砌体结构房屋遭到破坏的主要因素包括:缺少圈梁和构造柱、施工质量较差、荷载分布不当、砂浆强度不够、选址不规范等。因此,应做到抗震措施到位,包括地基基础处理到位、建材和施工质量到位、圈梁和构造柱连接到位、屋盖荷载减负到位。

(2) 框架结构房屋的震害主要涉及到构造柱和填充墙体等,总体而言,砖砌柱体的破坏比较严重,而钢筋混凝土柱体的破坏较轻,填充墙体出现开裂、倒塌等。采用填充墙开缝等合理的构造措施,基底隔震和耗能减震等方法,可以改善和提高框架结构的抗震性能。

(3) 对于中小城市和镇(乡)村等主要以居民自建房屋为主的地区,随着经济建设的快速发展,其房屋建筑的抗震性能应逐步改善和提高,包括抗震设防的研究程度应该加强、进行正规抗

震设计房屋建筑的比例需要增加、抗震设防水准有待于提高。

参考文献:

- 蔡勇. 2011. 砌体在剪—压复合作用下抗震抗剪强度分析[J]. 建筑结构, 41(2): 74–77.
- 陈再现, 王凤来, 杨同盖, 等. 2011. 底框砌体剪力墙震损房屋抗震加固拟动力子结构试验[J]. 土木建筑与环境工程, 33(6): 1–6.
- 贺秋梅, 李方杰, 吕红山, 等. 2007. 宁洱 6.4 级地震房屋建筑震害调查与分析[J]. 震灾防御技术, 2(3): 279–284.
- 洪海春, 侯康明, 谭慧明, 等. 2011. 安徽安庆 $M_s 4.8$ 地震现场调查启示与震害特征分析[J]. 震灾防御技术, 6(2): 471–477.
- 洪海春, 彭小波, 毕雪梅, 等. 2012. 重大建设工程基本自振周期估算方法探讨[J]. 震灾防御技术, 7(3): 227–237.
- 金波, 高永武, 陈洪富, 等. 2013. 芦山“4·20”地震单层砖柱工业厂房的震害分析与研究[J]. 自然灾害学报, 22(3): 1–8.
- 李碧雄, 谢和平, 邓建辉, 等. 2009. 汶川地震中房屋建筑震害特征及抗震设计思考[J]. 防灾减灾工程学报, 29(2): 224–230.
- 李宏男, 肖诗云, 霍林生. 2008. 汶川地震震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 29(4): 10–19.
- 李志强, 侯建盛, 李洋, 等. 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 $M_s 7.0$ 地震灾害特点分析[J]. 地震地质, 35(2): 398–410.
- 吕伟荣, 施楚贤, 刘锡军, 等. 2012. 混凝土空心砌块砌体抗震抗剪强度[J]. 土木建筑与环境工程, 34(5): 1–5.
- 谭皓, 李杰, 张电吉, 等. 2011. 玉树大地震砌体结构房屋震害特征[J]. 工程抗震与加固改造, 33(5): 133–139.
- 王威, 薛建阳, 罗大明, 等. 2011. 建筑楼梯在 2008 年汶川大地震中的震害分析[J]. 地震工程与工程振动, 31(5): 157–166.
- 王翠坤, 杨沈. 2008. 汶川地震对建筑结构设计启示[J]. 震灾防御技术, 3(3): 230–236.
- 韦锋, 陈文科, 傅剑平, 等. 2009. 8 度区框—剪结构中框架在罕遇地震下的反应性态[J]. 土木建筑与环境工程, 31(6): 60–65.
- 吴波, 黄仕香, 赵新宇. 2011. 混凝土空间框剪结构的抗震试验与分析[J]. 土木建筑与环境工程, 33(6): 44–50.
- 伍圣喜, 吴从晓, 韩家军, 等. 2007. 云南宁洱 6.4 级地震砖混结构房屋震害调查与分析[J]. 震灾防御技术, 2(3): 285–289.
- 袁建力. 2013. 砖石古塔震害程度与地震烈度的对应关系研究[J]. 地震工程与工程振动, 33(2): 163–167.
- 中国地震局. 2013. 中国地震局发布四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震震度图[EB/OL]. [2013–11–27]. <http://www.ccea.gov.cn/publish/dizhenj/464/478/20130425153642550719811/index.html>.
- 周云, 邹征敏, 张超, 等. 2009. 汶川地震砌体结构的震害与改进砌体结构抗震性能的途径和方法[J]. 防灾减灾工程学报, 29(1): 109–113.
- Bozdogan K. B. 2009. An Approximate Method for Static and Dynamic analyses of Symmetric Wall-frame Buildings[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 18(3): 279–290.
- Lu Y. 2002. Seismic Behavior of Multistory RC Wall-frame Wystem Versus bare Ductile Frame System[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31: 79–97.

- Panagiotakos T. B. , Fadis M. N. . 2001. Deformations of Reinforced Concrete Members at Yielding and Ultimate[J]. ACI Structural Journal, 98(2) :135 – 148.
- Pantazopoulou S. J. , French C. W. . 2001. Slab Participation in Practical Earthquake Design of Reinforced Concrete Frame[J]. ACI Structural Journal, 98(4) :479 – 489.
- Shieh-Beygi B. , Pietruszczak S. . 2008. Numerical Analysis of Structural Masonry: Mesoscale Approach[J]. Computers and Structures, 86(21 – 22) :1958 – 1973.
- GB 50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB50003—2001, 砌体结构设计规范[S].
- JGJ161—2008, 镇(乡)村建筑抗震技术规程[S].

Research on Damage Characteristic of Buildings and its Formation Mechanism in the Lushan Old City Induced by Lushan $M_s7.0$ Earthquake

HONG Hai-chun, YANG Wei-lin, HUANG Wei-sheng, PENG Xiao-bo, LI Xi-bing
(Earthquake Administration of Jiangsu Province, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

Abstract

Based on the field investigation data, we research the damage characteristic of buildings and its formation mechanism in the Lushan old city induced by Lushan $M_s7.0$ earthquake. It is found that the typical damage characteristic of the building with brick concrete, brick wood and masonry structure mainly includes the whole or local collapse of the building, drifting and displacing of the walls, penetration cracking the walls, and roof tiles sliding. On the other hand, the typical damage characteristic of the building with frame structure is deformation and fracture of constructional column and walls cracking. The main interior factors of buildings damages are lack of ring beam and constructional column, improper load distribution, and non-standard construction site etc. . The formation mechanism of the destroyed buildings is summarized as follow: the strong motion action of large earthquake in near-field, the local site effect, the traveling wave effect and poor construction qualities of the buildings etc. . The reinforcement methods reaching to seismic fortification design and measures of improving anti-seismic capacity of four structures building are also discussed, which could offer reference to the earthquake fortification of the building and the reduction of damage loss.

Key words: Lushan $M_s7.0$ earthquake; damage characteristic and factor; local site effect; traveling wave effect