四川芦山 7.0 级地震砌体结构的震害特征

曲哲，钟江荣，孙景江
（中国地震局工程力学研究所，河北三河，065201）

摘要：四川芦山 7.0 级强烈地震影响区域内有大量的砌体结构房屋，既有未采取任何抗震构造措施的非约束砌体结构，也有设置了圈梁和构造柱的约束砌体结构。本文首先简要讨论了本次地震强震动特性，表明其高频成分丰富，反应谱中低频部分衰减较快，是刚性结构和柔性结构地震破坏表现差别较大的原因之一；继而论文重点以现场震害调查资料为基础，总结了不同烈度区、不同类型砌体结构的震害特征；高烈度区不同类型砌体结构的震害程度和破坏比对比表明，约束砌体结构的抗震性能明显优于非约束砌体结构。
关键字：芦山地震，非约束砌体结构，约束砌体结构，破坏比
中图分类号：TU362

Seismic damages of masonry structures in the M7.0 Lushan earthquake

QU Zhe , ZHONG Jiangrong, SUN Jingjiang
(Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Sanhe 065201, China)

Abstract: Masonry structure, either unconfined or confined, is one of the major structural systems in the area affected by the M7.0 Lushan earthquake in 2013. The characteristics of strong ground motions obtained during the earthquake are briefly discussed to show that the ground motions are rich in short-period contents, which may lead to heavy damage to stiff structures like masonry houses. Based on the materials collected during the emergency building inspection immediately after the earthquake, damage patterns of various types of masonry structures within areas of different intensities during the earthquakes are summarized. Comparisons of damage rates of unconfined and confined masonry structures show that the latter exhibit much better seismic performance than the former.
Keywords: Lushan earthquake, unconfined masonry structure, confined masonry structure, damage rate

1 概述

2013 年四川芦山 7.0 级地震波及川南地区多个县市，造成大量人员伤亡和经济损失。地震发生后中国地震局立即启动地震一级应急响应，工程力学研究所派出应急队于地震当日抵达地震灾区，并于翌日展开地震宏观烈度评估和震区建筑物震害调查工作。本文作者所在的调查小组在从 4 月 21 日至 4 月 27 日的七日间先后对包括县、镇、乡、村等在内的 30 余个调查点的建筑震害进行了调查。调查点分布于宏观烈度 VI - IX 度区，如图 1 所示（本文中烈度区划分均以中国地震局 4 月 25 日发布的《四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震烈度图》为准[1]）。

在调查区域附近分布有芦山飞仙、名山科技、邛崃油榨和蒲江大兴等 4 个强震台站（图

收稿日期：2013-05-20；修订日期：2013-06-01
项目资助：“十二五”国家科技支撑计划项目（2012BAK15B05-04），地震现场应急灾情获取与判定技术。
作者简介：曲哲，1983 年出生，男，副研究员，博士，主要从事建筑结构抗震与减隔震技术研究。
E-mail: quz@iem.ac.cn

1）[2]。其中名山科技站记录的东西方向分量的峰值加速度高达 400.7 cm/s^2。采用 Butterworth 函数对加速度时程记录进行带宽滤波处理（带宽 0.02s – 10s）并进行线性基线校正后积分，可得到相应的速度时程。如此得到的名山科技站东西方向分量的峰值速度仅约为 11.2 cm/s。距离发震断层较近的芦山飞仙器和邛崃油榨两个台站的水平强震动记录也有类似的特征。图 2 将上述四个台站的东西方向水平地震动记录的拟加速度反应谱与我国抗震规范[3]给出的 7 度设防第三组 II 类场地上的设计地震和罕遇地震反应谱。在周期小于 0.5s 的短周期范围内，距离发震断层较近的名山科技、芦山飞仙和邛崃油榨两个台站记录的反应谱值显著大于罕遇地震反应谱，而在中长周期范围内这些台站记录的反应谱值则基本相当于设计地震反应谱。与之相比，距离断层稍远的蒲江大兴站记录的高频成分有比较显著的衰减，而中长周期成分则与其他三个台站记录相似。由此可见，芦山地震高烈度区地震动具有高频成分丰富、中长周期成分衰减快的特征，可能对砌体结构等刚度较大的短周期结构有比较明显的影响，而对多、高层结构和其他中长周期结构影响较小。

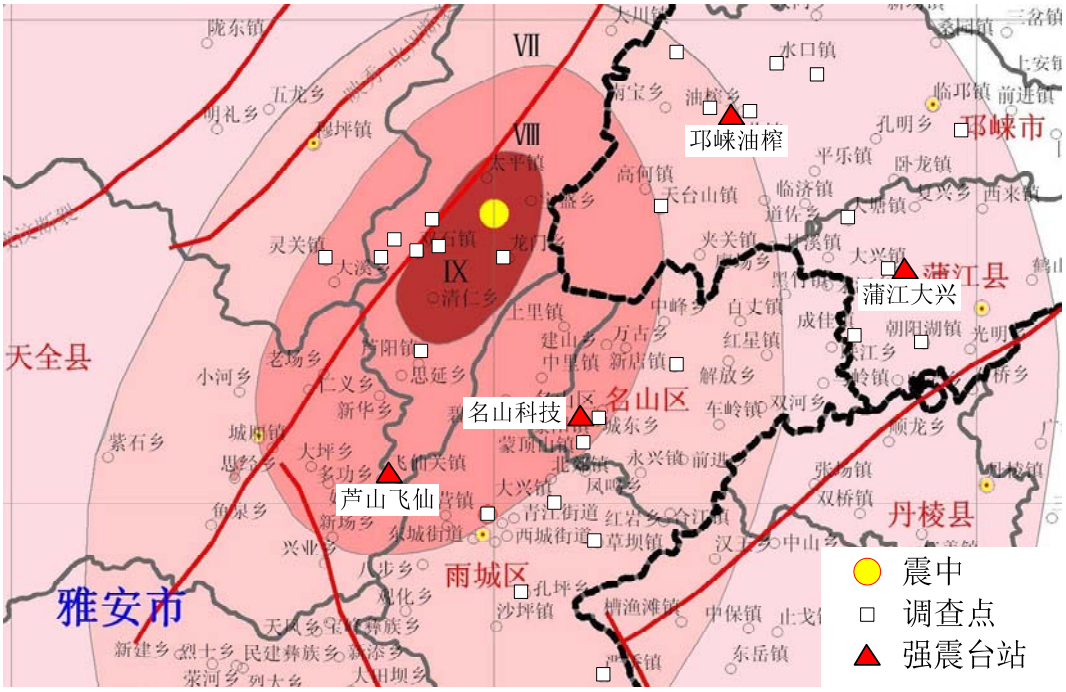

图 1 调查点分布与强震台站

Fig. 1 Investigation spots and locations of seismographs

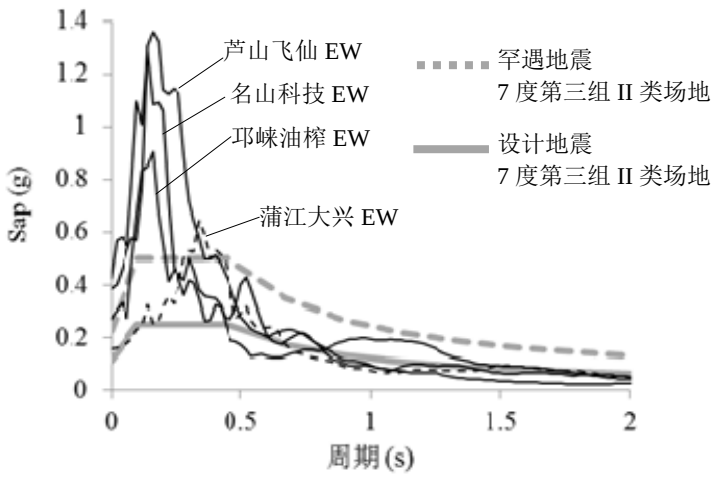

图 2 芦山地震强地震动记录的拟加速度反应谱（5%阻尼比）

Fig. 2 Pseudo acceleration spectra of strong ground motions in Lushan earthquake (5% damping)

调查区域内大量存在的砌体房屋可分为（1）采用木楼屋盖的非约束砌体结构、（2）采用混凝土楼屋盖的非约束砌体结构和（3）约束砌体结构等三类。本文总结上述三类砌体结构在本次地震中的典型震害，重点突出不同烈度区相同类型砌体结构的震害特征和相同地点不同类型砌体结构的震害特征等两方面对比。

2 采用木楼屋盖的非约束砌体结构

这类砌体结构即通常所说的“砖木结构”，其震害可分为木屋盖和砌体墙两部分的震害。其中砌体墙的震害特征与采用混凝土楼屋盖的非约束砌体结构类似，下文详述。本节重点介绍木屋盖的震害。

木屋盖主要有硬山搁檩和独立木屋架两种形式。在 VI 度区，这类结构房屋的主要震害为屋脊台水倒坏、屋面溜瓦、落瓦等（图 3）。例如在 VI 度区的蒲江县大塘村，超过 30%的此类民居有溜瓦、落瓦现象。同属 VI 度区的邛崃县油榨乡，90%的此类民居都出现了不同程度溜瓦、落瓦现象。这类损伤虽然对建筑功能（如遮阳、防雨等）有一定影响，瓦片坠落也可能造成一定的人员受伤，但对整体结构的安全没有影响，可定义为非结构构件损伤。此外，这类损伤易于修复。地震翌日在 VI 度区还可以观察到大量此类震害现象。4 天后在 VI 度区即难以再观察到此类现象，基本已由村民自行修复。

在 VII 度、VIII 度等中高烈度区，伴随着砌体结构本身开始出现不同程度的结构损伤，木屋盖屋面落瓦现象加重，木屋盖本身也开始出现不同程度的损伤，如图 4 所示。

图 4(b)所示的木屋架本身的倒塌并不多见，然而在 IX 度区，下部砌体墙破坏导致木屋盖发生局部倒塌的现象较为常见。对于硬山搁檩木屋盖，硬山山墙顶部往往由 120 mm 厚砖墙（单砖墙）砌筑而成，在地震中易于发生平面外破坏并导致上部木屋盖因失去支撑而倒塌（如图 5(a)）；对于独立木屋架，当地习惯作法是在砌体纵墙上砌筑约 0.5 米至 1 米高的砖垛（120mm 或 240mm 厚）以支撑木屋架，以便于木屋架空间的自然通风。这类木屋架常见的倒塌往往是由于砖垛平面外破坏引起的（如图 5(b)）。

(a) 大兴镇某硬山搁檩木屋盖台水倒坏

(b) 大塘镇某木屋架屋面落瓦

图 3 蒲江县 VI 度区木屋盖非约束砌体房屋的屋面损伤

Fig. 3 Roof damages of unconfined masonry houses with timber roof in Pujiang (Intensity VI)

(a) 名山县城东乡某硬山搁檩木屋盖落瓦

(b) 灵关镇河口村某木屋架垮塌

图 4 VIII 度区木屋盖非约束砌体房屋的屋盖损伤

Fig. 4 Roof damages of unconfined masonry houses in area of Intensity VIII

(a) 芦山县双石镇某硬山搁檩木屋盖倒塌

(b) 芦山县双石镇某独立木屋架垮塌

图 5 IX 度区木屋盖非约束砌体房屋的屋盖破坏

Fig. 5 Roof damages of unconfined masonry houses in area of Intensity XI

木屋盖非约束砌体房屋的砌体墙也表现出一些不同于混凝土屋盖砌体结构的震害特征。如对于采用独立木屋架的民居，顶层砌体墙由于缺乏平面外拉结，易于出现如图 6 所示的局部破坏。由于对整体结构安全没有过多影响，这类损伤也可归为非结构构件破坏。但落砖砸人也可能造成一定的人员伤亡，砌体墙在这些部分的局部防倒塌措施值得认真考虑。

图 6 芦山县双石镇独立木屋架砌体房屋的顶层砌体墙破坏（IX 度区）

Fig. 6 Damaged masonry walls of masonry house with timber roof frame in Shuangshi, Lushan (Intensity IX)

3 采用混凝土楼屋盖的非约束砌体结构

无论是采用混凝土预制板楼盖还是现浇钢筋混凝土楼屋盖，楼屋盖本身均不易受损，其

损伤或破坏往往是由下部砌体墙破坏而间接导致的。砌体结构中，位于结构短边方向的横墙通常较厚且开洞少或不开洞，而位于结构长边方向的纵墙则由于经常被视为非承重墙，往往较横墙薄，且大量开设门窗洞口。当地震沿房屋纵横两个方向强度相近时，房屋纵墙往往较易受损。在 VI 度、VII 度等中低烈度区，经常可以观察到纵墙轻微或中等开裂的现象。这些纵墙裂缝经常从门窗洞口角部向墙体内部延伸，甚至可能形成贯通墙肢的斜裂缝。但这些裂缝的宽度（墙面量测，包括面层抹灰等）一般在 3 mm 以下，墙体本身的裂缝宽度可能更小（如图 7）。在某些位于 VI 度区的此类砌体结构中的个别纵墙也发现开裂比较严重的情况，但并不构成对整体结构安全的严重威胁（如图 8）。

图 7 大兴镇穆家村某 3 层混凝土楼屋盖非约束砌体房屋的纵墙开裂（VII 度区）
Fig. 7 Cracking of longitudinal wall of 3-story unconfined masonry house with RC floor/roof slabs in Mujia, Daxin (Intensity VII)

图 8 草坝镇政府 3 层混凝土楼屋盖非约束砌体房屋个别纵墙严重开裂（VII 度区）
Fig. 8 Cracking of longitudinal wall of 3-story government office building of unconfined masonry structure with RC floor/roof slabs in Caoba (Intensity VII)

在 VIII 度区和 IX 度区等高烈度区，除纵墙开裂严重外，非约束砌体结构的横墙也会出现比较严重的开裂，甚至可能引发结构的局部倒塌。芦山县双石镇某 2 层这类结构形式的民居的破坏情况具有典型性。该结构纵向三开间，横向两进深。沿街一榀结构中的三个开间中两个开间仅以砖柱支撑，而没有纵墙；其余两榀结构中纵墙较多。该结构首层残余位移角高达约 1/20，纵墙、横墙均已严重开裂且有局部倒塌（图 9）。

图 9 芦山县双石镇某 2 层混凝土楼屋盖非约束砌体房屋砌体墙破坏（IX 度区）
Fig. 9 Damages of masonry walls in 2-story unconfined masonry house with RC floor/roof slabs in Shuangshi, Lushan (Intensity IX)

值得注意的是，图 9 所示的民居虽然角部砌体墙倒塌，但由于采用钢筋混凝土现浇楼盖，该角部砌体墙支撑的二层楼面并未垮塌。与之相比，采用混凝土预制板楼盖的无构造柱砌体结构中砌体墙倒塌将直接导致上部楼盖的垮塌。芦阳镇某此类结构 3 层民居的局部倒塌是这方面的典型案例。按当地的常见做法，该民居将地下一层作为猪圈。地震中地下一层砌体结构猪圈的倒塌直接导致了首层预制板楼盖的坠落（图 10）。据户主介绍，这不但砸死了猪圈中的猪只，还造成首层住户一死一伤。

图 10 芦山县某 3 层民居地下一层倒塌造成首层预制板楼盖坠落（VIII 度区）
Fig. 10 Falling of precast floor slab because of collapse of lower story of 3-story house in Lushan (Intensity VIII)

与混凝土预制板楼盖相比，现浇钢筋混凝土楼盖使结构具有较好的整体性，在底部支撑的砌体墙局部倒塌时可以不至于坠落，圈梁对于砌体墙也有一定的整体约束作用。这是现浇现筋混凝土楼盖的优势。2008 年汶川地震后预制板楼盖广受诟病，这客观上促使四川地区出现了更多采用现浇钢筋混凝土楼盖的砌体结构民居。但令人遗憾的是，调查人员在走访村民的过程中发现，对于保证砌体结构抗震性能最为重要的构造柱却被放到了相对次要的地

位。很多村民虽然知道构造柱的重要性，但在经济条件有限的情况下宁愿在现浇楼盖中使用大量钢筋，而不设置任何构造柱。如图 11 所示的位于 VIII 度区的灵关镇大渔村某单层在建砌体结构，据房主介绍，在现浇楼盖中放置了大量钢筋，却没有设置任何构造柱。地震中纵、横墙均出现严重开裂。好在地震发生时尚未拆除临时支撑，结构未出现倒塌。

图 11 灵关镇大渔村某在建砌体结构严重破坏（VIII 度区）
Fig. 11 Damages of masonry structure under construction in Dayu, Linguan (VIII Intensity)

此外，非约束砌体结构（木楼屋盖或混凝土楼屋盖）的抗震能力主要取决于砌体墙厚度、总截面积以及砌筑质量。而这些指标又不受结构设计或施工监管的约束，仅取决于户主自身的认识与经济条件。与图 11 所示的在建砌体结构仅一街之隔的另一栋 2 层此类砌体房屋的地震损伤非常轻微，仅观察到某些墙体表面的瓷砖坠落。比较明显的是，不同村镇的经济发展水平不同，砌体墙的厚度也明显不同，在有些地区常见 240mm 厚砖墙，甚至可以见到少量 360mm 厚砖墙，但在其他一些地区则往往采用 180mm 或 120mm 厚砖墙。这些地区常见的横墙做法是结构全高采用 180mm 厚砖墙或仅在首层采用 180mm 厚砖墙而在二层采用 120 厚砖墙。这类结构抗震能力明显要比采用 240mm 砖墙的结构差。在宝兴县灵关镇大渔村、名山县新店镇太坪村都看到了这种结构的毁坏（如图 12 所示）。经济条件对砂浆质量的影响也非常明显。有些地区采用泥、石灰作为砌筑粘结材料，经济条件较好的地区则常见正规的砌筑砂浆。这些因素造成不同地区砌体结构的抗震性能差异较大。

(c) 120mm 厚砖墙砌体结构倒塌破坏

(d) 240mm 厚砖墙砌体结构轻微破坏

图 12 名山县新店镇太坪村两栋 2 层非约束砌体结构震害（VII 度区）
Fig. 12 Comparison of damages of two 2-story unconfined masonry houses in Taiping, Xindian, Mingshan (Intensity VII)

4 约束砌体结构

总的来说，即使大多未经正规的抗震设计，采用圈梁和构造柱等抗震措施的约束砌体结构的震害明显轻于上述两类非约束砌体结构。在调查过程中发现多个约束砌体结构与非约束砌体结构震害形成鲜明对比的案例。

天台山镇主街以 3 层砌体结构为主，共约 200 户（图 13(a)）。由于紧临旅游风景区，街面进行了统一装修。但沿街建筑既包括 1978 年修建的一批无构造柱的砌体结构，也包括 1994 年统一兴建的有构造柱的砌体结构。以其中两栋相临的砌体结构为例。其中一栋建于 1978 年，为无约束砌体结构，纵墙严重开裂，近于毁坏（图 13(b)）；相临的一栋民居建于 1994 年，采用了构造柱等抗震约束措施，仅有少数纵墙开裂，且开裂程度明显轻于前者（图 13(c)）。

(a) 天台山镇调查点全景　(b) 无约束砌体结构纵墙破坏　(c) 约束砌体结构纵墙开裂

图 13 天台山镇新旧两幢紧临的砌体结构的震害对比（VII 度区）

Fig. 13 Comparison of damages of two adjacent masonry buildings in Tiantai (Intensity VII)

再以图 14 所示的两栋同属于双石镇石凤村的砌体结构房屋为例。二者建筑规模大致相当，地理位置非常接近，仅相距 2 公里。其中一栋建造年代较早，没有采取抗震构造措施。在本次地震中该结构严重破坏，局部发生垮塌（图 14(a)）。而另一栋设置了构造柱的砌体结构则基本完好，仅在窗洞口角部发现少量细微裂缝（图 14(b)）。据了解，后者建筑面积约 500 平方米，却设置了 14 根构造柱。由此可见，即使位于 IX 度区，设置足够构造柱的约束砌体结构仍可以保持基本完好。

(a) 非约束砌体结构毁坏　(b) 约束砌体结构基本完好

图 14 双石镇石凤村两幢砌体结构的震害对比（IX 度区）

Fig. 14 Comparison of damages of two masonry structures in Shifeng, Shuangshi (Intensity IX)

位于 IX 度区芦山县双石镇双石中学的一栋 2008 年汶川地震之前建造的 4 层约束砌体结构教学楼也是一个典型的成功案例。本次地震中镇上其他民居结构损毁严重，而该教学楼则基本完好，纵、横墙上均未发现肉眼可见的裂缝，仅在少数窗洞口角部发现少量瓷砖剥落（图 15）。

(a) 约束砌体结构教学楼全貌

(b) 局部瓷砖剥落

图 15 双石镇双石中学约束砌体结构教学楼基本完好（IX 度区）

Fig. 15 Undamaged school building of confined masonry structure in Shuangshi middle school, Shuangshi (Intensity IX)

5 突出屋面部分的震害

采用钢筋混凝土屋盖的砌体结构的另一种具有普遍性的震害形式是顶层突出屋面阁楼的破坏。这些阁楼多为楼梯间突出屋面部分，为单跨无约束砌体结构，且往往仅以单砖砌筑（即 120mm 厚砖墙）。不良的结构形式加之突出屋面部分因刚度突变引起的鞭稍效应的影响，这些阁楼的震害明显较结构其他部分更为严重。在不同烈度区均可观察到这类阁楼结构的破坏。下面在众多案例中挑选不同烈度区的两个典型案例加以说明。

图 16 所示的二层（局部三层）砌体结构民居位于雨城区草坝镇（VI 度区），是当地震损相对较重的一栋民居。即使如此，其首层和二层主体结构的主要损伤为少数纵墙中等程度开裂，但是突出屋面的阁楼却已毁坏（图 16(b)）。

(a) 全貌

(b) 顶部阁楼靠屋面一侧墙体裂缝

图 16 雨城区草坝镇某二层（局部三层）砌体结构阁楼破坏（VII 度区）

Fig. 16 Damages of penthouse of 2-story masonry house in Caoba, Yucheng (Intensity VII)

另一个例子是位于 VIII 度区的芦山县双石镇西川村一栋二层（局部三层）砌体结构的阁楼破坏。即使位于 VIII 度区，由于设置了较多构造柱，该结构首层和二层主体结构损伤

轻微，但突出屋面的阁楼部分已经毁坏（图 17）。

(a) 全貌　　(b) 阁楼靠屋面一侧墙体裂缝

图 17 双石镇西川村某二层（局部三层）砌体结构阁楼破坏（VIII 度区）

Fig. 17 Damages of penthouse of 2-story masonry house in Xichuan, Shuangshi (Intensity VIII)

6 不同类型砌体结构的破坏比

选取位于 VIII 度和 IX 度区的双石镇镇中心、双石镇西川村和灵关镇大渔村等三个相距很近的地点为对象进行详细的抽样调查，抽样率约为 10%。在三个地点所调查的全部 82 栋房屋中，有 45 栋为上述三种类型的砌体结构，包括 15 栋采用木楼屋盖的无约束砌体结构、22 采用混凝土楼屋盖的无约束砌体结构和 8 栋约束砌体结构。各类结构破坏等级的统计结果如图 18 所示。破坏等级的确定参照我国现行的《建（构）筑物地震破坏等级划分规范》中关于砌体房屋的相关规定[4]。

采用不同楼屋盖形式的非约束砌体结构的震害程度基本相当。对于采用木楼屋盖和采用混凝土楼屋盖的非约束砌体结构，发生严重破坏或毁坏的比例分别为 67%和 64%，而约束砌体结构则没有发生严重破坏或毁坏的情况。相反，8 栋调查的约束砌体结构中有 6 栋都保持基本完好。

砖木结构（即采用木楼屋盖的非约束砌体结构）在《中国地震烈度表 GB/T 17742-2008》中归为 A 类结构，一般认为其抗震性能较差[5]。采用混凝土楼屋盖的砌体结构有些设置了圈梁，但均未设置构造柱。虽然按《中国地震烈度表 GB/T 17742-2008》的划分均属于 B 类结构，但其抗震性能未必优于砖木结构。设置了圈梁和构造柱的约束砌体结构，特别是普通民居，虽然有一定的抗震构造措施，但大多并未经过抗震设计，未必满足抗震规范的要求，难以界定属于 B 类或 C 类结构，但其抗震性能明显优于非约束砌体结构。

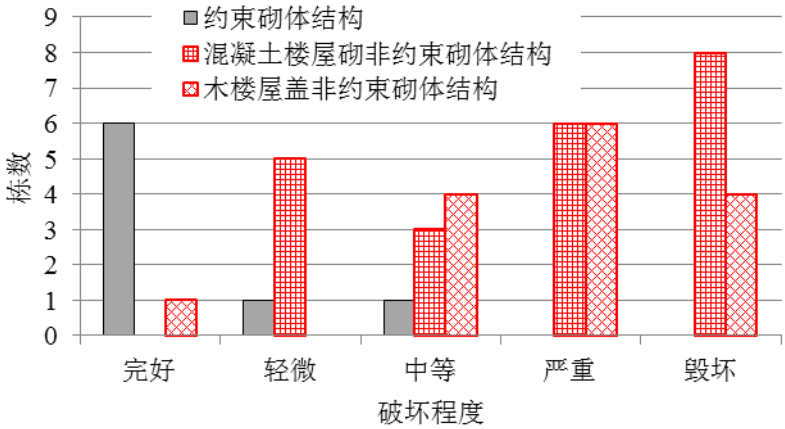

图 18 不同类型砌体结构的破坏比（VIII 度、IX 度区）

Fig. 18 Damage rate of masonry structures of various types (Intensity VIII, IX)

7 结语

本次地震强震动高频成分丰富，中低频成分衰减较快也是砌体结构震害重于其它柔性结构的重要原因之一。本文总结了不同类型的砌体结构房屋在 2013 年 7.0 级芦山地震中的震害特征。不同烈度区的砌体结构房屋表现出屋面落瓦、木屋架损伤或垮塌、砌体墙不同程度开裂甚至倒塌、混凝土预制板楼盖局部垮塌等不同程度的震害。混凝土屋盖砌体结构突出屋面的阁楼的破坏也具有普遍性。同一地点不同类型砌体结构破坏程度的对比表明，即使未经过正规的抗震设计，合理采用圈梁、构造柱等抗震构造措施的约束砌体结构的抗震性能明显优于非约束砌体结构。

参考文献

[1] 中国地震局. 四川省芦山“4·20”7.0 级强烈地震烈度图. 2013 年 4 月 25 日. （CEA. Earthquake intensity map of M7.0 ‘4.20’ Lushan earthquake in Sichuan. April 25, 2013 (in Chinese)）

[2] 国家强震动台网中心. 四川雅安芦山县 7.0 级地震（第五报）, 2013 年 4 月 23 日. （CSMNC. Fifth report for M7.0 Lushan earthquake in Sichuan. April 23, 2013 (in Chinese)）

[3] GB50011-2011. 建筑抗震设计规范[S]. （GB50011-2001. Code for seismic design of buildings[S] (in Chinese)）.

[4] GB/T 24335-2009. 建（构）筑物地震破坏等级划分规范[S]. （GB/T 24335-2009. Classification of earthquake damage to buildings and special structures [S]. (in Chinese)）

[5] GB/T 17742-2008. 中国地震烈度表[S].（GB/T 17742-2008. The Chinese seismic intensity scale [S]. (in Chinese)）