

## 汶川 8.0 级地震甘肃陇南地区建筑震害调查

刘 玮<sup>1,3</sup>, 吴志坚<sup>2</sup>, 马宏旺<sup>1</sup>, 王兰民<sup>2</sup>, 陈龙珠<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学安全与防灾工程研究所, 上海 200240;

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 浙江大学宁波理工学院土木系, 浙江 宁波 315100)

**摘要:**总结了2008年汶川8.0级地震在甘肃陇南地区造成的农村房屋和城镇房屋的典型震害及其原因。考察发现,由于农村房屋一般未经抗震设防设计,在本次地震中即使在低烈度地区仍然震害严重;而城镇房屋震害较轻,一般均表现出良好的抗震性能,严重破坏的大多是一些施工质量差,缺乏良好的抗震概念设计以及改建时未考虑抗震设计的建筑。建筑震害调查的几个地区设防烈度均为VIII度,实际烈度为VI~IX度,因此这些地区的房屋震害情况刚好能反映这些地区房屋抵抗小震、中震及大震的能力。结果表明,严格按照抗震规范设计、并保证施工质量的建筑基本都能达到三水准设防目标。最后本文对灾后重建和抗震设防提出了建议。

**关键词:**汶川地震;震害调查;三水准抗震设防;农村房屋;城镇房屋;设防烈度

**中图分类号:** TU352.1; P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2010)02-0179-07

## Damage Investigation of Buildings in Southern Gansu Province during the Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake

LIU Wei<sup>1,3</sup>, WU Zhi-jian<sup>2</sup>, MA Hong-wang<sup>1</sup>, WANG Lan-min<sup>2</sup>, CHEN Long-zhu<sup>1</sup>

(1. Institute of Engineering Safety and Disaster Prevention, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;

3. Department of Civil Engineering, Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Zhejiang Ningbo 315100, China)

**Abstract:** The typical seismic damages of buildings in both rural and urban areas in southern Gansu province during the Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake in 2008 and the corresponding reasons are summarized. The investigation showed that the seismic damages of rural buildings were very different from that of urban buildings. Generally, the construction of rural buildings does not follow the seismic design code, which leads to serious damage even in low-intensity seismic areas. Urban buildings, on the other hand, generally survived the earthquake with light or moderate damage. It was found that severe damages of urban building were mostly caused by the effect of poor construction quality, improper design and unreasonable reconstruction. The seismic fortification intensities for those investigated regions are all 8 degree, while the real intensities are 6~9 degrees. So the observed seismic damage could be used to demonstrate whether the current design methods could satisfy the Three-Level performance fortification target. The survey result shows that buildings with good seismic design and construction all have a well seismic behavior, and the distributions of building damages have good agreement with the seismic fortification objectives. At last, advices for seismic fortification and post-earthquake rebuilding are given.

**Key words:** Wenchuan earthquake; Earthquake damage investigation; Three-level earthquake performance objectives; Rural building; Urban building; Fortification intensity

# 0 引言

2008年5月12日在四川省汶川县发生的 $M_s8.0$ 地震是我国自建国以来发生的破坏性最为严重的一次地震,直接严重受灾地区达10万 $km^2$ 。地震除给四川省造成巨大灾难外,对邻近的甘肃、陕西两省部分地区也带来严重的灾害。甘肃省东南部的文县、武都、天水、平凉、定西等地遭受了严重的人员伤亡和财产损失,大量农村房屋、城镇建筑及公用设施遭到严重破坏,其中陇南市多处山体滑坡崩塌,部分县区交通、水电、通讯中断,直接经济损失达到490亿元左右<sup>[1]</sup>。

地震发生后,甘肃省地震局与上海交通大学组成联合震害科考队,于2008年6月3-8日深入甘肃陇南地区,考察了武都、文县、天水和武山等地的部分农村和城镇房屋震害状况以及地质震害破坏情况。本文主要介绍这次科考对该地区农房和城镇房屋的典型震害及其原因的总结,并对灾后重建和抗震设防提出了建议,以有益于今后提高和改善该地区的建筑抗震性能。

## 1 汶川地震中甘肃部分地区的地震加速度和烈度分布

汶川8.0级地震发生后,中国地震局组织专家在实地调查基础上,编绘了汶川8.0级地震烈度分布图(图1)<sup>[2]</sup>。由图可见,本文涉及重点考察的甘肃省文县处于VII~IX度区,武都处于VII~VIII度区,武山和天水均处于VI度区。表1列出了甘肃省境内相关5个强震台站的实测地震动加速度结果<sup>[3]</sup>。

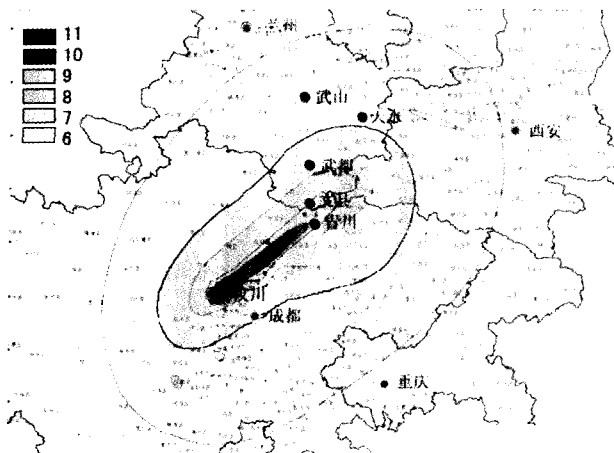


图1 汶川8.0级地震烈度分布图(据文献[2])  
Fig.1 Intensity distribution of the Wenchuan earthquake.

表1 甘肃省南部几个地区的地震加速度三分量幅值

测站	震中距 /km	东西向 /gal	南北向 /gal	竖向 /gal	测点场地
文县	249	180	180	168	洞室岩石
武都	304	173	158	107	自由场土中
宕昌	316	91	-108	-59	自由场土中
岷县	400	71	45	25	自由场土中
兰州	560	-38	40	22	自由场土中

## 2 建筑物震害情况

### 2.1 农村房屋的主要震害表现

本次震害调查的甘肃省陇南地区村镇房屋结构形式主要有:土木结构、砖木结构、砖混结构建筑,其中土木结构房屋在农村占80%以上<sup>[4]</sup>。下面分别介绍各类建筑的主要震害情况。

#### 2.1.1 土(砖、石)墙承重木顶架平房的主要震害

土(砖、石)墙承重木顶架平房的承重墙体一般为自建的土坯墙、夯土墙、碎(砾)石堆砌墙,没有经过正规设计。该类型房屋抗震能力极差,在VII区山上、VIII度及其以上的地区大部分出现局部倒塌或全部倒塌(图2)。



图2 文县的砾石堆砌墙体塌落(VIII度区)

Fig.2 Stone wall collapse in Wenxian county town(8 degree zone).

#### 2.1.2 木构架承重土(砖、石)墙平房的主要震害

木构架承重房屋大多是上世纪80年代以后建造的正规“四梁八柱”房屋,整体性能和延性均较好。在VII度和VIII度区其主要震害形式表现为:墙体产生斜裂缝、酥裂、隔墙局部倒塌,木构架柱脚移动等;在IX度区其主要震害是:屋盖滑落、墙体倒塌、山墙外闪、屋顶塌落,木构架一般不倒,少数发生倾斜或产生裂缝(图3)。

#### 2.1.3 砌体结构的主要震害



图 3 文县碧口镇木构架承重房屋局部倒塌 (IX 度区)

Fig. 3 Damage of adobe (brick) wall and wooden frame bearing structure building in Bikou town, Wenxian county (9 degree zone).

甘肃的农村砌体房屋一般未经正规抗震设计, 再加上砌体材料为脆性材料, 因此该类建筑抗震性能很差。但由于农村民居一般房屋体型较小、平面布置规则、结构形式简单, 因此在本次地震中砌体结构农居并未出现大面积的整体倒塌。主要的震害形式为墙体破裂、屋檐或女儿墙塌落、墙体错位、砖墙体产生较宽的斜裂缝、X 形裂缝、水平裂缝、竖向裂缝等形式, 门窗发生严重变形等。

在调查中发现, 缺乏合理的抗震概念设计和构造措施, 是造成该类砌体房屋严重破坏的主要原因。明显的例证是, VIII 度区未经抗震设计的砖混结构一般破坏严重, 而处在同一烈度区的由甘肃省建设厅引导农民建设的砖混结构房屋 (一般为独立的二层建筑) 却有着良好的安全抗震性能, 基本没有受到破坏。

(1) 未合理设置构造柱或圈梁的砖混房屋

位于文县碧口镇农村的某二层民宅, 屋顶倒塌, 墙体严重受损。该房屋在自建时, 屋主有一定的抗震设防意识, 但缺乏科学的结构抗震知识。该房屋仅一楼设有构造柱, 而所谓的圈梁在纵横墙交接处未连成整体, 这使得构造柱和圈梁起不到约束脆性墙体的作用。再加上屋架与屋顶圈梁间未设置可靠连接, 所以房屋整体性能很差, 震害十分严重。震害主要表现为: 屋顶整体坍塌, 局部墙体倒塌, 尤为明显的是二层未设构造柱的外角墙体甩出, 房屋的内外墙均严重破损 (图 4)。

(2) 不规则的砌体结构

与文县相邻的四川省青川县姚渡镇某三层砖混

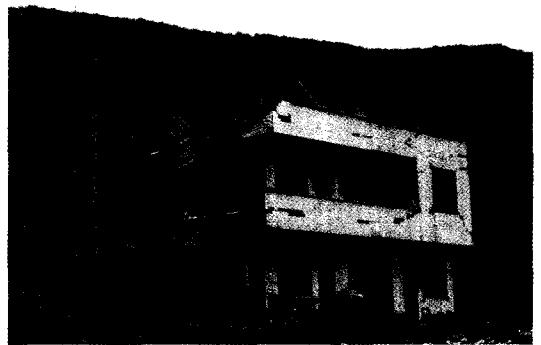


图 4 碧口镇砖混民居破坏 (IX 度区)

Fig. 4 Damage of masonry residence in Bikou town, Wenxian county (9 degree zone).

住宅建于上世纪 90 年代, 刚性楼屋盖, 四角设有构造柱, 每层均设有圈梁, 为农村自建房中抗震构造措施布置较好的房屋结构。但该房屋仍有较严重的震害, 其墙体破损主要集中在侧立面及与之相连的内墙。究其原因, 主要有两个: 一是该房屋顶层部分墙体缩进, 底层的外墙门洞尺寸大, 房屋体型复杂; 二是如图 5 所示的两门洞之间的柱为砖柱, 且截面小, 此处形成薄弱区域。地震力易在薄弱区域集中, 地震来时该砖柱及与之相连的内墙可能首先严重破坏, 而砖柱的破坏又使得上部梁的跨度骤然增大, 从而加速梁上墙体的破坏。由此可见, 对于高烈度区体型较复杂的砌体结构, 仅设置常规的构造柱及圈梁是远远达不到抗震要求的。



图 5 姚渡镇砖混民居破坏 (IX 度区)

Fig. 5 Damaged masonry residence in Yaodu town, Qingchuan county (9 degree zone).

(3) 采用混凝土小型空心砌块为承重墙的房屋

文县近年来不少农居采用混凝土小型空心砌块为承重墙体。汶川地震使这类房屋均遭到了严重损坏, 墙体出现沿灰缝的 X 形裂缝 (缝宽 3 ~ 12 mm 不

等),甚至出现水平错动(图6)。究其原因,墙体采用非承重的空心砌块作为承重墙,不设置芯柱(或构造柱),不设置圈梁或圈梁不闭合,砌筑质量差,屋盖与墙体一般无任何可靠连接。

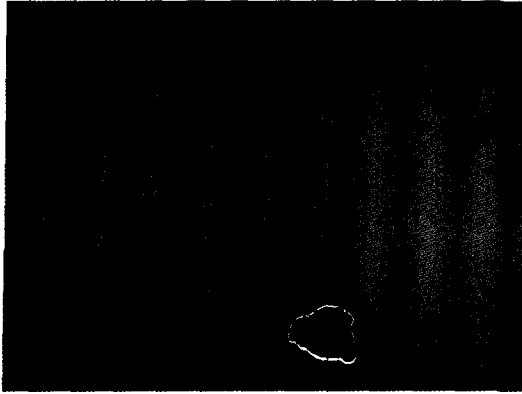


图6 文县肖家乡空心砌块承重民居(Ⅸ度区)  
Fig.6 Damage of residence with hollow-unit wall bearing in Xiaojia, Wenxian county (9 degree zone).

## 2.2 城镇房屋的主要震害表现

### 2.2.1 房屋加层或改建引起的震害

陇南市武都区人大常委会大楼建于上世纪80年代,原为三层的砖混结构房屋(局部四层),于上世纪90年代在原三层屋顶加盖了一层。本次地震中整幢房屋破坏严重,主要震害为:内外纵墙均出现明显X形裂缝,其余部位墙体尤其是楼梯间墙体破坏严重,加层部分梁柱节点破坏,加层部分填充墙与柱严重脱离(图7)。据现场考察,该楼存在墙体砌筑质量较差,楼梯间加强措施不足,墙体与柱之间无可靠连接等问题,但主要是由不恰当加层引起的。该楼的加层部分采用粘土砖墙框架承重方案,形成下部砖混、上部框架体系,结构传力途径较为混乱。

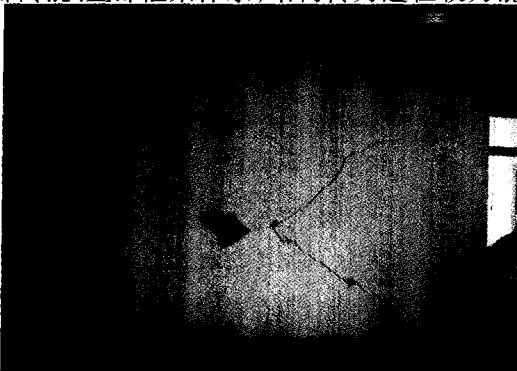


图7 陇南市武都区人大常委会大楼X形裂缝(Ⅶ度区)

Fig.7 X-cracks on wall of Wudu PC standing committee building(7 degree zone).

规范中对这种处理无明确的计算方法与构造措施,在抗震上是不宜使用的。

### 2.2.2 平立面布置不合理引起的震害

文县中医院大楼为建于上世纪90年代的四层砖混结构(局部五层),平面为L形,背面通过走廊与职工家属楼相连。由于平、立面不规则,产生了强烈的扭转反应,导致离转动中心远的墙体破坏严重(图8)。



图8 文县中医院大楼破坏(Ⅷ度区)

Fig.8 Damages in Wenxian Traditional Chinese Medicine Hospital(8 degree zone).

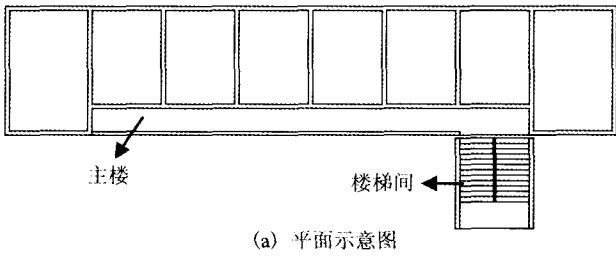
### 2.2.3 结构缝处碰撞引起的震害

文县县政府为9层钢筋混凝土框架结构房屋,纵向两端各设有一道抗震缝,缝宽满足规范要求。该地区设防烈度为8度,受5.12汶川地震影响的实际烈度与此相近,地震后结构未受损,部分墙体出现轻微破坏,抗震缝封口处的白铁皮部分脱落。

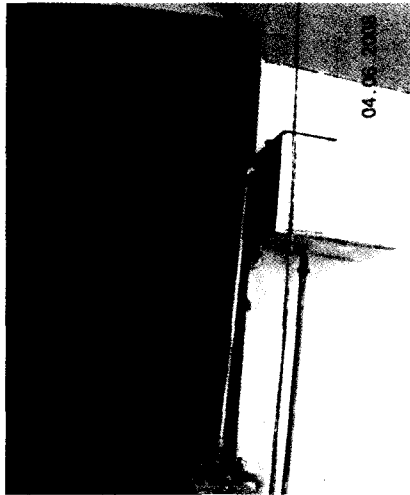
武都区交通局大楼为建于1987年的三层砖混结构,建造时主楼与楼梯间完全分离,缝宽仅为10mm,以马粪纸填缝,如图9所示。主要震害为主体结构与楼梯间相互碰撞所致。主体结构及楼梯间的震害相比,楼梯间墙体(尤其在顶层)受损程度更大。

图10为文县城关第一小学建筑群平面布置示意图,其中教学主楼由3部分不同年代建造的砖混结构组成:中间A楼建于1987年,左侧B楼建于1998年,右侧C楼建于2006年。之后又先后在教主楼的后侧建造了两座体量较小的房屋D楼和E楼,其中D楼的外墙紧靠教学主楼的外走廊栏板,E楼外走廊的柱子也紧靠教学主楼的外走廊栏板。这样几幢完全分离的房屋紧靠在一起,结构缝不满足抗震缝设计要求,地震时各部分之间发生了相互碰撞,各缝两侧的墙体、屋面、楼板、柱及走廊栏板均遭

受了不同程度的破坏。



(a) 平面示意图



(b) 楼梯间与主楼外廊栏杆板接缝处

图9 武都区交通局大楼破坏(Ⅶ度区)  
Fig.9 Damages in Wudu traffic bureau building (7 degree zone).

### 3 场地放大效应对房屋震害的影响

在甘肃省南部,山多地少,许多村镇房屋都建造在山上,房屋建筑震害较山下的显得严重。这是由于该地区地形比较复杂,斜坡发育,孤突地形和高陡斜坡的上部边缘部位(即塬边和高阶地前缘)对地震烈度乃至震害的加重影响十分明显,这已被大量的宏观震害实例所证实。

本次调查再次表明,不但沿山高具有地震放大效应,而且在同一高处台地上,临坡区域也具有地震放大现象而加剧地震破坏。

武都县蒿坪村(海拔1 811 m)和刘家坡村(海拔1 485 m)位于同一座山上,民房均以土坯房为主。蒿坪村位于山顶台地临坡区域的土坯房几乎全部整体倒塌,而位于山腰的刘家坡村土坯房震害较轻,主要表现为墙体破裂、墙体酥裂、纵横墙分离等。图11给出了这两个村中结构形式及体量均相同的木构架房屋的柱脚移动差异,清楚地表明了地震作用在山顶更大。

### 4 震害与抗震防灾规划的对比分析

建国后,我国发生过几次大的地震。1975年海城地震中,2 734 km<sup>2</sup>范围的房屋顷刻间倒塌;1976年的唐山大地震使整个唐山市成为废墟,自此之后

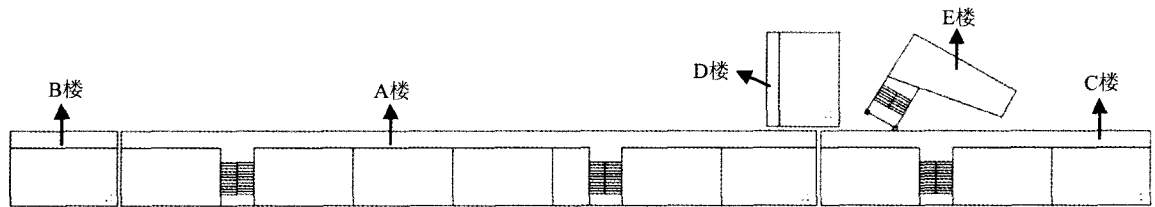


图10 文县城关第一小学平面示意图(Ⅷ度区)

Fig.10 Plan view of the first primary school's buildings, in Wenxian town(8 degree zone).

建筑抗震问题得到了国家的高度重视,吸取唐山地震的经验教训,原有的抗震规范进行了重大修订,于1989年颁布了《建筑抗震设计规范》(GBJ 11-89)。

2008年5·12汶川大地震的强度、烈度都超过了唐山大地震,据不完全统计地震已导致超过3 000万m<sup>2</sup>建筑倒塌,1.2亿多m<sup>2</sup>房屋受损。这场巨大灾难所引发的严重伤亡,再次引发了人们对于建筑工程抗震设防的关注与普遍质疑。对于灾情最为严重的四川省来说,本次地震重大灾害的重要原因是地震震级大,烈度高,远远超过了国家的抗震设防标

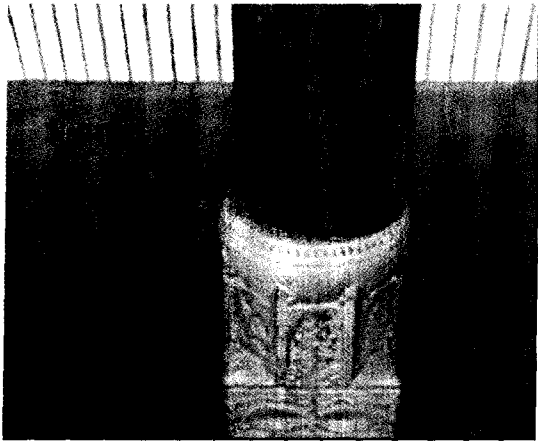
准,因此不能仅以此来否定现有的抗震设计方法和建筑的抗震能力。

我国从1989年颁布实施的建筑抗震规范开始,采用三水准抗震设防目标,二阶段抗震设计方法<sup>[5,6]</sup>。即通过二阶段设计中第一阶段对构件截面承载力验算和第二阶段对弹塑性变形验算,并与概念设计和构造措施相结合,从而实现“小震不坏,中震可修,大震不倒”的三水准抗震要求。

本次甘肃考察地区的设防烈度均为Ⅷ度,而实际烈度为Ⅵ~Ⅸ度(见表2)。这就意味着,在汶川



(a) 蒿坪村



(b) 刘家坡村

图 11 武都县相邻两村柱脚移动的对比

Fig. 11 Comparison of wooden column base movements in Haoping and Liujiapo villages, Wudu county.

地震中对于这些考察地区来说,造成实际烈度为Ⅶ度时,建筑物应该不坏;实际烈度为Ⅷ度时,建筑物应该可修;实际烈度为Ⅸ度时,建筑物应该不倒。我们看到,考察地区很少高大建筑物,特别是县、乡镇多为单层、多层建筑。有一定数量的房屋倒塌,凡是按照《建筑抗震设计规范》设计建造的房屋虽有损坏,却没有发生倒塌现象。调查结果表明,按照国家规范和标准正常设计施工以及正常使用的房屋都具有良好的抗震能力,震害分布情况与抗震设防目标基本一致。武山与天水城区内的房屋震害轻微;武都城区内的房屋震害较武山与天水重,但大多数受损房屋经维修或加固后仍可继续使用,危房较少;文县城区的房屋震害较前者则更严重一些,但基本没有房屋整体和局部倒塌的现象出现。由此可见,我国目前实行的《抗震设计规范》对防止和减少地震灾害可能带来的破坏性起到了至关重要的作用。

表 2 甘肃省南部地区的地震烈度与设防烈度对比

考察地区	实际烈度	设防烈度及设计基本地震加速度
天水	Ⅵ	Ⅷ, 0.30 g
武山	Ⅵ	Ⅷ, 0.20 g
武都	Ⅶ、Ⅷ	Ⅷ, 0.20 g
文县	Ⅶ~Ⅸ	Ⅷ, 0.20 g

尽管我国抗震设防要求“大震不倒”,但两阶段的抗震设计方法仅要求对少数重要建筑进行抗震倒塌计算,对大量一般性的建筑,则主要依赖整体结构的抗震概念设计和抗震构造措施。而本次地震中倒塌的大多数是一般房屋建筑,如何对这类建筑从技术上保证能够实现“大震不倒”的目标,还有必要进一步深入研究。这就对两阶段的抗震设计方法提出了新的要求。

### 5 结语

甘肃省在汶川地震中的重大损失主要发生在房屋大多未经抗震设防的广大农村和山区。城镇房屋一般均经过抗震设计,且本次地震造成的最高烈度区比设防烈度只高出一度,因此震害情况相对较轻。通过对甘肃震区建筑震害调查和原因分析,可以得出以下几点结论和建议:

(1) 建筑抗震设计规范是保证建筑抗震能力的重要依据。本次建筑震害调查的几个地区设防烈度均为Ⅷ度,而实际烈度为Ⅵ~Ⅸ度(Ⅶ度相当于小震,Ⅷ度相当于中震,Ⅸ度相当于大震)。因此,这些地区的房屋震害情况刚好能反映这些地区房屋抵抗小震、中震及大震的能力。调查表明,严格按照抗震规范设计、并保证施工质量的建筑,基本都能达到“小震不坏,中震可修,大震不倒”的三水准设防目标。

(2) 农村房屋抗震设防能力急需提高。在汶川地震中,甘肃省倒塌的房屋主要在农村及小城镇,死亡人数也是主要发生在这些地区。我国自唐山地震以来,对城市的房屋建筑设计比较重视,而广大农村及小城镇由于经济落后,对其建筑的抗震设计至今仍重视不够。此外,农村大多数房屋属于自建房,没有设计和施工标准。本次重大灾害警示人们必须高度重视农村建设的抗震设防问题。提高村镇房屋的抗震性能,应当看成今后村镇房屋抗震研究的重点和阶段性目标。目前在甘肃省开展的新农村建设工程取得较好的效果,应继续在更大的范围内推进。

(3) 加强对山区地震灾害的研究与防治。汶川地震波及的许多地方在山区,灾害远比平坦地区的严重。山区地震灾害十分复杂,大量的山体滑坡、崩

塌,导致众多房屋被毁和人员伤亡,而山区地形对地震作用的放大效应亦加剧了震灾,使得人们对山区地震造成的破坏力一般估计不足。因此要高度重视地震所带来的山区地震灾害,这方面的工作应成为我国今后地震研究的一个重要方向。

(4) 重视抗震措施对实现抗震设防目标所起到的重要作用。为实现抗震设防目标所进行的二个阶段抗震设计包括“抗震计算”和“抗震措施”这两大部分。“抗震措施”范围主要有:选址、结构选型、确定结构体系及为增大结构延性而设的各有关抗震构造措施等。汶川地震中抗震设计一些基本概念缺乏和构造措施疏忽是导致建筑破坏的一个重要原因,如建筑承重体系的选择不当,抗震缝的设置不当,构造柱和圈梁的设置不合理,墙柱间的连接不可靠等。而我国对大量的一般建筑,实现“大震不倒”抗震设防目标主要依赖整体结构的抗震概念设计和抗震构造措施,因此必须对此高度重视。

(5) 建议在高烈度区取消某些结构形式的农民用房。甘肃村镇房屋结构形式复杂,如土(砖、石)墙承重木顶架平房有土坯墙承重、外墙内木柱承重、一面砖墙三面土坯墙承重等多种形式。本次考察发现,该种结构在Ⅵ度,Ⅶ度区墙体局部倒塌现象较

少,但在Ⅸ度地区及Ⅶ度但具有场地放大效应的山顶损毁严重,几乎夷为平地。对这种抗震性能差的结构体系,是很难通过增加一些简单的构造措施来提高其抵抗强震的能力的。因此建议在Ⅷ度及其以上区域,取消土(砖、石)墙承重木顶架平房。

说明:本文主要内容2009年6月应邀在IS-Tokyo2009国际学术会议上做过交流。

#### [参考文献]

- [1] 汶川地震直接经济损失[EB/OL]. <http://gsrb.gansudaily.com.cn/system/2008/09/05/010829129.shtml>.
- [2] 中国地震局. 汶川8.0级地震烈度分布图[EB/OL]. [http://www.ccea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/\\_content/08\\_08/29/1219979564089.html](http://www.ccea.gov.cn/manage/html/8a8587881632fa5c0116674a018300cf/_content/08_08/29/1219979564089.html).
- [3] Wang Lan-min, Wu Zhi-jian. The Wenchuan  $M_s$ 8.0 earth quake and its damage in Gansu Province[R]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, CEA, 2008.
- [4] 张守洁,王兰民,吴建华,等. 甘肃省农村民居抗震设防现状与地震安全农居示范工程对策[J]. 震灾防御技术,2006,1(4): 345-352.
- [5] GBJ 11-89, 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [6] GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.