

# 汶川地震建筑震害分析

清华大学土木工程组, 西南交通大学土木工程组, 北京交通大学土木工程组

**摘要:** 2008年5月12日四川汶川发生8.0级地震, 地震造成了大量建筑的倒塌和损坏, 给人民的生命和财产带来了巨大的损失。本文汇总了清华大学、西南交通大学和北京交通大学土木工程组在四川地震主要灾区所调查的建筑震害资料, 根据建筑的结构类别、建造年代、地震区估计烈度和使用功能进行了统计整理。结合典型工程震害案例, 分析了此次地震中的建筑震害特点, 总结了一些经验和教训。

**关键词:** 汶川地震 震害分析 震害案例

## 1 引言

2008年5月12日14时28分, 四川汶川县发生里氏8.0级地震, 震中位于汶川县映秀镇(纬度 $31.0^{\circ}\text{N}$ 、经度 $103.4^{\circ}\text{E}$ ), 震源深度14km。汶川地震是我国自建国以来最为强烈的一次地震, 直接严重受灾地区达10万平方公里, 包括震中50km范围内的县城和200km范围内的大中城市。全国大部分地区有明显震感, 泰国首都曼谷, 越南首都河内, 菲律宾、日本等地也有震感。截至6月14日, 地震已造成69170人遇难, 17428人失踪, 374159人受伤, 4624万人受灾。地震发生后, 清华大学立即组织了相关专业的专家赶赴四川协助抗震救灾, 并会同西南交通大学和北京交通大学土木工程有关专家, 先后分三批开展建筑震害调查, 广州建筑质检站专家也提供了相关建筑震害安全检查的数据。本文汇总了有关建筑震害调查资料, 根据建筑的结构类别、建造年代、地震区估计烈度和使用功能, 对建筑震害情况进行了初步统计, 分析了此次地震的建筑震害特点。在此基础上, 对我国建筑抗震现状进行了初步评价, 并提出了有关建议。

## 2 建筑震害等级划分

本次建筑结构专家赴四川协助抗震救灾主要工作是进行房屋建筑震后安全检查。根据当地有关部门要求, 按震后建筑结构的破坏程度被分为四个等级:

(1) 可以使用, 即结构的承重结构基本保持完好, 少量非结构构件损伤, 继续使用不会引起承重结构的破坏, 损伤的非结构构件不会造成对生命和财产威胁;

(2) 加固后使用, 即承重结构发生一定的损伤, 部分非结构构件破坏, 继续使用可能将会引起承重结构的损伤加大, 或是剩余的非结构构件不稳定, 对生命和财产产生威胁;

(3) 停止使用, 即承重结构发生严重损伤, 仅能保持自身结构稳定, 不能继续使用;

(4) 立即拆除, 即承重结构发生非常严重的损伤, 随时可能发生倒塌。

另外, 也有一些地区要求将建筑物损伤程度分为三个或五个等级的。

尽管以上震后建筑结构破坏程度等级划分标准与建设部1990颁布的《建筑地震破坏等级划分标准》不一致, 但考虑到本次地震灾区建筑安全检查的实际情况, 本文建筑震害调查统计仍根据“可以使用、加固后使用、停止使用、立即拆除”四个等级来进行, 并将震区建筑破坏程度按照结构形式、建造年代、震区估计烈度和使用功能进行分类统计整理, 对研究震害成因和今后制定抗震设防标准具有重要的参考价值。

## 3 各类结构形式的震害

### 3.1 砌体-木屋架结构

由于木材可以就地取材, 砌体使用较少, 这种结构的造价非常低, 在村镇多采用这种结构作为简易厂房、仓库等。但是这种结构的砌体墙和砌体柱强度不高, 且大多年代较长, 在地震中容易发生屋面破坏和局部倒塌, 见图 1。



安县某厂房

荇华镇自建住宅

红白镇中学单层教室

图 1 砌体-木屋架结构的震害

### 3.2 砖混结构

地震区村镇的住宅、教学楼, 城市的一些旧的居民楼、办公楼、小型厂房多采用砖混结构。这类结构在震区数量最多, 震害也比较严重, 比较典型的破坏形式有: 结构抗震体系单薄, 未设置构造柱, 也有未设置圈梁, 预制楼板未拉结。图 2 为砌体结构震害情况。

当合理设置构造柱和圈梁, 砖混结构也能有效抵御地震破坏, 在震害调查中也发现基本没有受到破坏的砖混结构。因此, 对于砌体结构, 如何保证结构的整体性和侧向承载力是抗震设计的关键。



南坝镇小学教学楼垮塌

汉旺镇铁路货运站宿舍楼倒塌

荇华中学教学楼右段倒塌  
(左段为框架结构)

江油花园路初级中学教学楼纵向承重  
墙和砖柱严重破坏

雁门中心小学教学楼预制板拉结不足  
导致破坏

安县合理设置构造柱和圈梁的砌体结  
构

图 2 砖混结构的震害

### 3.3 框架-砌体混合结构

这类结构形式有多种, 如底框砖混结构(底部框架-上部砖混, 竖向混合), 底层部分框架、部分砌体-上部砖混, 以及部分框架-部分砖混(水平混合)。这类结构的体系大多比较混乱, 由于经济原因, 大多尽可能少用混凝土框架, 框架和砌体承重墙抗侧力构件的承载力和变形能力很不协调, 平面抗侧刚度极不均匀。这类结构的震害主要有: 底部框架由于变形集中而破坏, 或上部砌体结构破坏。图 3 为框架-砌体混合结构的震害情况。





红白镇底框砖混加油站



剑南春集团框架-砖混办公楼（水平混合）



都江堰魁光街底框砖混建筑震害

图 3 框架-砌体混合结构

### 3.4 框架结构

本次地震中,大多数框架结构的主体结构震害一般较轻,主要破坏发生在围护结构和填充墙,尤其是圆形填充墙的破坏较重(见图 12)。这类破坏仍然会造成严重的生命和财产损失,且震后的修复工作量很大和费用很高。个别因施工质量很差、结构布置过于复杂的框架结构也发生严重破坏,甚至倒塌。此外,由于楼板的增强作用、建筑需要在框架梁上增加砌体、或填充墙的增强作用、或增大上部结构的刚度,使得框架梁或屋盖的实际刚度增大,在实际框架结构震害中,很少看到“强柱弱梁”型破坏。图 5 为框架结构震害情况。此外,还有错层结构造成短柱剪切破坏,异形柱端破坏。



都江堰填充墙发生破坏



都江堰某住宅小区框架结构倒塌



都江堰某住宅小区框架结构底层破坏



都江堰某住宅小区框架结构倒塌  
(屋顶结构太重)



都江堰某公共建筑框架结构局部垮塌



南坝镇-强梁弱柱导致柱顶产生塑性较



错层造成短柱剪切破坏

异形柱端破坏

图4 框架结构的震害情况

### 3.5 框架-剪力墙（核心筒）结构

本次地震中，框架-剪力墙（核心筒）结构，由于具有较大的抗震刚度和承载力，显示出了优越的抗震性能，尤其是与统一地区的框架结构相比，框架-剪力墙（核心筒）结构的非结构构件的损坏要轻很多。图5为绵阳新益大厦，在地震中仅少数围护结构产生细微裂缝。

值得注意的是，框架-剪力墙（核心筒）结构主要在成都和绵阳等大城市才有采用，而这些城市在本次地震中的烈度并不高。因此，框架-剪力墙（核心筒）结构的抗大震性能在这次地震中没有表现出来。

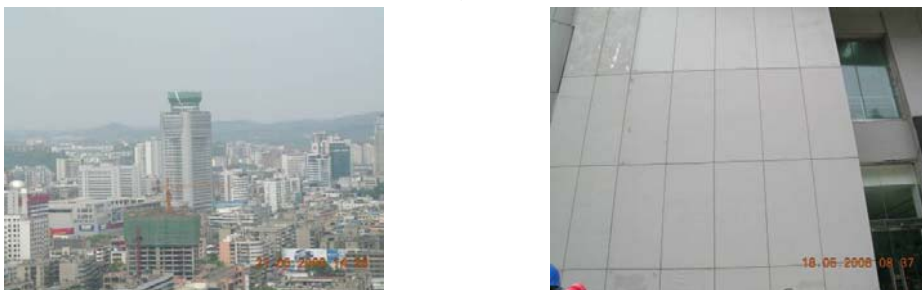


图6 绵阳新益大厦（承重结构没有损坏，少量围护结构有一些细小裂纹）

### 3.6 轻钢结构(屋面)/钢桁架拱

由于自重较轻和强度较大，钢结构抵御地震的能力比较强，震害比较轻，主要发生在维护结构。图7为绵阳九洲体育馆，其主体结构和支座均无明显损伤，仅在围护结构和钢结构的结合处有轻微碰撞破坏。图8为江油县体育馆，主体结构轻微损伤，网架结构无明显损伤，网架结构支座松动严重。



图7 绵阳九洲体育馆



图8 江油体育馆

### 3.7 其它震害



其它震害情况还有伸缩缝处碰撞（图 9）、鞭稍效应造成顶部突出物结构破坏（图 10）、装饰构件破坏（图 11）、圆形填充墙破坏（图 12）。



绵阳某酒店

汶川某教学楼

图 9 伸缩缝处碰撞破坏



都江堰某公共建筑

都江堰公安局

图 10 鞭稍效应造成顶部突出物结构破坏



图 11 装饰构件破坏



绵阳科技馆

剑南春办公楼

汉旺某办公楼

图 12 圆形填充墙破坏

## 4 震害情况统计

### 4.1 按结构形式

各类结构形式建筑的震害情况统计如表 1 所示。震区大量应用的砌体结构、砌体—框架混合结构和框架结构的不同震害程度的对比见图 13。破坏程度严重而应立即拆除和停止使用所占的比例来看，不

同结构形式的抗震性能按以下顺序依次增强:砌体结构——砌体—框架混合结构——框架结构——框架—剪力墙(核心筒)结构/钢结构。除了各类结构本身抗震性能的差别以外,结构体系和施工质量的离散程度也对结构的抗震性能有一定的影响。比如各种砌体结构,建造随意,有时没有进行设计,很多情况是结构体系不清楚,因此结构的抗震性能难以把握,破坏情况也多种多样,可能是砌体墙剪切破坏或砂浆强度不足错动剪切破坏,也可能是楼板拉结破坏和砌体墙的倾覆破坏。而框架结构、框架-剪力墙结构和钢结构,大多情况下结构体系的传力路径比较清晰,施工工艺先进,容易保证质量,结构的抗震性能能够比较准确的预测和设计。这类结构如发生严重震害,大多是由于施工质量问题或严重结构不规则造成。

表 1 建筑震害情况统计(按结构形式分类)

	可以使用	加固后使用	停止使用	立即拆除
砌体-木架屋顶结构	0 (0%)	2 (67%)	0 (0%)	1 (33%)
砌体结构	36 (22%)	59 (36%)	27 (17%)	40 (25%)
砌体-框架混合结构	17 (61%)	5 (18%)	4 (14%)	2 (7%)
框架结构	63 (60%)	34 (32%)	8 (8%)	0 (0%)
框架-剪力墙(核心筒)结构	5 (72%)	1 (14%)	1 (14%)	0 (0%)
轻钢结构(屋面)/钢桁架拱	3 (50%)	3 (50%)	0 (0%)	0 (0%)

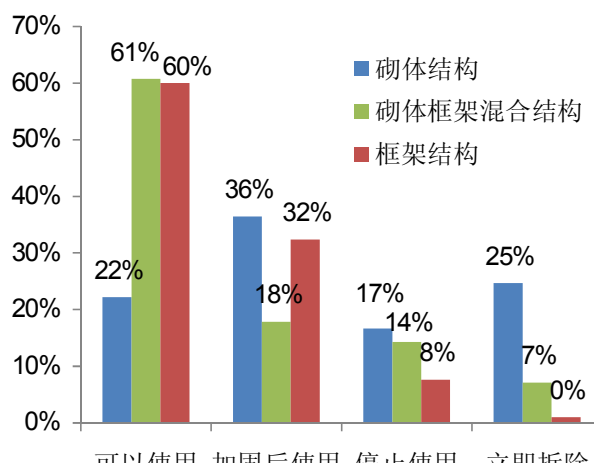


图 13 砌体结构、砌体框架混合结构和框架结构震害情况对比

#### 4.2 按建造年代

建造年代对结构破坏程度的影响有两方面:使用年限的长短和设计规范的不同。将建筑震害情况按照各版本抗震设计规范的实施年份划分,得到表 2 和图 14 所示的震害情况统计。由于 78 年以前的建筑现存较少,而且 78 版抗震规范条文比较简单,在比较中不再列出。可以发现 1979 年-1988 年之间的建筑结构破坏的情况最严重,其原因主要是,使用年限较长;当时经济水平较低,大多数房屋以砌体结构为主,而砌体结构本身的抗震性能相对于其他结构较弱;设计规范的安全储备水平较低。

表 2 建筑震害情况统计(按建造年代分类)

建造年代	可以使用	加固后使用	停止使用	立即拆除
-1978	3 (30%)	3 (30%)	3 (30%)	1 (10%)
1979-1988	21 (22%)	40 (42%)	7 (7%)	27 (28%)
1989-2001	34 (47%)	19 (26%)	11 (15%)	8 (11%)
2002-	29 (55%)	19 (36%)	4 (8%)	1 (2%)
不详	39 (51%)	22 (28%)	10 (13%)	6 (8%)

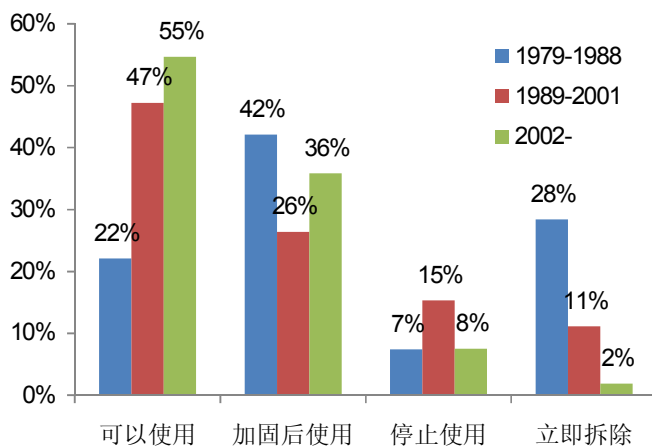


图 14 不同年代建造的建筑震害情况对比

比较抗震设计规范 TJ11-78<sup>[1]</sup>、GBJ 11-89<sup>[2]</sup>、GB50011-2001<sup>[3]</sup>可以发现，自 1976 年唐山地震以来，我国加强了对工程结构抗震领域的研究，使得抗震设计规范逐渐完善，在抗震设计中考虑的内容越来越全面，如表 3。同时，随着经济水平的提高，对建筑抗震设计要求也越来越高，以同期的混凝土结构规范为例<sup>[4]-[7]</sup>，结构的设计安全水平和安全储备从 74 规范以后逐渐提高，如表 4 所示。而 74 规范的安全水平和安全储备之所以最低，正是受当时经济水平所限。由此可见，抗震水平也是国家经济水平的反映。

表 3 抗震设计规范的内容比较

	TJ11-78 <sup>[1]</sup>	GBJ 11-89 <sup>[2]</sup>	GB50011-2001 <sup>[3]</sup>
概念设计要求	非常简单	简单	较为详细
场地和地基	简单的场地土要求；验算地基土容许承载力；判别是否是液化土。	场地和土的类型划分；较为详细的分类地基土承载力验算；判别液化土的液化程度，分别提出对应抗液化措施。	增加对断裂带的要求；对桩基的抗震要求；其余同左。
地震荷载计算	仅考虑水平方向的底部剪力法和振型分解反应谱法。	考虑扭转和竖向地震作用；考虑顶部附加地震作用；其余同左。	增加对层间地震力的要求；考虑地基与结构的相互作用，其余同左。
截面抗震验算	简单的几个参数对强度做要求，无详细规定。	较为详细的强度验算，增加了对变形的要求以及薄弱位置处的弹塑性变形计算。	同左，但是规定更为详细。
主要构造要求	砌体结构	限制抗震横墙的间距和建筑总高度；对一定高度的建筑，选择使用构造柱；对部分情况下的混凝土预制楼板做拉结要求。	增加高宽比要求；详细的抗剪强度计算公式；对一定高度的建筑，要求正常情况下使用构造柱，对教学楼、医院等横墙较少的建筑，提高对使用构造柱的要求；增加对多层砌块结构的要求。
	框架结构	设置抗震缝；要求质量中心和刚度中心重合；设置柱的最小配筋率；给出了详细的节点构造图。	限制规范最大使用高度；划分抗震等级；规定规则结构的定义；对抗震墙做较为详细的规定；对基础、钢筋的接头与锚固做要求；设定截面设计的地震调幅；设定详细的梁、柱及其加密区的纵筋和箍筋间距和最小直径等要求；限制柱的截面和轴压比。
			提高对抗震等级的划分；提高截面设计的地震调幅；对跨高比较小的连梁和剪跨比较小柱提高抗剪要求；提高对柱截面、纵筋和箍筋的要求；其余同左。

\*内容相同的部分，新版规范的详细程度往往高于旧版规范。

表 4 混凝土结构设计规范的安全水平与安全储备的比较

规范系列	安全水平		安全储备	
	受弯构件	受压等构件	受弯构件	受压等构件
BJG21-66 <sup>[4]</sup>	2.22 (1.59)	2.10 (1.35)	2.22 (1.27)	2.10 (1.13)
TJ 10-74 <sup>[5]</sup>	1.40 (1.00)	1.55 (1.00)	1.75 (1.00)	1.86 (1.00)
GBJ 10-89 <sup>[6]</sup>	1.72 (1.23)	1.61 (1.04)	2.24 (1.28)	2.08 (1.12)
GB50010-2002 <sup>[7]</sup>	2.15 (1.54)	2.00 (1.29)	2.80 (1.60)	2.60 (1.39)

\*以 TJ 10-74 为参考值；安全水平：以标准值为参考；安全储备：以平均值为参考。

### 4.3 按地震区烈度

根据本文作者所调查本次地震区估计烈度，各地区建筑震害情况统计见表 5 和图 15。从破坏情况较为严重的两类建筑（“停止使用”和“立即拆除”）来看，基本符合烈度越大，破坏越严重的分布趋势。但是都江堰、绵阳和相同地震烈度的其他地区相比，震害较轻。主要是由于这两个城市的经济水平相对较好，建筑以框架结构或框架-剪力墙结构为主；而其他地区，如江油，建筑以砌体结构为主，震害较为严重。由此可见，除了国家整体经济水平对抗震设防水准的影响外，地区经济水平也对抗震水平也起到了约束作用。

表 5 建筑震害情况统计（按本文作者估算地震区烈度分类）

设防烈度	绵阳 6	梓潼 7	江油 7	都江堰 7	安县 7	平武 7
本次地震估计烈度	绵阳 6+	梓潼 6	江油 7	都江堰 7.5	安县 7.5	平武 7
可以使用	41 (64%)	1 (8%)	19 (19%)	45 (30%)	16 (47%)	3 (12%)
加固后使用	10 (16%)	7 (54%)	46 (46%)	29 (35%)	7 (21%)	4 (15%)
停止使用	11 (17%)	1 (8%)	11 (11%)	9 (11%)	4 (12%)	11 (42%)
立即拆除	2 (3%)	4 (31%)	25 (25%)	0 (0%)	7 (21%)	8 (31%)

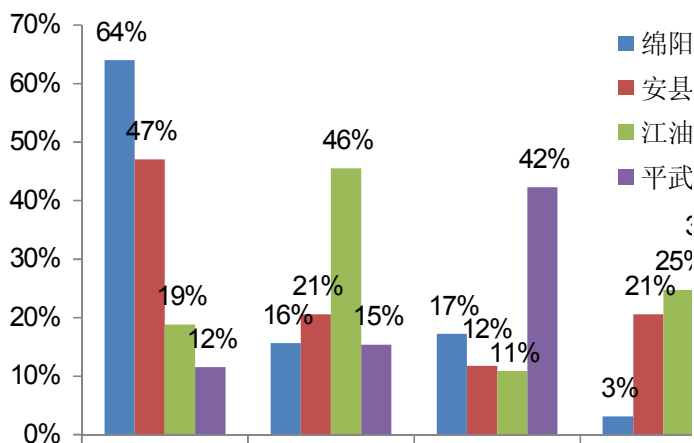


图 15 不同地区的建筑震害情况对比

### 4.4 按使用用途

从建筑使用用途上来看，学校和工厂建筑的震害最严重，如表 5 和图 16 所示。震区的学校建筑主要以砌体结构为主，加上建筑上的大开间、大门窗洞、外挑走廊，有时甚至无抗震构造措施，导致其抗震性能较差。工厂的厂房也多为砌体结构，规模不大而且多为人员较少的车间，因此其抗震设计的要求也很低，导致震害较为严重。政府机构多用框架结构，其震害最轻。其他类型建筑的震害介于这两类建筑之间。



表 5 建筑震害情况统计 (按使用功能分类)

	学校	政府	商住	工厂	医院	其他公建
可以使用	6 (16%)	23 (43%)	41 (51%)	16 (23%)	2 (25%)	38 (52%)
加固后使用	7 (19%)	24 (44%)	23 (28%)	29 (41%)	4 (50%)	16 (22%)
停止使用	13 (35%)	6 (11%)	14 (17%)	5 (7%)	2 (25%)	11 (15%)
立即拆除	11 (30%)	1 (2%)	3 (4%)	20 (29%)	0 (0%)	8 (11%)

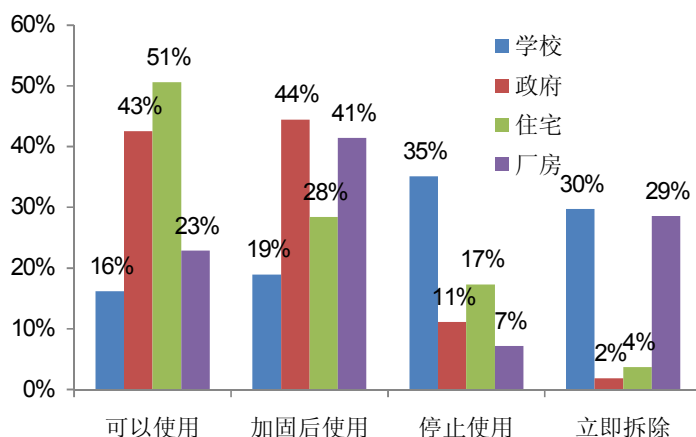


图 16 不同使用功能的建筑震害情况对比

## 5 结论和建议

通过对汶川地震的建筑震害调查, 得到以下经验和教训:

(1) 砌体结构的抗震性能需要严格的构造措施和施工质量给予保证, 包括合理设置钢筋混凝土构造柱和圈梁、预制楼板的有效拉结和搁置长度、或增加现浇层等, 最好采用现浇楼盖, 特别是应加强构造柱和承重墙的安全储备, 否则这种结构形式极易在地震中发生严重破坏。

(2) 在这次地震中, 框架结构的抗震性能表现基本较好, 若能保证施工质量, 框架结构可以实现预期的中震和大震抗震性能目标。但这次地震中框架结构的内外装饰饰面、围护结构、填充墙的破坏严重, 仍然造成了较大的生命和财产损失, 特别是给震后恢复重建和人们的心理造成很大影响, 需在今后的抗震设计中给予重视, 应重点加强围护结构和填充墙与主体框架结构的抗震构造措施的研究。

(3) 剪力墙结构 (包括框架-剪力墙结构和框架-筒体结构) 在这次地震中的表现优异, 这与其有较大的抗侧刚度有关。但是这次地震中, 剪力墙结构均位于烈度较低的地区, 其在大震下的抗震性能没有体现出来, 还需要进一步研究。尽管如此, 根据已获得的震害调查结果推断, 剪力墙结构在非结构构件的震害方面轻于框架结构, 是一种较好的抗震结构形式。

(4) 建筑抗震规范是保证建筑抗震能力的重要依据。本次地震建筑震害调查表明, 严格按照 89 版后抗震规范设计、并保证施工质量的建筑, 基本都保持较好的状态。但是, 本次地震的震害调查也表明, 仍然有许多问题值得进一步深入研究和改进, 特别是在管理制度、经济投入、概念设计和施工质量方法, 还需不断提高我国的整体抗震防灾的水平。

(5) 建筑抗震水平与经济水平密切相关。震害调查表明, 城市震害程度抵御乡镇, 新建建筑的震害低于早期建筑, 因此, 随着我国经济建设的发展, 在资金充裕的条件下, 应有限选择更有利于抗震的结构形式, 增加更多的抗震措施。

(6) 对工程建设的监督和管理仍需加强, 避免在设计和施工环节出现不符合抗震规范的建筑工程。在设计方面, 应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, 如构造柱和圈梁设置要求, 预制板的拉结要求, 最小配筋率和最小配箍率要求, 箍筋弯钩和箍筋间距要

求等。在施工方面,应严格保证工程材料质量、混凝土级配、钢筋构造措施的实现等,保证工程施工质量。对农村自建住宅政府组织专业技术人员应给予指导,合理设置抗震措施。

(7)对有些问题需进一步开展深入研究,如:①由于楼面作用大,框架结构的强柱弱梁机制很难做到,应对框架结构的强柱弱梁机制保证措施进一步研究;②填充墙有时可协助主体结构共同抗震,提高整体结构的抗震能力,有时由于填充墙开洞宜造成主体结构形成短柱剪切破坏,因此应加强填充墙对整体结构的抗震贡献和影响的研究,特别是应加强填充墙与主体结构抗震构造措施和性能化设计的研究,避免填充墙严重破坏;③进一步完善抗震构造措施,如最小配筋率、最小配箍率,以及箍筋最小直径和间距,并应积极推广连续螺旋箍筋技术的应用;④进一步重视结构整体牢固性和结构抗震体系的研究,提高整体结构抵御意外灾害的安全储备。

(8)加强各级政府、行政部门和普通群众的抗震防灾意识,做好抗震预防工作,特别是保证房屋建筑达到规定的抗震设防标准,以最大程度的减少因建筑物抗震能力不足倒塌破坏造成的人员伤亡。

清华大学土木工程结构专家组赴四川抗震救灾和进行建筑震害调查的人员:

宋二祥,钱稼茹,刘凤阁,叶列平,王元清,张天申,赵作周,刘彦生,荆建梅,陆新征,李青翔,经杰,任宝双,林磊,汤涵,祝磊,田野,施刚,冯鹏,方东平,安雪晖,潘鹏。

西南交通大学土木工程结构专家组成员:

赵世春,刘文日,黄云德,李力,张建经,潘家鼎,黄喜兵,孟鹏晖,李彤梅。

北京交通大学土木工程结构专家组成员:

杨庆山,卢明奇。

广州市房屋鉴定所等赴四川抗震救灾进行震后建筑安全检查人员:

张文广,何文中,曹书兵等

本文整理:叶列平,陆新征。李易博士协助震害资料的统计分析。

**致谢:**感谢四川省建设厅、绵阳市建设局和绵阳市房管局的支持和配合。

## 参考文献

- [1] TJ11-78, 工业与民用建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1979.
- [2] GBJ 11-89, 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1989.
- [3] GB50011-2001, 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2001.
- [4] BJJG21-66, 钢筋混凝土结构设计规范[S]. 北京:技术标准出版社, 1966.
- [5] TJ 10-74, 钢筋混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1974.
- [6] GBJ 10-89, 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 1989.
- [7] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.