

汶川地震

建筑震害分析及设计对策

编著

清华大学

西南交通大学

重庆大学

中国建筑西南设计研究院有限公司

北京市建筑设计研究院

中国建筑工业出版社

汶川地震建筑震害分析及设计对策

清华大学

西南交通大学

重庆大学

编著

中国建筑西南设计研究院有限公司

北京市建筑设计研究院

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

汶川地震建筑震害分析及设计对策/清华大学等编著.

北京:中国建筑工业出版社,2009

ISBN 978-7-112-11186-2

I. 汶… II. 清… III. 建筑物—震害—分析—汶

川县 IV. P315.9 P316.271.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 151515 号

本书由清华大学、西南交通大学、重庆大学、中国建筑西南设计研究院有限公司和北京市建筑设计研究院联合编写。按结构形式分类,包括砌体-木屋架建筑、砖混建筑、钢筋混凝土-砌体混合建筑、钢筋混凝土框架建筑、框架-剪力墙建筑、单层工业厂房、大跨钢结构、特种结构、其他震害和文物建筑等,从震害特征、典型案例、震害分析等方面对汶川地震中各种建筑的表现进行详细展现和剖析,在此基础上提出相应的设计对策。本书适合结构工程设计人员、结构抗震研究人员及结构专业高校师生使用。

* * *

责任编辑:赵梦梅 李天虹

责任设计:赵明霞

责任校对:刘 钰 兰曼利

2.

汶川地震建筑震害分析及设计对策

清华大学

西南交通大学

重庆大学

编著

中国建筑西南设计研究院有限公司

北京市建筑设计研究院

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京蓝海印刷有限公司印刷

*

开本:880×1230毫米 1/16 印张:18¼ 字数:585千字

2009年10月第一版 2009年10月第一次印刷

定价:49.00元

ISBN 978-7-112-11186-2

(18502)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

编写分工:

第一章	叶列平	钱稼茹						
第二章	胡鉅文							
第三章	赵作周							
第四章	赵世春	李 力	刘艳辉					
第五章	李英民	刘立平						
第六章	叶列平	赵作周	潘 鹏	苗启松	冯 远	冯 鹏	陆新征	
第七章	刘宜丰	冯 远	肖克艰					
第八章	李英民	刘建伟						
第九章	苗启松	赵作周						
第十章	刘宜丰	冯 远	肖克艰					
第十一章	刘宜丰	苗启松						
第十二章	赵世春	余志祥						

审核: 钱稼茹

为本书提供资料的有: 王元清、吴小宾、安雪晖、经杰、林磊、曹书兵、祝磊、田野, 在此深表感谢。感谢地震灾区协助开展震害调查和提供资料的各县市建设厅局的有关领导和有关人员。

致谢:

国家科技支撑计划项目 2009BAJ28B01

国家自然科学基金重大研究计划重点项目资助 90815025

中国工程院紧急项目: 我国抗灾救灾能力建设和灾后重建策略研究

住房和城乡建设部工程质量安全监督与行业发展司专题项目: 汶川地震房屋建筑和市政基础设施工程典型震害分析

国家科技支撑计划课题 2006BAJ03A02

序

2008年5月12日四川省汶川县发生8.0级特大地震,波及四川、甘肃、陕西等10个省市,近50万平方千米面积受灾,遇难和失踪人数分别近7万和1.8万,对全社会造成巨大冲击。温家宝总理提出,我们要“收集这次地震中倒塌的重要公共建筑,包括学校、医院、机关等的建筑资料,从这次地震灾害中总结经验,为日后重建提供科学依据”。

汶川地震造成数百万间房屋倒塌,其中主要是砌体-木屋架建筑和砖混建筑,还有钢筋混凝土框架建筑。房屋倒塌是造成人员伤亡的最主要原因。提高房屋建筑的抗地震倒塌能力、避免特大地震下房屋建筑整体倒塌或快速倒塌,已成为建筑结构抗震设计亟需解决的课题,其中尤为重要的是加强建筑结构的整体牢固性,即地震作用下结构发生局部破坏或损伤时,应具有不会引发“多米诺骨牌”似的大范围连续倒塌的能力。

本书由清华大学、西南交通大学、重庆大学、中国建筑西南设计研究院有限公司和北京市建筑设计研究院的有关人员联合编写完成,编写人员曾在汶川地震后的第一时间到达灾区参与抗震救灾并进行震害调查,此后又多次深入灾区,考察和收集各类建筑的震害,开展深入的震害分析和计算模拟。在这些工作的基础上,编写成本书。书中重点总结了砖混建筑、钢筋混凝土框架建筑和工业厂房的震害特征;针对地震灾区不同类型的房屋建筑,选取典型案例进行分析;提出了不同类型建筑抗地震倒塌的设计建议。这些叙述和建议定将有助于人们更全面地从汶川地震的震害中吸取经验教训,对于今后制定地震作用下房屋建筑的抗倒塌设计标准以及工程设计人员从事建筑的安全性设计均具有重要参考价值。

我国是一个多地震国家,20世纪以来共发生6级以上地震800余次。20世纪,全球大陆35%的7.0级以上的地震发生在我国;全球发生3次8.5级以上的特大地震,其中两次在我国。20世纪全球死于地震的人数120万,我国占59万人,接近一半。20世纪全球发生两次超过20万人死亡的特大地震也都在我国,即1920年的宁夏海原地震和1976年的河北唐山地震,死亡人数分别超过23万和24万。自1949年建国至汶川地震前,我国地震死亡为各种自然灾害死亡人数总和的54%,超过半数。

由于地震发生的具体时间、具体地域和震级大小均很难预测,按当前的科学水平,也很难在可预见的将来做出可靠的地震预报。为了尽量减轻地震造成的损失,目前能够采取的最现实和有效的途径,只能是通过设计和施工使建筑物与各种重要基础设施具有足够的抗震能力。对于房屋建筑,可通过采用规则的建筑形体、规则的结构布置和适当的抗震构造措施,在仅增加少量造价的前提下,提高建筑物的抗震能力,防止强震作用下房屋建筑倒塌,或不至于粉碎性倒塌以提供一定的生存空间,或不至于很快倒塌以提供足够的逃生时间。万一遭遇不可预见的特大地震,也能将倒塌的房屋数量和生命财产损失降到最低,将被动救灾的费用降到最少。以上这些对于建筑物的抗震来说,似乎要比只是死板地根据“设防烈度”进行设计更为重要。

我国房屋建筑的抗震设防目标是“小震不坏,中震可修,大震不倒”。一个地区的“中震”即设防烈度,是由国家颁布的有关文件确定的;所谓“大震”也就是比设防烈度高1度,仍属于国家规定的量值范畴而不是难以预估的重大不测之灾。地震的最大特点是其复杂性,正确地规定一个地区的设防烈度,除了考虑当地历史上曾有过的地震大小外,还要照顾到当地的经济条件、人口密度、震害后果等多种因素。历史经验表明,房屋建筑完全可能遭遇比设防烈度对应的大震更大的地震袭击。1966年邢台地震,此前按7度设防,实际遭遇10度;1975年海城地震,此前按6度设防,实际遭遇9~11度;1976年唐山地震,此前也按6度设防,实际11度;2008年汶川地震,此前按7度设防的地区实际遭遇9~11度(都江堰市、青川县等9度,龙门山镇等10度,映秀、北川等11度)。国外也有类似情况,1995年日本阪神发生7.2级地震,当地设计大震的地面运动加速度为400gal,实际最大加速度达818gal。所以,房屋建筑的抗震设计必须考虑到万一遭到比当地“大震”更大的地震袭击,发生严重破坏的情况下不倒塌,这才是一种明智的减灾策略。对于砌体-木屋架建筑和砖混建筑,加强整体牢固性,是实现这个目标的重要手段;对于钢筋混凝土框架建筑,可以采用多种技术措施,提高其抗倒塌能力。采用隔震、消能等减震技术,也是房屋建筑抗倒塌的有效途径,并有可能使建筑物保持完好,无损其正常使用功能。

我国因地震死亡的人数远超其他国家。其原因除了我国人口众多和农村建筑事实上并无抗震设防的强制要求外,主要在于对地震预防的认识不足和措施不力。一般来说,地方行政领导在各种灾害发生后,能够全力动员各种力量轰轰烈烈地进行抢险救灾,但对将来可能遭受的地震则较少关心。可能因为前者人人都能看到,关乎政绩;而对于后者,在短短的三五年任期内,发生地震的概率实在太低;如果像有的国家那样,对于可能发生大震的城市进行不定期的群众性演习以提高人们对地震灾害的警惕,这在我国又会引起人心惶惶不利于社会稳定的顾虑。

对地震预防的措施不足,还反映在我国的建筑抗震设计标准跟不上社会经济发展和对民生的更加重视而与时俱进。改革开放以来,我国的经济快速发展,物资丰富,重视民生,住房和室内财产都已基本私有。因此,国家规定的设计标准和要求,理应回归到保障民生“最低限度要求”的地位。至于一个建筑物应该有怎样的抗震标准和要求,可以由设计人员根据业主的具体需要共同商定。按规范的最低要求进行抗震设计,无疑会损失工程建筑质量并埋下隐患。不过形成这样的局面也不能归咎于设计人员,因为建设部和国家计委1989年发布的《新建工程抗震设防暂行规定》明确提出:“各部门、团体和个人不得随意提高或降低”规定的设防烈度。这一规定“暂行”到今天仍未见明文废除。如果设计人只能按强制规定的设防烈度设计,而业主要求更高的安全标准不被允许,万一发生强度超过设防烈度的地震,个人房产损失了,“暂行规定”的主管和制定部门是否从法律和道义上都应承担責任?令人百思不得其解的是,规范的主管部门总是不肯明示规范的规定是最低要求,业主和设计人员应按照工程的实际情况和需要,决定是否按高于规范的标准进行设计。

设防烈度的制定部门和规范的制定部门可能会辩称,他们制定的设防要求还是合适或基本合适的。但问题在于“中震可修,大震不倒”都是比较模糊的概念。所谓“不倒”是一个都不能倒,还是允许少到多大比例就可算不倒?房子已经塌了,是施工质量问题、设计问题或是规范对抗震能力的低标准

问题，往往很难说清楚。作为相关单位，除非牵涉的问题实在太而难以掩饰，则为维护本部门的权威或声誉，不免自以为正确。可是无法否认的事实是，我国按规范要求正规设计的建筑物，地震作用下的倒塌比例大于日本、美国等发达国家。即使有施工质量缺陷的原因，可是设计规范的主管部门在制定安全标准和要求时，是否就可以完全不考虑在当今社会和经济的转型期所产生的管理上的欠缺，还有现场施工的广大工人其实是农民兄弟。

在总结汶川地震灾害的经验和进行灾后重建的同时，我们也许要花同样的精力，以前车之鉴关注我国其他地区今后可能发生的大震，并有计划有步骤地在政策、管理和设防标准上做好预防工作。

国外的“Discovery”电视频道曾放映专业人士完成的一部片子，模拟美国纽约遭受大震的惨状。我们的政府部门是否也可赞助设立一个研究项目，模拟现在的北京如果重遇1679年康熙统治时曾遭受过的那样8级特大地震会成为什么样子？类似CCTV那样花了巨额费用建成的病态怪楼又会变成怎样？据记载：那次大地震的震中离北京城中心仅40千米，城垣损毁无数，宫殿民居十倒八九。这个问题或许并非妄想，因为上次特大地震距今已300多年，谁也无法证明地震能量的积累不可能再次爆发。这种科学的形象模拟情景或许可以提高我们和决策领导部门对地震预防重要性的认识，能够更多地着眼未来，不囿于眼前个人和部门的得失。对待地震应像对待疾病一样重在预防。当然，预防和救灾两者都要做好，不能偏废。

清华大学土木工程系教授

陈肇元

2009年6月

目 录

第一章 汶川地震概况	1
第一节 概况	1
第二节 汶川地震成因	4
第三节 地震烈度	8
第二章 地质灾害	11
第一节 概述	11
第二节 地震发生的地质构造背景	11
一、龙门山前山(主边界)断裂	12
二、龙门山主中央断裂	14
三、龙门山后山断裂	15
第三节 典型地质灾害实例	15
一、北川县唐家山高速滑坡堵江及堰塞坝(湖)	15
二、北川县城王寨岩滑坡	21
三、北川县城茅坝中学岩质崩塌	23
四、唐家山堰塞坝上游侧大水沟泥石流堵江	23
五、都江堰二王庙滑坡变形体	23
六、卧龙大熊猫保护中心崩塌、坍塌	24
第三章 砌体-木屋架建筑	26
第一节 震害特征	26
一、墙体严重开裂破坏、坍塌, 建筑整体倒塌	26
二、纵横墙连接或靠近连接处出现裂缝, 墙体脱开、外闪或倒塌	32
三、结构整体布置不合理造成震害	33
四、围护墙破坏、倒塌	34
五、木屋架平面向外歪斜、倒塌、屋盖移位	34
第二节 成功案例分析	35
第三节 设计建议	38
第四章 砖混建筑	40
第一节 震害特征	40

一、墙体破坏、倒塌	40
二、圈梁与构造柱	46
三、连接构造问题引起的震害	50
四、倒塌破坏	51
第二节 典型震害案例与分析	53
一、西南交通大学峨眉校区单身宿舍楼	53
二、绵阳市砖混住宅(一)	56
三、绵阳市砖混住宅(二)	61
四、绵阳市砖混住宅(三)	67
五、都江堰市某住宅	72
六、都江堰地区某砖混教学楼	77
七、工程案例分析结论	81
第三节 设计建议	81
第五章 钢筋混凝土-砌体混合建筑	82
第一节 震害特征	83
一、底部框架-砌体建筑震害	83
二、多层内框架建筑震害	85
三、其他钢筋混凝土-砌体混合建筑震害	86
第二节 典型案例	87
一、底部框架-砌体建筑	87
二、多层内框架建筑	97
三、局部框架-砌体建筑(一)	98
四、局部框架-砌体建筑(二)	99
第三节 震害分析	100
一、汉旺某小区 2 幢底部框架-砌体建筑震害分析	100
二、钢筋混凝土-砌体混合建筑与砌体建筑抗震性能对比分析	103
三、罕遇地震下底框上下层刚度比对底部框架-砌体建筑抗震性能的影响	108
四、小结	110
第四节 设计建议	110
第六章 钢筋混凝土框架建筑	111
第一节 震害特征	111
一、填充墙开裂、破坏、倒塌	111
二、填充墙造成短柱剪切破坏	115
三、错层和楼梯造成同层柱长短不一, 较短柱破坏	117
四、填充墙沿高度不连续造成薄弱层破坏或倒塌	120
五、填充墙平面布置不均匀造成结构扭转震害	123
六、同层框架柱抗侧刚度不等造成破坏	125
七、柱端形成塑性铰	125

八、框架柱剪切破坏	129
九、梁柱节点区破坏	131
十、楼梯破坏	134
第二节 成功案例	136
一、剑南春大酒店	136
二、红白镇新农村自建房	138
第三节 典型案例	140
一、渡口中学的框架结构	140
二、都江堰之春1号楼	154
三、中国银行都江堰支行办公楼	162
四、都江堰某异形柱框架结构住宅楼	164
五、都江堰某商住楼	166
第四节 震害分析	171
一、概述	171
二、与填充墙有关的震害分析	172
三、柱端形成塑性铰，未实现“强柱弱梁”屈服机制	173
四、楼梯震害分析与措施	182
第五节 设计建议	188
一、结构方案	188
二、填充墙	189
三、强柱弱梁屈服机制	189
四、柱剪切破坏	189
五、节点区	189
六、楼梯	190

第七章 框架-剪力墙建筑

第一节 震害特征	192
一、连梁破坏	192
二、剪力墙墙肢剪切破坏或边缘构件混凝土压碎、纵筋压屈	195
三、墙体沿施工缝滑移错动，墙体竖向钢筋剪断	197
四、框剪建筑中的梁柱破坏程度轻	198
五、围护墙和填充墙破坏	198
第二节 典型案例及震害分析	200
一、案例一	200
二、案例二	202
三、震害分析	205
第三节 设计建议	211

第八章 单层工业厂房

第一节 震害特征	213
----------------	-----

一、屋面体系	213
二、围护结构	215
三、支撑系统	217
四、柱	217
五、吊车及吊车梁	219
六、工作平台	219
七、地基基础	220
八、伸缩缝	220
第二节 典型震害	221
一、极震区典型震害	221
二、高烈度区典型震害	222
三、中低烈度区典型震害	225
第三节 钢筋混凝土排架柱单层工业厂房震害分析	225
一、屋面体系震害分析	225
二、钢筋混凝土变截面柱震害分析	227
三、围护结构震害分析	228
四、支撑系统震害分析	229
第四节 设计建议	229
第九章 大跨钢结构	230
第一节 震害特征	230
一、支座杆件破坏	231
二、支座破坏	231
三、系杆及支撑破坏	232
第二节 案例分析	232
一、绵阳九洲体育馆	232
二、绵阳市科技城管委会办公楼	236
三、锦州大剧院	240
四、绵阳科技馆	242
五、绵阳机场候机厅	242
六、支座及支座杆件地震作用分析	244
第三节 设计建议	246
第十章 特种结构	247
第一节 震害特征	247
一、砖烟囱	247
二、钢筋混凝土烟囱	248
三、钢筋混凝土水塔	249
四、砖砌筒体水塔	249
五、其他特种结构	249

第二节 震害分析	251
第三节 设计建议	252
第十一章 其他震害	253
第一节 震害特征及分析	253
一、防震缝	253
二、突出屋面附属结构物	255
三、其他震害	261
第二节 设计建议	265
一、防震缝	265
二、突出屋面附属结构物	266
三、其他	266
第十二章 文物建筑	267
第一节 概述	267
第二节 典型建筑震害现象及分析	267
一、黄帝殿	267
二、居士楼	270
三、上清宫山门	273
四、老君阁塔楼	277

第一章 汶川地震概况

第一节 概 况

2008年5月12日14时28分,在我国四川省汶川县发生里氏8.0级特大地震,震中位于汶川县映秀镇(纬度 31.0°N 、经度 103.4°E),震源深度14km(见图1.1),震中烈度达11度。图1.2、图1.3分别为绵竹市汉旺镇的地标和汶川威州的钟楼,时钟的指针停留在14时28分。



图 1.1 新华社5月18日将汶川地震震级由7.8级修订为8.0级
(来源:中国新华网)



图 1.2 绵竹市汉旺镇钟楼指针停留在14时28分



图 1.3 汶川威州某钟楼指针停留在14时28分

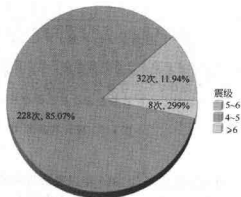


图 1.4 截至2008年10月9日12时余震震级统计图
(来源:中国地震信息网)

根据我国地震专家对我国大陆地区地震资料的分析,确认汶川地震属于主余震型。根据国家汶川地震专家委员会发布的统计数据,截至2008年9月4日12时,也就是在地震后112天内,我国地震台网记录到27784次余震,其中6.0级以上余震8次,5.0~5.9级余震32次,4.0~4.9级余震228次,最大余震6.4级,5月25日下午发生在青川。7月24日,青川一带发生了5.6、6.0和6.1级较强余震,造成十余人伤亡。余震主要分布在从映秀镇到青川县的龙门山断裂带的中北段,形成长达300km的余震带。图1.4为截至2008年10月9日12时余震震级统计图,图1.5为4.0级及以上余震分布图,图1.6为5.0级及以上余震时间序列图。

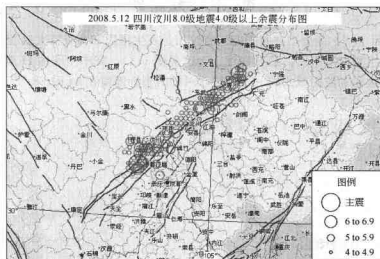


图 1.5 截至2008年10月9日12时4.0级及以上余震分布图

(来源:中国地震信息网)

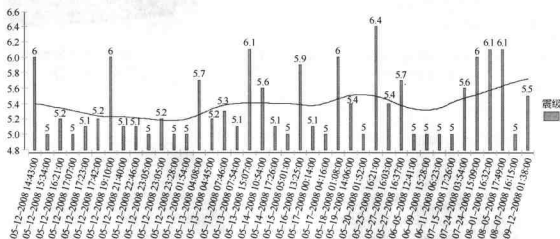


图 1.6 截至2008年10月9日12时5.0级及以上余震时间序列图

(来源:中国地震信息网)

汶川地震是我国自1949年以来最为强烈的一次地震,严重受灾地区达10万 km^2 ,包括震中50km范围内的县城和200km范围内的大中城市。宁夏、青海、甘肃、河南、山西、陕西、山东、云南、湖南、湖北、重庆、北京、上海等多个省市有明显震感。图1.7为北京市民纷纷涌到大街上躲避。图1.8为汶川地震波及全国的范围。泰国首都曼谷,越南首都河内,菲律宾、日本等地也有震感。



图 1.7 北京高楼震感明显，人们纷纷涌到大街上躲避

(来源：中国新华网)

根据国务院抗震救灾总指挥部发布的消息，截至 2008 年 9 月 4 日 12 时，汶川地震已确认 69226 人遇难，17923 人失踪，374643 人受伤，抢险救灾人员已累计解救和转移 1486407 人，因地震受伤住院治疗累计 96544 人（不包括灾区病员人数），已出院 93095 人，共救治伤病员 4106795 人次。图 1.9 为四川地震灾区罹难人数分布。



图 1.8 汶川地震震感强烈地区和有感省份

(来源：中国地震台网中心)

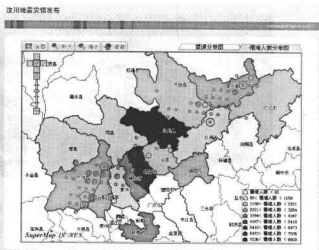


图 1.9 地震灾区罹难人数分布

(来源: <http://www.supermap.com.cn>)

根据国家汶川地震专家委员会估计，汶川地震财产损失达到 8451 亿元人民币，其中四川为 91.3%，甘肃为 5.8%，陕西为 2.9%。在这些损失中，民房和城市居民住房的损失占总损失的 27.4%，学校、医院和其他非住宅用房的损失占总损失的 20.4%，道路、桥梁和其他城市基础设施的损失占总损失的 21.9%。70% 以上的损失是由建设工程设施破坏造成的。可见，提高建设工程设施的抗震能力是防震减灾的关键。

汶川地震还引发了大量的滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害。初步统计，地质灾害多达 12000 多处，潜在隐患点近 8700 处，有危险的堰塞湖 30 多座。

图 1.10 为 5 月 14 日新华网公布的地震后距震中最近的汶川县映秀镇航拍照片。图 1.11 为地震前的北川和地震后的北川。



图 1.10 地震后汶川县映秀镇航拍照片
(新华社记者陈凯 摄)

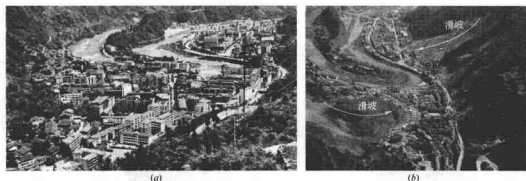


图 1.11 地震前后的北川
(a)地震前; (b)地震后

第二节 汶川地震成因

根据板块构造学说,地壳由若干各板块构成,全球较大的板块有六块(图 1.12),即:欧亚板块、美洲板块、非洲板块、太平洋板块、印度板块和南极洲板块。受到张力、压力、重力和地幔对流的作用,板块以每年数厘米的速度缓慢移动。大部分地震、火山和造山运动都是由于相邻板块之间的相互作用发生的。

印度板块和欧亚板块曾经是分离的。印度板块一直在向北移动,挤压欧亚板块(图 1.13),逐渐形成了青藏高原,这一过程从来没有停止过。图 1.14 为我国的长期地表位移情况。我国的很多地震,都起因于印度板块对欧亚板块的碰撞、挤压。我国的地震活动主要分布在五个地区的 23 条地震带上,图 1.15 为我国地震带分布图。图 1.16 显示了我国的潜在地震区域,红色越深,地震发生的危险性越大。图 1.17 为我国历史地震震中分布图。“5·12”汶川地震的龙门山断裂带位于四川西部地震带上。