



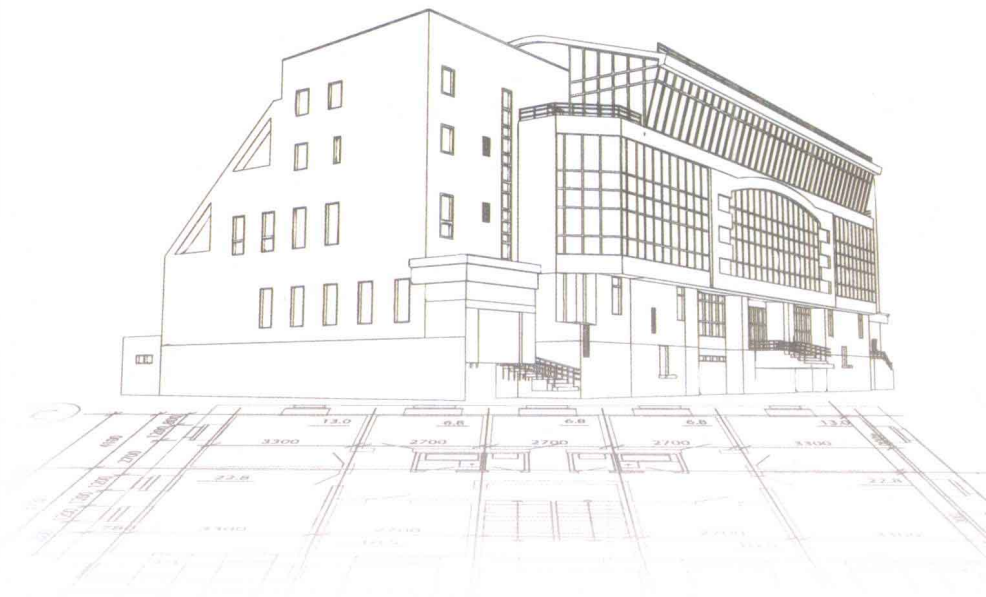
“十二五”高等教育规划教材

JIANZHU
JIEGOU KANGZHEN



建筑结构抗震

主编 申 钢 杜瑞锋



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

“十二五” 高等教育规划教材

建筑结构抗震

主 编	申 钢	杜瑞锋		
副 主 编	郭海青	段丽萍		
主 审	李永光	郝丽卿		
参编人员	高雅琨	李 婕	张 园	
	吴俊臣	徐 蓉		

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

前 言

目前,我国高等教育发展显示出迅速、稳健的步伐,随着本世纪我国城市化发展的大趋势,土木建筑行业对人才的需求还将持续增加。为了满足相关高等院校培养人才的教学需求,结合《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)新规范的颁布,作为建筑工程技术等专业的一门主干专业课,《建筑结构抗震》课程的内容必须重新修订,以反映近年来我国及国际建筑抗震工程中新技术的发展。本书也可作为土木工程设计、施工技术人员学习新规范的参考书。

为培养学生毕业后参与施工实践及设计工作,在内容上涉及地震震害图片、相关规范条文,并加以解释,重点强调抗震概念设计和抗震构造措施,淡化抗震验算过程。全书共分十章,分别为绪论、地震基本知识、抗震设防与概念设计、地基和基础的抗震设计、地震作用与结构抗震验算、多层砌体房屋抗震设计、多高层钢筋混凝土房屋抗震设计、多高层钢结构房屋抗震设计、单层厂房抗震设计、隔震与消能减震设计、地下建筑抗震设计。各章均给出了学习目标、能力目标的教学要求,并配有实训题。

本书由申钢、杜瑞锋主编,郭海青、段丽萍任副主编。其中,绪论由申钢编写,第四章由申钢、张园编写,第一、八章由高雅琨编写,第二、三章由李婕编写,第五章由郭海青、徐蓉编写,第六、九章由杜瑞锋编写,第七章由吴俊臣编写,第十章由段丽萍编写。全书由申钢统稿,本书由李永光教授、内蒙古电力勘测设计院郝丽卿高级工程师主审。

在编写本书时,参考和引用了公开发表的一些文献和资料,谨向这些作者表示感谢。

由于编者的水平有限,书中不当或错误之处,敬请读者批评指正。随时给我们提出宝贵的意见,以便进一步对本教材进行修订、完善。

目 录

绪论	1
一、抗震设防的意义	1
二、汶川地震的经验和教训	5
三、学习抗震设防知识的必要性	10
第一章 地震基本知识	13
第一节 构造地震	13
一、地震的成因及类型	13
二、地震术语	15
三、地震序列	16
第二节 地震波、震级和地震烈度	17
一、地震波	17
二、震级	18
三、地震烈度	18
第三节 地震震害	21
一、地表破坏	21
二、建筑物的破坏	22
三、次生灾害	24
思考题	25
实训题	25
第二章 抗震设防与概念设计	26
第一节 抗震设防的基本概念	26
一、地震基本烈度	27
二、抗震设防烈度	27
三、设计基本地震加速度	27
四、设计特征周期	28
五、设计地震分组	28
第二节 抗震设防目标和标准	28
一、建筑抗震设防目标	28
二、建筑抗震设计方法	29
三、建筑抗震设防类别	29
四、建筑抗震设防标准	29
第三节 抗震概念设计	30

一、选择对抗震有利的场地、地基和基础	30
二、选择有利于抗震的建筑体形和结构布置形式	31
三、选择合适的抗震结构体系	37
四、处理好非结构构件与主体结构的关系	39
五、合理选用材料, 保证施工质量	39
六、建筑抗震性能化设计	40
思考题	42
实训题	42
第三章 地基和基础的抗震设计	45
第一节 建筑场地	45
一、场地	45
二、场地类别	46
三、场地的卓越周期	49
第二节 地基和基础的抗震设计	50
一、可不进行地基基础抗震验算的范围	50
二、天然地基抗震承载力验算	50
三、桩基的抗震验算	52
四、地基基础的抗震措施	53
第三节 可液化地基和抗液化措施	54
一、液化的概念	54
二、液化的危害	55
三、影响液化的因素	55
四、地基土的液化判别	56
五、液化地基的评价	58
六、地基抗液化措施	59
思考题	60
实训题	60
第四章 地震作用与结构抗震验算	62
第一节 地震作用	62
一、地震作用的概念	62
二、确定地震作用的方法	63
三、地震作用的分类	63
四、水平地震作用与风荷载的区别	63
第二节 地震作用的计算	64
一、动力计算简图	64
二、水平地震作用的计算——底部剪力法	64
三、水平地震作用的计算——振型分解反应谱法	74
四、竖向地震作用的计算	75
第三节 地震作用计算的一般规定	77

一、各类建筑结构地震作用的一般规定	77
二、各类建筑结构抗震计算方法	77
第四节 结构抗震验算	78
一、结构抗震验算的原则和方法	78
二、结构构件的截面抗震验算	78
三、结构构件的抗震变形验算	80
思考题	82
实训题	82
第五章 多层砌体房屋抗震设计	84
第一节 震害分析	85
一、多层砌体房屋的震害及其分析	85
二、震害原因划分	89
第二节 建筑布置与结构选型	89
一、限制房屋的层数和高度	90
二、限制房屋的层高及高宽比	91
三、控制抗震横墙的最大间距和房屋局部尺寸	91
四、合理布置多层砌体房屋的建筑平面和结构体系	92
第三节 多层砌体房屋抗震验算	92
一、计算原则与计算简图	92
二、地震作用与楼层地震剪力	93
三、楼层地震剪力的分配	94
四、结构抗震承载力验算	98
第四节 多层砌体房屋抗震构造措施	100
一、多层砖砌体房屋抗震构造措施	100
二、多层砌块房屋抗震构造措施	109
第五节 底部框架—抗震墙砌体房屋抗震设计要点	111
一、一般规定	111
二、计算要点	112
三、抗震构造措施	113
思考题	116
实训题	116
第六章 多高层钢筋混凝土房屋抗震设计	118
第一节 框架结构房屋震害分析	119
一、震害分析	119
二、结构主体的震害	119
三、填充墙的震害	121
第二节 框架结构房屋抗震设计的一般规定	121
一、房屋的最大适用高度	122
二、房屋的最大高宽比	122

三、钢筋混凝土框架结构的抗震等级	122
四、防震缝的设置	123
五、建筑造型与结构布置的问题	124
六、材料要求	125
第三节 框架结构的内力计算、组合与调整	126
一、框架结构的荷载	126
二、框架结构的内力计算	126
三、框架结构内力组合和调整	133
第四节 框架结构的抗震验算	137
一、框架梁	137
二、框架柱	138
三、框架节点核芯区	139
第五节 框架的抗震构造措施	141
一、框架梁	141
二、框架柱	143
三、节点核心区	146
四、柱体积配箍率	146
第六节 抗震墙结构抗震设计	146
一、抗震墙结构特点	146
二、结构布置原则	147
三、截面设计要求和抗震构造措施	148
第七节 框架—抗震墙结构抗震设计	153
一、框架—抗震墙结构特点和震害分析	153
二、结构布置原则	155
三、截面设计要点和抗震构造措施	156
思考题	158
实训题	158
第七章 多高层钢结构房屋抗震设计	160
第一节 多高层钢结构房屋主要震害特征	160
一、震害分析	160
二、震害原因探讨	163
第二节 多高层钢结构房屋的选型与结构布置	164
一、多高层钢结构房屋受力特点与适用范围	164
二、多层和高层钢结构房屋的结构布置	167
第三节 多高层钢结构房屋的抗震计算	171
一、抗震设计的验算内容以及作用效应的组合方法	171
二、计算模型及有关参数的选取	172
三、钢结构在地震作用下的内力调整	173
四、结构在地震作用下的变形验算	174

第四节 多高层钢结构房屋的抗震构造措施·····	174
一、钢框架结构抗震构造措施·····	174
二、钢框架—支撑结构抗震构造措施·····	180
思考题·····	182
实训题·····	183
第八章 单层厂房抗震设计·····	184
第一节 震害特征·····	184
一、单层钢筋混凝土柱厂房·····	184
二、单层钢结构厂房·····	186
三、单层砖柱厂房·····	187
第二节 抗震构造措施·····	187
一、钢筋混凝土柱厂房·····	187
二、钢结构厂房·····	190
三、砖柱厂房·····	190
思考题·····	191
实训题·····	191
第九章 隔震与消能减震设计·····	192
第一节 基本概述·····	192
第二节 隔震与消能减震建筑设计的一般规定·····	195
第三节 隔震房屋设计要点·····	195
一、隔震技术设计要求·····	197
二、隔震结构的构造要求·····	199
第四节 消能减震房屋设计要点·····	200
一、消能减震技术设计要求·····	202
二、消能部件的要求·····	203
三、主体结构的抗震构造要求的调整·····	204
思考题·····	204
实训题·····	204
第十章 地下建筑抗震设计·····	205
第一节 地下建筑的震害特点·····	206
一、我国地下建筑地震震害·····	206
二、国外地下建筑地震震害·····	207
第二节 地下建筑抗震设计的基本要求·····	208
一、适用范围·····	208
二、地下建筑的建造场地·····	208
三、地下建筑的抗震设防目标·····	209
四、地下建筑的规则性及优化选型·····	209
第三节 地下建筑抗震计算的要点·····	209
一、可不进行抗震计算分析的地下建筑的范围·····	210

二、地下建筑结构的抗震计算模型和相应的计算方法	210
三、计算范围和边界条件	210
四、地震作用的方向	210
五、地震作用的取值	211
六、地下建筑结构抗震计算的方法	211
第四节 地下建筑抗震验算方法简介	211
一、地下建筑抗震分析方法	212
二、地下建筑抗震验算	213
第五节 地下建筑的抗震构造措施	214
一、地下建筑的抗震构造措施	214
二、提高地下结构抗震承载能力的主要措施	215
思考题	215
实训题	215
附表 我国华北地区主要城镇抗震设防烈度、设计基本地震 加速度和设计地震分组	216
参考文献	220

绪 论

知识目标

了解抗震设防的意义，熟悉近年来国内数次大地震的特点和地震对建筑物的破坏及人员伤亡情况，了解学习抗震设防知识的必要性。

能力目标

了解房屋结构抗震学科的发展概况，提高抗震设防意识。

一、抗震设防的意义

1. 大地震给人们的启迪

我国是一个多地震国家，历史上曾发生过多次强烈地震，近几十年来更是地震频繁，且在人口稠密的大城市和工业区不断发生。1976年7月28日，北京时间凌晨3时42分，在人口达百余万的工业城市唐山市，发生了里氏7.8级的强烈地震。震中位置在市区东南，震源深度约11千米，有明显的地震断裂带贯通全市，如图0-1所示。市区大部陷入地震烈度高达11度的极震区，房屋建筑普遍倒塌（如图0-2、图0-3），幸存无恙者甚少。震害遍布唐山外围十余县，波及百余公里外的北京、天津等重要城市。死亡24万余人，伤残16万人之多，灾情之重，为世界地震史上所罕见。



图0-1 唐山地震的地裂缝



图0-2 唐山地震倒塌的开滦煤矿医院



图 0-3 唐山地震倒塌的砖混结构办公楼

与历史上其他大地震一样，唐山地震以其特点和血的教训，给人们增添了新的认识和启迪，即抗震设防工作是减轻地震灾害最有效、最根本的措施。

当年唐山是对地震没有设防的城市，尽管大量建筑是近代兴建的，但都没有经过抗震设计，以致酿成大灾。这个失误主要来自对唐山地区的地震危险估计不足，有人统计了世界上 130 多次伤亡巨大的地震震害资料，95% 以上的伤亡是因为无抗震设防的建筑物倒塌而造成的。这些都表明：建筑物抗震能力差是造成地震伤亡和损失的主要原因。

反之，如果在工程设计上采取抗震

设防措施，预防在意外高烈度下的建筑物倒塌，是能够抵御地震灾害袭击的。例如：1923 年日本东京发生里氏 8.2 级特大地震，700 多栋经过抗震设计的大楼，震后 75% 完好无损，23% 有不同程度的破坏，只有 2% 全部震毁。1935 年智利康塞普森地震，使该城市变为一片废墟，1939 年该地又发生地震，死亡 4 万人。人们接受教训，以法律形式规定，地震区所有建筑必须进行抗震设防。当 1960 年又发生特大地震时，这些经过抗震设防的房屋，大多完好无损，只有 500 人死亡。

国内多次抗震的实践，也都证明了对新建工程进行抗震设防是减轻地震灾害的一项根本性措施。例如：1981 年河北邢台发生里氏 6 级地震，没有一间屋房倒塌，也没有一人死亡。主要原因是该地区吸取了在 1966 年河北邢台发生 6.8 级地震中倒塌 119 万多间房屋的惨痛教训，在重建家园和村镇规划中采取了抗震措施，因此，当 15 年后再次遭遇地震时，建筑物几乎没有遭到破坏。在我国历史上，一次里氏 6 级左右的地震发生在人口密集农村而没有遭受破坏，是前所未有的。相反，在震后恢复重建中，不考虑抗震设防再次遭遇地震，又同样遭受破坏的事例屡见不鲜。例如：1974 年江苏溧阳发生里氏 5.6 级地震，全县倒塌和震毁近 8 万间房屋，震后不少房屋重建或原样修复。5 年后，1979 年原震中又发生里氏 6 级地震，又使 34 万多间房屋倒塌和震毁，特别是上次地震破坏的房屋，经原样修复后这次又原样破坏。

抗震设防除了对新建建筑物进行抗震设计外，还包括对未设防的原有建筑进行抗震加固。经过抗震加固的工程，在近几年内发生的地震中有的已经经受了考验，证明抗震加固与不加固大不一样。例如：天津发电设备厂，在唐山大地震前，用了四十多吨钢材，加固了全厂 54 栋主要建筑，地震时没有一个车间倒塌，没有一榀屋架塌落，保障了设备完好无损，震后 3 天就恢复了生产。相邻的天津重机厂震前没有加固，地震时遭到严重破坏，停产半年，修复加固时，还用了七百多吨钢材。这也充分说明：抗震设防是一项重要的减灾措施。

地震是一种突发性的自然灾害，尽管目前在科学技术上还不能控制地震的发生。但是，上述事实充分证明：预防和减轻地震灾害是可行的。

2. 人类在抗震史上的贡献

(1) 候风地动仪，如图 0-4 所示。人类为了生存和发展，在与地震灾害的斗争中，积

累了丰富的经验。例如：为了准确地测试地震的方位、烈度，我国东汉科学家张衡发明了地动仪，地动仪以精铜铸造而成，圆径达八尺，外形像个酒樽，机关装在樽内，如图 0-5 所示。外面在东、西、南、北、东北、东南、西南和西北八个方位各设置一条龙，每条龙嘴里含有一个小铜球，地上对准龙嘴各蹲着一个铜蛤蟆，昂头张口。当任何一个方位的地方发生了较强的地震时，传来的地震波会使樽内相应的机关发生变动，从而触动龙头的杠杆，使处在那个方位的龙嘴张开，龙嘴里含着的小铜球自然落到地上的蛤蟆嘴里，发出“铛铛”的响声，这样观测人员就知道什么时间、什么方位发生了地震，由此可以准确报告人无法察觉的 700 公里以外的地震，为战胜自然灾害、挽救生命做出了重要贡献。据史料记载，候风地动仪曾成功地记录了公元 138 年发生在甘肃的一次强烈地震，从而证明了它的准确性和可靠性。它在世界地震史上占有重要的地位。

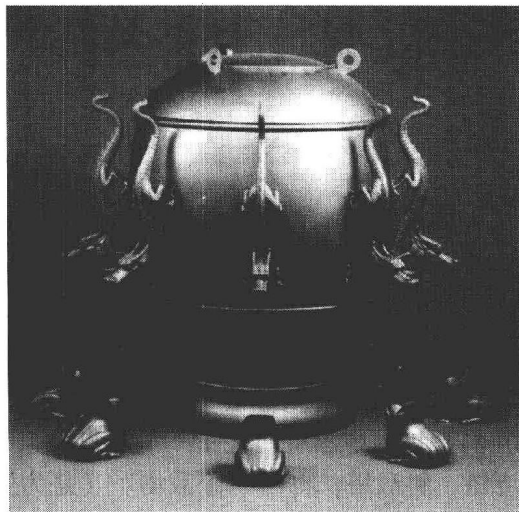


图 0-4 候风地动仪

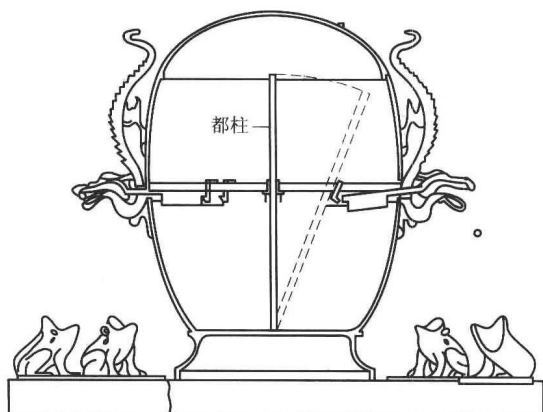


图 0-5 候风地动仪构造图

(2) 应县木塔。山西应县木塔，建于辽清宁二年（公元 1056 年），金明昌六年（公元 1195 年）增修完毕。是我国现存最高、最古老的一座木构塔式建筑，是世界上现存唯一最古老、最高大的木结构建筑，是我国古建筑中的瑰宝，世界木结构建筑的典范。在建筑技艺上，它与法国的埃菲尔铁塔、意大利的比萨斜塔齐名，被世人称为“世界三大奇塔”，如图 0-6 所示。

应县木塔塔高 63 m，共 9 层，因有 4 层是暗层，所以从外面看来，塔只有 5 层高。平面为八角形，木塔除底部为石质外，其余全部用木头建造，各层均用内、外两圈木柱支撑，每层外有 24 根柱子，内有 8 根，木柱之间使用了许多斜撑、梁、枋和短柱，组成不同方向的复梁式木架，全塔没用一个铁钉，全靠构件互相卯榫咬合。由于塔建在 4 m



图 0-6 山西应县木塔

高的两层石砌台基上，内外两排立柱，构成双层套筒式空间框架结构，柱头间有栏额和普柏枋，柱脚间有水平构件，内外槽之间有梁枋相连接，使双层套筒紧密结合（见图 0-7）。暗层中用大量斜撑，结构上起到圈梁的作用，加强了木塔结构的整体性。塔建成三百多年至元顺帝时曾经历大地震，仍岿然不动。

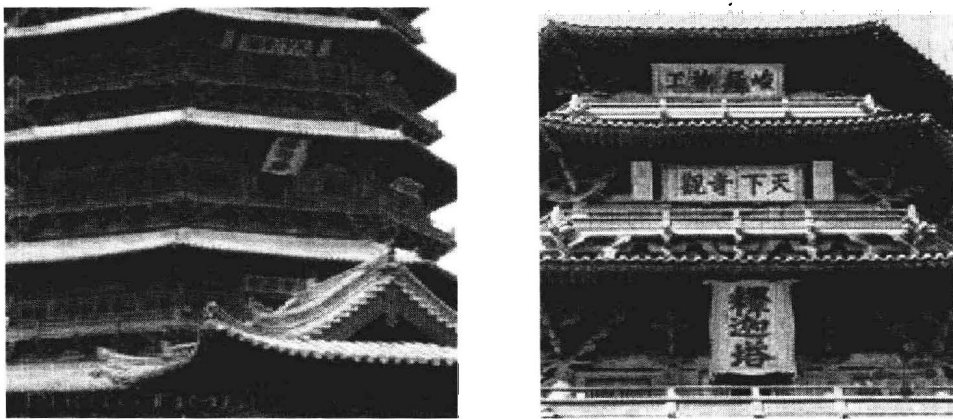


图 0-7 山西应县木塔（局部）

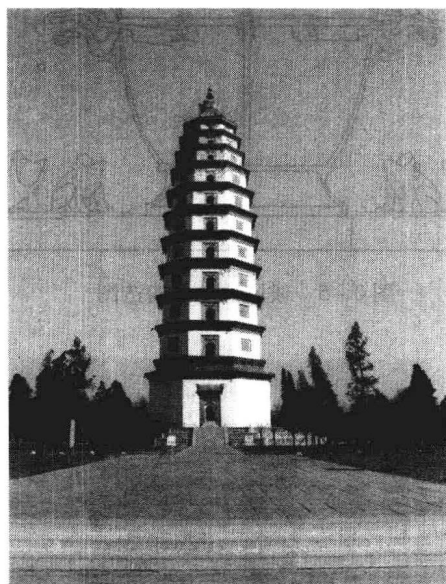


图 0-8 河北料敌塔

近年间河北邢台地震、唐山地震、内蒙古和林格尔地震，木塔都没有受到损坏。这种情况充分说明木塔的抗震能力很强，反映了我国古代建筑工程学的伟大成就。

(3) 料敌塔。中国宝塔之王——定州塔，又称开元寺塔、料敌塔，也叫“瞭敌塔”（是为宋代抵御辽、金，借以窥视敌情而称），料敌塔位于河北省定县，是中国现存最高的古代砖质结构塔。如图 0-8 所示。宋代真宗咸平四年（1001 年）到宋仁宗至和二年（1055 年）完成，历时 55 年。

料敌塔塔高 84.20 m，共 11 层，平面为正八角形，由两个正方形交错而成。塔为砖砌，加有少量木质材料。底部对径 24 m，塔身里外两层，如同母子环抱，中间有阶梯，四面盘旋一直到顶。塔高 13 级，实为 11 层。结构为双层砖套筒，全塔以比例匀称见长，各层塔身高度和直径均随层

数增加而减少，其减少数并非各层一致，而是有韵律地变化，保持了各部分匀称的比例，又给人以稳定感。

料敌塔在康熙五十九年（1720 年）六月初八经历地震，自上至下砖砌体产生裂缝，但并未倒塌；之后又于光绪八年（1882 年）再次经历地震。由于两次地震的影响，导致此塔东北面于清朝光绪十年（1884 年）六月剥落一角，但新中国成立后经过多次维修加固，仍然具有良好的抗震能力。尤其是近年间经历了河北邢台地震、唐山大地震的影响，塔都没有受到损坏，开元寺塔仍挺拔秀丽，巍巍壮观。

双筒结构的特点是所有的构件都用某种方式互相连系在一起,整个建筑就像是从地面发射出的一个空心筒体或是一个刚性盒子一样。此时,高层建筑的整个结构抵抗风荷载和地震荷载的所有强度和刚度将达到最大效率。这种特殊的结构体系首次被芝加哥的43层钢筋混凝土的德威特红棕色的公寓大楼所采用。最引人注目的还要数建造在纽约的地上110层、地下6层的双筒结构世界贸易中心大厦,如图0-9所示。

3. 我国在抗震近代史上的进步

新中国成立60多年后,我国总结了历次强震的震害经验,形成了一门新的学科,即“抗震防灾学”。“抗震防灾学”是通过工程技术手段,采取各种防范措施,以尽量减轻地震灾害的科学。《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(本书中以后统称为《抗震规范》)充分吸收了国内外大

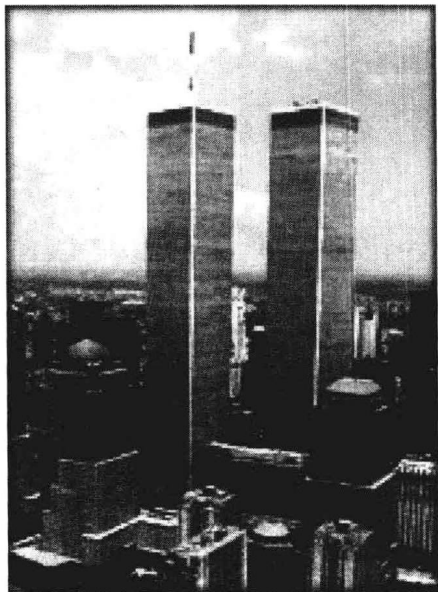


图0-9 美国世贸大厦原貌

地震的经验教训,有价值的科学研究成果和工程实践经验,从1966年邢台地震以后提出的“基础深一点、墙壁厚一点、屋顶轻一点”的概念,到1976年唐山地震以后创造的砖房加“构造柱圈梁”技术,直到今天的“小震不坏,中震可修,大震不倒”的“三水准”抗震设防理论,抗震规范也经历了1974年版《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ 11—74)(试行),它是我国第一本初级的、反映当时技术和经济水平的低设防水平的规范,仅有一些简单的基本规定;1978年版《工业与民用建筑抗震设计规范》(TJ 11—78),第一次提出了适用于设防烈度7~9度工业与民用建筑的抗震设计要求,但6度区仍为非设防区,也未提出“大震不倒”的设防标准;1989年版《建筑抗震设计规范》(GBJ 11—89),增加了对6度区的抗震设防要求,提出了强度验算和变形验算的两阶段设计要求,增加了砌块房屋、钢结构单层厂房和土、木、石房屋抗震设计内容。2001年,出版了《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)。89规范和2001规范引入了弹塑性分析法和时程分析法抗震计算,提出了“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设防目标;现行的2010版《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010),从2010年12月1日开始实施,建筑抗震性能设计方法被明确地编入其中,充实了中国特色的“三水准两阶段”抗震设防理念。版本升级既具有延续性,又不断丰富、创新。

随着社会的发展进步,我国抗震设防标准也在不断完善。《抗震规范》是为实现工程抗震设防目标而制定的工程技术标准。任何一个国家的抗震设计规范都与其当时的工程、材料技术水平和经济发展水平密切相关。《抗震规范》版本的升级,反映了我国工程抗震科学技术与工程实践的发展和进步。

二、汶川地震的经验和教训

大地震时有发生,人们为之付出的代价是巨大的,认真总结研究每一次大地震的特点和经验教训,是十分重要的工作,可以从中积累抗御地震的宝贵经验和教训,以减少未来大地



图 0-10 汶川地震中倒塌的房屋

震给人类可能造成的损失。

2008年5月12日14时28分,发生在四川汶川的里氏8.0级特大地震,震源深度14 km左右,震中烈度高达11度。此次地震不仅在震中区附近造成灾难性的破坏,而且在四川省和邻近省市大范围造成破坏,震感更是波及全国绝大部分地区乃至国外,5·12汶川大地震,使44万余平方公里土地、4600多万人口遭受灾难袭击。其中,重灾区面积达12.5万余平方公里,房屋倒塌778.91万间,损坏2459万间(见图0-10)。地震造成6.9万多人死亡,1.7万多人失踪,37

万多人受伤,这是新中国成立以来破坏力最强、经济损失最大、波及范围最广、救灾难度最大的一次地震灾害。

地震不但造成大量房屋倒塌、破坏,还引起山体崩塌、滚石、滑坡、道路破坏、堰塞湖等地质灾害和次生灾害。由此造成大量人员伤亡、财产损失、居民无家可归、学生无法正常上课。

研究解析汶川大地震的成因及其内在运动规律,认真总结此次大地震的特点和经验教训,从中积累抗御地震的宝贵经验,减少未来大地震给人类可能造成的损害,是每个建筑或相关专业人员义不容辞的责任,也给少数认为地震离自己很远、不重视建筑抗震的人们敲响了警钟。地震带给人们灾难的同时,也检验了建筑物的质量和现行设计标准的合理性。我们必须抓住这一难得的契机调查研究、分析总结,使我们的抗震研究、设计和施工水平、减灾防灾意识和管理能力有一个大的提高。

汶川地震震害原因分析

1. 从本次特大地震的特点来看

(1) 此次地震级别大、烈度高。本次8.0级特大地震发生在青藏高原东边缘的龙门山断裂带上,是该断裂带千年不遇的特大地震。据有关资料介绍,在汶川卧龙获取的峰值加速度记录达 $0.9g$ (地震烈度10度强),在江油获取的峰值加速度记录达 $0.7g$ (地震烈度接近10度)。此次地震所产生的峰值加速度大于 $0.4g$ (地震烈度9度)的区域尺度达到350 km,震中烈度高达11度。此次“5·12”地震的极重灾区,当时的最高设防烈度仅为7度;如此巨大的地震造成地面大量工程建筑倒塌,引发了数以万计的山体崩塌、滑坡、泥石流等次生灾害,形成了众多堰塞湖,造成巨大的人员伤亡和经济损失。

(2) 此次地震震源深度浅、破裂长度大、震害范围广(见图0-11)。本次地震震源发生在地表以下14 km处,所产生的地面运动十分剧烈,地震破裂面从震中汶川开始向北偏东 49° 方向传播,破裂长度达240 km,破裂过程可明显分成相互连贯的若干个破裂事件,每个破裂事件相当于一次7.2~7.6级的地震,造成的地震震害面积达44万平方公里,涉及四川、甘肃和陕西三省237个县、市。我国绝大部分省、市均有不同程度震感,甚至泰国、越南、菲律宾和日本也有震感。

(3) 发震方式特殊、震动持续时间长。本次地震为逆冲、右旋、挤压型断层地震，发震构造为龙门山中央断裂带，在挤压应力作用下，由南向北东逆冲运动；在断裂带区域造成地面最大垂直位移达9米，如图0-12所示。纵向破坏力巨大，而且地震烈度沿断裂带短轴方向变化很快，在20 km距离内烈度值从7度陡然上升至11度，对处于高烈度区的建筑物瞬间造成严重破坏或倒塌；地震强烈波动时间长达100秒（地震史上少见），持续的强烈振动对各种房屋结构造成持续叠加型破坏。如此特殊的地震对地面建筑物的破坏特别巨大，造成的破坏程度历史上罕见。



图0-11 汶川地震的地裂缝



图0-12 汶川地震的地面隆起

2. 从不同地质构造及场地条件下的房屋震害来看

(1) 地质构造差异对房屋震害影响明显。由于地震波在不同地质构造中传播速度和方式的差异，使得处于不同地质构造区域内的房屋建筑的震害情况明显不同。处于断裂构造或褶皱构造区域内的房屋建筑比处于单斜或水平岩层构造区域内的破坏严重。其中，以断裂构造区域内的房屋建筑震害最重，水平岩层构造区域内的震害较轻。沿龙门山中央断裂带两侧20 km范围内为断裂或褶皱构造发育区，房屋震害异常严重。

(2) 场地条件差异对房屋震害影响明显。在比较密实、稳定的土层或基岩场地，地震破坏小；在比较松散、没有胶结的洪积层、河流冲积层或土层中富含水分的场地，地震破坏大，且震害随土层厚度增加而加重。房屋建筑总是依具体的场地条件来考虑布局和朝向，当房屋的抗震薄弱朝向（一般为横向）与地震波的振动方向一致时，就会加剧房屋的震害；当场地的卓越周期与房屋的自振周期、地震波的振动周期相近时，会引起一定的共振效应，也会加剧房屋的震害。由于不同的场地条件及相邻建筑下不同场地土的差异，加上地震波传播中峰值的影响，即：地震纵波与横波传播中波峰的叠加增强，造成了地震波的局部放大，因此，在低烈度区也有造成房屋严重破坏或倒塌的现象；在同一区域内，相邻的同类房屋建筑也产生了截然不同的破坏结果：有的倒塌、有的破坏轻微。

(3) 次生灾害对房屋震害影响明显。这次特大地震引发了大量山体滑坡、泥石流、堰塞湖、地基液化、崩塌、震陷等地质灾害，加剧了山区部分房屋的倒塌及破坏。修建在滑坡地带或断裂带附近的房屋在此次地震中破坏严重。在本次地震的低烈度区域，发生了因房屋建设在滑坡地带，而对房屋造成了严重破坏或垮塌的现象。

3. 从不同类型房屋和结构的震害来看

(1) 砖混结构中，以纵墙承重、大开间、大开窗、外挑走廊等建筑形式的震害最为严重。不少地方在 20 世纪 90 年代以前的砖混结构中较多地使用了大开间、大开窗、外挑走廊等建筑形式，当时的抗震规范没有从圈梁和构造柱的设置上提出更多的要求，加上大量使用与墙体连接锚固不充分的预制空心楼板，使砖混结构的整体性也受到了影响，这些结构形式的建筑在重灾区普遍发生了严重的破坏或整体倒塌，甚至是粉碎性倒塌。许多砖混结构教学楼的整体倒塌，更成为震后社会各界关注的焦点，比如：都江堰聚缘中学教学楼、北川中学教学楼等。如图 0-13 所示。

(2) 框架—砌体混合结构形式，在重灾区普遍受到重创（图 0-14）。无论是底部框架上部砖混的竖向混合结构还是部分框架部分砖混的水平混合结构，由于刚度突变、传力途径复杂和变形能力不协调等因素，大量此类建筑破坏严重，如使用混合结构的商场、办公、医疗、学校等公共建筑。



图 0-13 震后的北川中学



图 0-14 汶川震后的底框砖混结构房屋



图 0-15 汶川地震中倒塌的框架结构房屋

(3) 框架结构中，出现了框架柱先于框架梁破坏的现象。如图 0-15 所示。震害调查显示：本次地震大多数框架结构的主体结构震害较轻。尽管如此，框架结构的破坏表现为框架柱先于框架梁破坏、节点区破坏等现象比较常见。规范中考虑框架的抗震作用主要是抵抗水平地震作用，但此次地震的竖向作用十分强大，震中区域的框架柱出现了（水平、竖向叠加作用）粉碎性压缩破坏，导致房屋严重破坏甚至垮塌。

(4) 用于厂房（或仓储）的排架结构受灾严重。如图 0-16 所示。震害调查中发现，灾区的不少厂房及仓储用房的排架结构由于跨度大、屋架重、柱间连接弱，加上一些年久失修等原因，在此次地震中破坏严重，垮塌较多。其中，单跨比双跨震害重，重屋架比轻屋架震害重。

(5) 农村自建房在重灾区震害十分严重，倒塌普遍。如图 0-17 所示。20 世纪 90 年代