

高层建筑抗震设计

刘大海 杨翠如 钟锡根 编著



中国建筑工业出版社

高层建筑抗震设计

刘大海 杨翠如 钟锡根 编著

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书注重实用。书中,分别就高层建筑的场地选择、结构概念设计、抗侧力体系选型、结构地震内力计算、结构侧移控制、构件抗震构造措施等方面,进行了系统扼要的阐述。

本书也注意抗震设计水平的提高。对装配式楼盖房屋,为考虑楼盖水平变形的影响,提出“串并联质点系”振动模型和空间结构二维振动计算方法。对不规则结构进行双向地震输入时,给出“立体质点系”振动模型及相应的三维振动计算方法。

本书依据各有关新规范及建设部1993年3月公布的《建筑抗震设计规范》(GBJ11-89)、《混凝土结构设计规范》(GBJ10-89)的局部修订内容撰写。

本书可供建筑结构设计、施工、科研人员以及大专院校土建专业师生使用参考。

高层建筑抗震设计

刘大海 杨翠如 钟锡根 编著

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京人民文学印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 29 字数: 695 千字

1993年5月第一版 1993年5月第一次印刷

印数: 1—8,900册 定价: 18.65元

ISBN7-112-01901-X/TU·1442

(6926)

目 录

第一章 震 害 概 况	
第一节 地震的破坏作用	1
一、地震灾害	1
二、强震三要素	1
三、房屋破坏的直接原因	2
第二节 历次地震的破坏特点	2
一、高层建筑震害特征	2
二、国外地震高层建筑破坏概况	3
第三节 高层建筑地震经验	6
一、震害规律	6
二、受震实例	7
第二章 结构概念设计	
第一节 抗震设计目标	11
一、抗震设防的基准	11
二、三个水准的设防要求	12
三、6度开始设防	13
第二节 避免地面变形的直接危害	14
一、避开抗震危险地段	14
二、选择抗震有利地段	16
第三节 减少地震能量输入	18
一、薄的场地覆盖层	18
二、坚实的场地土	19
三、错开地震卓越周期	20
四、采取基础隔震措施	25
第四节 削减地震反应	27
一、提高结构阻尼	27
二、采用高延性构件	29
三、附设耗能装置	32
第五节 有利的房屋体形	32
一、平面要简单	32
二、立面变化要均匀	34
三、合适的房屋高度	36
四、不大的房屋高宽比	37
五、足够的基础埋深	38
六、防震缝的合理设置	39
第六节 合理的结构布置	40
一、结构力求对称	40
二、结构竖向要等强	43
三、屋顶小塔楼的合理设计	49
第七节 恰当的结构材料	51
一、选择结构材料的原则	51
二、几类结构的地震表现	51
三、对材料质量的要求	52
第八节 多道抗震防线	53
一、震害规律的启示	53
二、设置多道防线的必要性	53
三、第一道防线的构件选择	54
四、利用赘余杆件增多抗震防线	55
五、工程实例	56
第九节 抗侧力体系的优化	57
一、足够的抗推刚度	57
二、结构超静定次数要多	60
三、耐震的结构屈服机制	61
四、构件的耐震设计准则	62
五、耗能杆件的优选	72
第十节 控制结构变形	74
一、高层结构的侧移	74
二、结构体系的变形性质	77
三、结构变形的限值	79
四、减小结构侧移的途径	81
第十一节 刚度、承载力和延性的 匹配	91
一、刚度与承载力	91
二、刚度与延性	94
三、结构不同部位的延性要求	96
四、改善构件延性的途径	98
五、提高构件延性的措施	99
第十二节 确保结构的整体性	101
一、结构应具有连续性	101

二、构件间的可靠连接	102
三、提高结构的竖向整体刚度	103
第十三节 减轻房屋自重	104
一、减小楼板厚度	104
二、尽量减薄墙体	107
三、高强混凝土的应用	107
四、轻质材料的应用	108
第十四节 妥善处理非结构部件	109
一、考虑填充墙的影响	109
二、玻璃幕墙的构造	111
三、外墙板的连接	111

第三章 结构体系选型

第一节 高层建筑结构设计特点	113
一、结构内力与变形	113
二、构件的基本形式	115
三、确定结构类型的基本要素	116
四、结构体系的适用范围	116
五、结构体系的选定	119
六、高层建筑结构的发展趋势	119
第二节 配筋砌体结构	121
一、高层砌体建筑现状	121
二、配筋砌体的应用前景	122
三、配筋方式	122
第三节 钢筋混凝土结构	123
一、框架体系	123
二、板柱体系	129
三、全墙体系	133
四、装配式墙板体系	147
五、框托墙体系	153
六、框-墙体系	160
七、芯筒-框架体系	172
八、多筒-框架体系	176
九、刚臂-芯筒体系	178
十、筒中筒体系	185
十一、框筒束体系	207

第四章 结构地震反应分析方法

第一节 分析方法综述	209
一、抗震理论的发展过程	209
二、地震反应分析的实用性	211
三、几种方法的应用	212

第二节 反应谱分析法	213
一、反应谱	213
二、底部剪力法	215
三、振型分解法	220
第三节 时程分析法	229
一、高层建筑的抗震特殊性	229
二、设计步骤	230
三、地震波的选取	231
四、振动模型	233
五、恢复力特性	235
六、结构振动方程	237
七、逐步积分法	239
八、变形检验	244

第五章 刚性楼盖房屋结构抗震验算

第一节 单一体系	246
一、结构特征	246
二、地震作用效应计算步骤	246
三、振动模型	247
四、强迫振动方程	247
五、抗推刚度矩阵的形成	249
六、振型和周期	264
七、水平地震作用	265
八、结构变形验算	268
九、杆件地震内力	269
十、双向水平地震	271
十一、构件截面承载力验算	272
第二节 双重体系	274
一、结构特征	274
二、一阶段设计法	274
三、两阶段设计法	279
四、两阶段设计简化法	291
第三节 抗震设计准则的实施	295
一、基本要求	295
二、框架	296
三、抗震墙	301

第六章 半刚性楼盖房屋构件 地震内力计算

第一节 楼盖力学特征	303
一、楼盖水平变形	303
二、楼盖抗推刚度	305

第二节 空间分析法	311
一、空间结构力学特征	311
二、质点系振动方程	312
三、振型和周期的计算	316
四、水平地震作用	316
五、竖构件承载力验算	318
六、结构变形检验	318
第三节 抗震墙刚度退化影响	319
一、双重体系结构特征	319
二、两阶段设计法计算步骤	319
第四节 空间计算结果对比分析	320
一、基本情况	320
二、主要规律	320
第五节 简化计算方法	326

第七章 偏心结构扭转振动效应

第一节 工程设计的需要	328
一、地震动的多维分量	328
二、建筑扭转震害	328
三、不规则建筑的出现	329
四、规范规定	329
第二节 刚性楼盖简单体形房屋	330
一、偏心距法	330
二、振型分解法	332
第三节 半刚性楼盖简单体形房屋	344
一、结构振动模型	344
二、结构变-扭振动方程	346
三、周期和振型	348
四、质点的水平地震作用	349
五、竖构件地震作用效应	350
六、刚性和半刚性楼盖计算结果的比较	351
第四节 刚性楼盖复杂体形房屋	351
一、抗震分析模型	351
二、结构振动方程	352
三、构件振型地震侧移	354
四、构件变形检验	355
五、构件截面承载力验算	355
第五节 半刚性楼盖复杂体形	356
一、结构振动模型	356
二、立体质点系振动方程	357
三、振型参与系数	360
四、构件振型地震侧移	361
五、构件变形检验	362

六、杆件截面承载力验算	362
-------------	-----

第八章 楼盖水平变形和承载力验算

第一节 工程设计的需要	363
一、不规则结构	363
二、装配式楼盖高层建筑	364
第二节 楼板内力和变形的计算	364
一、结构分析特点	364
二、自由振动方程	365
三、振型和周期	367
四、质点水平地震作用	367
五、结构侧移	368
六、楼盖水平地震内力	369
第三节 空间分析结果的规律	372
一、结构分析对象	372
二、振型组合数	372
三、结构振型地震侧移	373
四、楼盖水平变形曲线	374
五、不同类型楼盖地震剪力的比较	374
六、各开间楼板水平地震剪力	375
七、抗震墙间距不同时的影响	375
八、地震烈度的影响	376
九、房屋总层数不同时的影响	376
第四节 预制空心板的应用	377
一、各类楼盖优缺点	377
二、装配式楼盖的整体性	380
三、框架剪力增值的幅度	381
四、可不设现浇配筋面层	381
五、其他要求的处理	382
六、工程实例	382

第九章 竖向地震作用效应计算

第一节 竖向地震反应谱	384
一、地震动竖向分量	384
二、竖向反应谱的特性	385
三、竖向地震影响系数曲线	385
第二节 结构竖向抗震分析	386
一、结构竖向振动模型	386
二、地震时结构振动方程	388
三、自由振动方程	389
四、竖向地震作用	389
五、竖杆地震内力	390

六、竖杆承载力验算	390
第三节 竖向抗震计算结果	391
一、杆件竖向地震内力	391
二、振型内力与遇合内力	393
三、特点和规律	395
第四节 简化计算方法	396
一、简化的依据	396
二、计算公式	397

第十章 防倒塌设计

第一节 基本原则和方法	399
一、地震经验教训	399
二、结构变形与破坏程度	400
三、大震烈度的含义	401
四、需作弹塑性变形验算的结构	401
五、第二阶段设计步骤	402
六、结构允许极限变形	402
第二节 弹塑性变形特性	403
一、影响变形集中的因素	403
二、变形集中的规律	405
第三节 弹塑性变形计算和检验	406
一、时程分析法	406
二、简化计算方法	406

第十一章 杆件和节点抗震构造

第一节 钢筋混凝土框架	409
一、框架震害	409

二、材料选用	409
三、框架梁	410
四、框架柱	416
五、梁柱节点	427
第二节 钢框架	429
一、钢柱	429
二、钢梁	431
三、梁与柱的连接	431
第三节 现浇抗震墙	432
一、承重墙体系中的抗震墙	432
二、框-墙体系中的抗震墙	437
第四节 预制抗震墙	438
一、钢筋混凝土竖缝墙	438
二、钢筋混凝土平缝墙	440
三、型钢混凝土墙	440
四、钢板墙	440
第五节 框托墙体系	441
一、落地抗震墙	441
二、一般抗震墙	442
三、过渡层楼板	442
四、托墙梁	442
五、钢筋混凝土托墙柱	443
六、型钢混凝土托墙柱	443
第六节 筒中筒体系	444
一、框筒	445
二、墙筒	445
参考文献	446

第一章 震害概况

第一节 地震的破坏作用

一、地震灾害

地震是地球内部构造运动的产物，是一种自然现象。从我国两千多年来的地震史料中可以看出，地震所造成的灾害是极其严重的。1556年关中大地震，死亡人数高达80万，为世界地震史上所仅见。本世纪以来，又发生过1920年海原地震和1976年唐山地震那样的沉痛震害，人民生命财产蒙受了惊人的损失。在世界其他地方，地震造成的灾害同样是十分严重的。1923年日本关东地震，仅东京、横滨两市，死亡人数即达十万余人。1960年智利地震、1967年加拉加斯地震等多次地震，也都造成惨痛的灾难。究其原因，主要是由于建筑不够坚固，地震时大量倒塌所致。据调查，唐山地震，唐山市区内90%以上房屋彻底摧毁；1985年墨西哥地震，远离震中三百多公里的墨西哥市，就有三百多幢楼房倒塌或严重破坏。

二、强震三要素

地震对高层建筑的破坏作用是十分复杂的。首先，地震时的地面运动是多维的，地震动的各向分量对建筑物都起破坏作用。世界各地强震仪已经多次记录到地面运动的三个正交平动分量，即一个竖向分量和两个水平分量。图1-1为1977年3月罗马尼亚地震的加速度

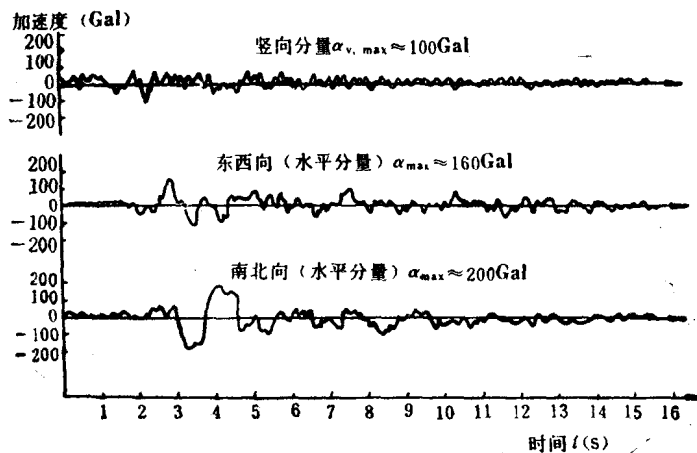


图 1-1 地震动的三向加速度记录

记录^[1]。地面运动的转动分量虽然尚未取得仪器记录，但已为地震工作者观察到，同样也对建筑物起着破坏作用。再者，地面运动的各个分量又都包含多种破坏因素，而这些因素又都随震源特性、传播介质、场地类型等条件的不同而变化，尚无一定规律可循。按照现有地震理论来认识，表征地震动特性及其破坏作用的要素有三：1.峰值加速度；2.频谱组成；3.持续时间（即所谓的强震三要素）。这就是说，影响建筑物破坏程度的不仅是地面运动最大加速度这个单一物理量，还与地震动的波形以及加速度大于0.05Gal的振动持续时间（称为工程持时）密切相关。

三、房屋破坏的直接原因

根据以往地震经验，概括起来，地震期间导致高层建筑破坏的直接原因可分为以下三种情况：

（一）地震引起的山崩、滑坡、地陷、地面裂缝或错位等地面变形，对其上部建筑物的直接危害；

（二）地震引起的砂土液化、软土震陷等地基失效，对上面建筑物所造成的破坏；

（三）建筑物在地面运动激发下产生剧烈震动过程中，因结构强度不足、过大变形、连接破坏、构件失稳或整体倾覆而破坏。

相对于低层建筑而言，高层建筑破坏和倒塌的后果就更加严重。当今，抗震科学尚处于较低水平，试验手段和技术还不能确切模拟地震对建筑的破坏作用，因而地震区建筑物的破坏状况便成为探索地震破坏作用和结构震害机理最直接和最全面的大型结构试验。因此，有必要在充分吸取历史地震经验和教训的基础上，结合现代技术，在基本理论、计算方法和构造措施等多方面，研究改进高层建筑的抗震设计技术，以进一步提高高层建筑的抗震可靠度。

第二节 历次地震的破坏特点

一、高层建筑震害特征

高层建筑的破坏状况和破坏程度，一方面取决于地震动的特性，另一方面还取决于结构自身的力学特性。地震动特性受着发震机制、震源深度、震级、震中距、地形、场地等多种条件的影响；结构力学特性又受着建筑的平面布置、体形、结构材料、抗侧力体系、刚度分布等多种因素的制约。所以，每一次地震，不同类型建筑的破坏程度都存在着较大的差异，高层建筑的破坏状况也各具特点。这些不同地震经验的逐步积累，将有助于加深对高层建筑地震作用和破坏机理的全面认识。下面简要介绍主要几次地震中高层建筑的破坏特点。

（一）1963年南斯拉夫斯科普耶地震，采用钢筋混凝土“框架-墙体”结构体系的房屋，其破坏程度远低于采用纯框架结构体系的房屋。即使墙体未配置钢筋，震后墙体开裂，但框架仍保持完好。

（二）1964年日本新泻地震，地基失效导致建筑破坏是其主要特点。不少楼房因地基砂土液化而倾斜，甚至倾倒。此外，由于场地土软弱，柔性结构房屋的破坏程度要比刚性结构房屋的破坏程度重。

(三) 1964年美国阿拉斯加地震, 一些采用钢筋混凝土剪力墙结构的十几层高的楼房遭到破坏。一种情况是底层墙身出现斜向裂缝, 施工缝处产生水平错动; 另一种情况是, 带成列洞口的外墙, 窗下墙出现斜向裂缝或交叉裂缝。不过, 凡窗下墙(洞口墙梁)发生破坏的, 墙肢(窗间墙)就保持完好。

(四) 1967年委内瑞拉的加拉加斯地震, 水平地震作用引起的倾覆力矩造成高层建筑的破坏是其重要特点。一些高楼的框架柱, 被地震倾覆力矩产生的巨大附加压力所压碎。一个典型震例是一座11层高的旅馆建筑, 采用钢筋混凝土“框托墙”体系, 底下三层为框架, 上面各层为剪力墙。遭遇地震后, 下面三层框架柱的上端均发生剪压型破坏。

(五) 1968年日本十胜冲地震, 钢筋混凝土短柱的剪切破坏是其主要特点; 此外, 房屋破坏程度随钢筋混凝土墙体配置量的增大而减轻。

(六) 1971年美国圣费南多地震, 楼层刚度突变的多层建筑遭到严重破坏是这次地震的特点。一幢六层的医院主楼, 采用钢筋混凝土“框托墙”结构体系, 下面两层为框架, 上面四层为剪力墙, 上、下楼层刚度相差十倍以上, 地震后柔弱底层严重破坏。此外, 还发现配置螺旋箍筋的钢筋混凝土柱表现出极好的延性, 即使在层间侧移角达到1/60的情况下, 被螺旋箍所约束的核心混凝土柱仍未破碎剥落。

(七) 1974年马那瓜地震, 再一次证明钢筋混凝土双肢墙的窗下墙(连梁)的屈服, 对墙肢起了保护作用, 从而得出多肢墙的连梁要符合“强剪弱弯”的设计原则。此外, 还证明高层建筑中设置一定数量的钢筋混凝土抗震墙, 可以减小结构侧移, 从而保护非结构部件及管线系统免遭破坏。

(八) 1975年日本大分地震, 同一楼层内长短柱并用的框架破坏严重; 沿对角线布置洞口的抗震墙破坏严重。

(九) 1976年我国唐山地震, 证明采用框架-抗震墙体系, 在防止填充墙及建筑装饰的破坏方面, 比框架体系优越得多。此外, 在框架间嵌砌砖填充墙, 由于框架柱受到窗洞上下墙体的约束, 因形成短柱而遭到严重破坏。

(十) 1979年美国El-Centro地震, 底层框架柱在埋入地面处产生破坏, 说明刚性地坪对柱的约束作用不容忽视。

(十一) 1985年墨西哥地震, 共振效应是其主要特点。自振周期与地震卓越周期相近的高层建筑遭到严重得多的破坏。此外, 一些框架因梁、柱截面过小和超量配筋发生剪、压破坏而倒塌。无梁楼盖结构, 因楼板在柱周围发生弯曲挤压继而冲切破坏后倒塌。具有拐角形平面的建筑, 破坏率显著增高。带大底盘的高层建筑, 塔楼下部与裙房相接的楼层发生严重破坏, 反映出竖向刚度突变的不良后果。

二、国外地震高层建筑破坏概况

近七十年来国内外发生了多次大地震, 每一次地震都造成大量建筑的破坏, 其破坏状况除了再现其他多次地震中所共有的规律之外, 也都具有一些各自的特点, 从而自不同领域和角度提供了新的地震经验。下面将国外地震的一些主要情况于表1-1中列出^[1], 供工程抗震设计参考。

国外地震高层建筑破坏概况

表 1-1

序号	地 点	时 间 (年、月)	震级 烈度	峰值加速度 持续时间	震 害 概 况	震 害 特 点
1	日 本 关 东	1923.9	7.9级		一座8层钢筋混凝土框架建筑倒塌	钢筋混凝土结构房屋的破坏率低于其他类型结构
2	罗马尼亚 乌兰恰地区	1940.11	7.4级		布加勒斯特一座13层钢筋混凝土框架建筑完全倒塌	
3	新 西 兰	1942.7			框架建筑损坏30%以上	
4	日 本 福 井	1948.6	7.2级	0.3g 加速度 持续30s以上	一座8层钢筋混凝土框架结构的百货公司倒毁	
5	墨 西 哥 墨西哥城	1957.7	7.6级 8度	0.1g, 地震动 卓越周期约为 2.5s	55座8层以上建筑物中有11座钢筋混凝土建筑物遭到损坏	5层以上震害较重, 11~16层破坏最重, 23层及42层两幢建筑未坏, 反映出地震动卓越周期对高层建筑震害的影响
6	南斯拉夫 斯科普耶市	1963.7	6级 7度	0.3g	13、14层钢筋混凝土结构楼房有震害, 具有素混凝土竖筒的建筑破坏轻, 砖填充墙的破坏重	四层以下砖结构破坏重, 高层建筑破坏较轻, 框架体系房屋, 砖填充墙到底的破坏轻, 底层无墙的破坏重
7	美 国 阿拉斯加 安克雷奇市	1964.3	8.4级 10度	0.4g; 持续时 间达150s以上; 地震动卓越周期 约0.5s	28幢预应力钢筋混凝土建筑中有6幢倒塌, 其中一幢6层后张预应力升板结构公寓大楼整幢倾倒	砂土液化引起大面积滑坡; 地震动长周期分量突出, 对高层建筑的破坏力大; 非结构部件破坏所造成的经济损失大
8	日 本 新 泻	1964.7	7.4级 8度	0.16g, 持续 时间为150s	市内1530幢钢筋混凝土结构楼房, 有310幢遭到破坏, 其中44%是上部结构有损坏; 地基失效引起建筑的破坏为数甚多, 一幢四层公寓整体倾倒, 一幢四层清水商店下沉1.5m, 倾斜19度	砂土液化引起的震害普遍而严重, 采用打入密实砂桩基础的建筑几无震害, 设置地下室的建筑震害很轻
9	委内瑞拉 加拉加斯	1967.7	6.5级 7度	Los palos 区: 0.03g, 地震动卓越周期 为1s	四幢10~12层钢筋混凝土建筑倒塌, 31幢8~20层钢筋混凝土建筑严重破坏, 15幢轻微损坏	烈度不高, 但由于场地的冲积层厚度超过160m, 地震动卓越周期较长, 高层建筑破坏率甚高; 建造在基岩和浅冲积层上的高层建筑, 大多数无震害
			8度	Caraballeda 区: 0.13g	两幢10层、一幢13层、一幢14层建筑严重破坏, 其中一幢10层建筑因第7层柱子剪断, 上面三层塌落	
10	日 本 十 胜 冲	1968.5	7.9级	0.28g, 持续 时间为80s	钢筋混凝土柱子破坏较多, 并以短柱剪切破坏较突出	

续表

序号	地点	时间 (年、月)	震级 烈度	峰值加速度 持续时间	震害概况	震害特点
11	美国 圣费南多	1971.2	6.6级 8度	0.1~0.2g	层数为14、38、42的三座高层建筑受到轻微损坏; Olive-View医院的六层病房楼严重破坏, 显示出刚度突变对抗震不利	在50多座建筑中取得200多个强震记录, 20层以上楼房顶部最大加速度为地面加速度的1.5~2倍; 很多电梯遭到破坏, 非结构性损坏造成很大经济损失
12	尼加拉瓜 马那瓜	1972.12	6.5级 9度	东西向0.3g 南北向0.34g 竖向0.33g 持续时间5s	70%以上房屋倒塌, 三幢现浇钢筋混凝土结构高层建筑损坏	钢筋混凝土芯筒-框架体系高层建筑的耐震性能良好; 非结构性破坏很大
13	罗马尼亚 布加勒斯特	1977.3	7.2级 8~9度	水平0.2g 竖向0.1g 持续时间为80s	33幢高层钢筋混凝土框架建筑倒塌, 其中31幢为旧式建筑, 两幢新式建筑都是底层为商店、上层为住宅; 一幢11层钢筋混凝土全墙体系建筑倒塌; 一幢4层无梁楼盖房屋倒塌	钢筋混凝土全墙体系楼房较好, 破坏率较小
14	日本 宫成冲	1978.2	6.7级 7~8度		8层以下钢筋混凝土建筑破坏严重; 仙台市(7度)三幢8、9层型钢混凝土结构楼房的短柱及窗间墙、窗裙墙破坏严重, 未经计算的钢筋混凝土墙体发生剪切破坏	
15	日本 宫成冲	1978.6	7.5级	0.25g	3~6层钢筋混凝土纯框架结构体系的底层柱多数发生剪切破坏; 6~11层框架房屋中未经计算的现浇钢筋混凝土外墙, 剪切裂缝很多, 但长柱很少破坏	
16	希腊 萨洛尼卡	1978.5 1978.6	5.8级 6.5级	东西向0.15g 南北向0.16g 竖向0.13g	一幢八层建筑倒塌, 另两幢底层为商店的八层住宅, 底层柱子发生严重剪切破坏	严重震害发生在软弱冲积层的场地上; 有柔弱底层的建筑破坏重; 有刚性隔墙的建筑破坏轻; 未设缝的建筑震害轻
17	墨西哥 墨西哥城	1985.9	8.1级	0.2g, 持续时间为60s, 其中周期为2s加速度为0.1g持续22s	164幢6~20层房屋倒塌, 无梁楼盖房屋的各层楼板坠落叠置, 一些7~15层楼房仅顶部几层破坏, 14层和21层钢结构大楼拦腰折断, 个别楼房整体倾倒	9~15层楼房的破坏率约为13%, 是5层以下建筑破坏率的10倍; 地震卓越周期引起的楼房共振效应明显; 房屋竖向刚度突变处破坏严重; 平面不规则建筑破坏严重

续表

序号	地点	时间 (年、月)	震级 烈度	峰值加速度 持续时间	震害概况	震害特点
18	苏联 亚美尼亚	1988.12	6.9级 9度		列宁纳坎城约80%的建筑物严重破坏和倒塌。50余幢9层钢筋混凝土框架建筑, 12幢严重破坏, 其余全部倒塌; 一幢10层升板结构楼房倒塌, 一幢16层升板结构楼房底层严重破坏	未设防的低层无筋砖房破坏甚轻; 7度设防的9层装配式墙板建筑破坏较重; 7度设防的9层预制框架建筑及10层升板建筑大多数倒塌。位于古沼泽地带的建筑破坏严重

第三节 高层建筑地震经验

一、震害规律

近几十年来世界各地发生的多次大地震中, 大量高层建筑经受住了地震的考验, 但也有不少楼房发生严重破坏甚至倒塌。这说明结构在地震作用下的动力反应有其特殊性, 静荷载下合理的结构, 在地震作用下有时就不够合理而发生破坏。有些破坏现象虽然是在个别震例中发生的, 但它是一种规律性的情况, 仍具有普遍意义。下面就历次地震中高层建筑的破坏情况加以综合, 将其中具有规律性的震害现象归纳如下, 供今后工程设计借鉴。

(一) 地基方面

1. 砂土液化引起地基不均匀沉陷, 导致上部结构破坏或整体倾斜。
2. 在具有深厚软弱冲积土层的场地上, 高层建筑的破坏率显著增高。
3. 当高层建筑的基本周期与场地自振周期相近时, 破坏程度将因共振效应而加重。

(二) 房屋体形方面

1. L形等复杂平面房屋, 破坏率显著增高。
2. 有大底盘的高层建筑, 裙房顶面与主楼相接处楼板面积突然减小的楼层, 破坏程度加重。
3. 房屋高宽比值较大且上面各层刚度很大的高层建筑, 底层框架柱因地震倾覆力矩引起的巨大压力而发生剪压破坏。
4. 防震缝处多因缝的宽度太小而发生碰撞。

(三) 结构体系方面

1. 相对于框架体系而言, 采用框-墙体系的房屋, 破坏程度较轻, 特别有利于保护填充墙和建筑装修免遭破坏。
2. 采用“填墙框架”体系的房屋, 在钢筋混凝土框架平面内嵌砌砖填充墙时, 柱上端易发生剪切破坏; 外墙框架柱在窗洞处因受窗下墙的约束而发生短柱型剪切破坏。
3. 采用钢筋混凝土板柱体系的房屋, 或因楼板冲切破坏, 或因楼层侧移过大柱顶、柱脚破坏, 各层楼板坠落, 重叠在地面。

4.采用“框托墙”体系的房屋，相对柔弱的底层，破坏程度十分严重；采用“填墙框架”体系的房屋，当底层为开敞式的，框架间未砌砖墙，底层同样遭到严重破坏。

(四) 刚度分布方面

1.采用L形、三角形等不对称平面的建筑，地震时因发生扭转振动而使震害加重。

2.矩形平面建筑，电梯间竖筒等抗侧力构件的布置存在偏心时，同样因发生扭转振动而使震害加重。

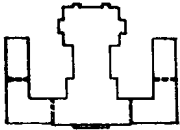
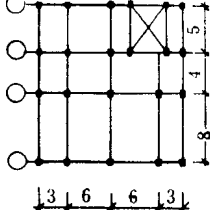
(五) 构件形式方面

- 1.钢筋混凝土多肢剪力墙的窗下墙（连梁）常发生斜向裂缝或交叉裂缝。
- 2.在框架结构中，绝大多数情况下，柱的破坏程度重于梁和板。
- 3.钢筋混凝土框架，如在同一楼层中出现长、短柱并用的情况，短柱破坏严重。
- 4.配置螺旋箍的钢筋混凝土柱，当层间位移角达到很大数值时，核心混凝土仍保持完好，柱仍具有较大的竖向承载能力；形成对照的是，配置方形箍的钢筋混凝土柱，箍筋崩开，核心混凝土破碎脱落。

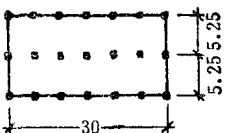
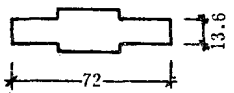
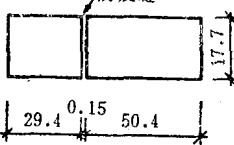
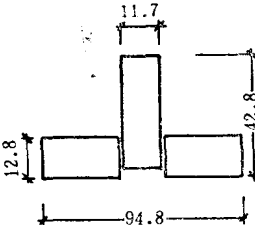
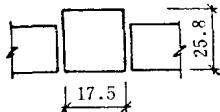
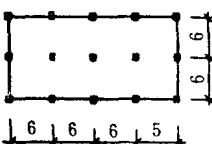
二、受震实例

我国海城、唐山地震，位于6~10度区内一些不同类型的高层建筑，遭到程度不同的损坏。各类房屋的破坏状况也各具一定的特点，对于摸清不同类型结构在地震作用下的动力反应、变形状态、内力分布、薄弱环节以及综合抗震性能，都具有一定的参考价值。此外，其中一些房屋在设计时曾进行了抗震设防，设防烈度有低于也有高于所遭遇的地震烈度。因此，它们的破坏状况对于检验建筑抗震设计规范有关条文的合理与否，也具有一定的作用。现将各烈度区内遭到破坏的一些高层建筑的结构情况和震害状况列于表1-2之中^[2]，供参考使用。

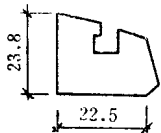
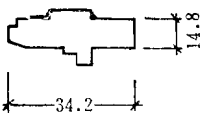
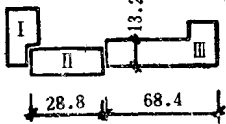
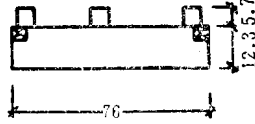
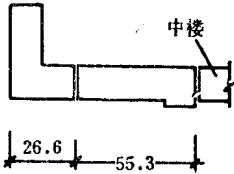
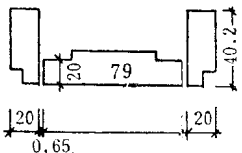
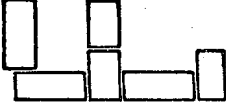
国内高层建筑震害状况 表 1-2

序号	建筑物名称和平面(m)	高度层数	烈 度		结构特征	震 害 状 况
			设防	遭遇		
1	营口市营口饭店 	29m, 地上8层	7度	8度	钢筋混凝土框架,240mm厚砖填充墙,底部三层门厅两侧设钢筋混凝土抗震墙	底层,门厅两侧钢筋混凝土墙出现交叉斜裂缝,纵向和横向内外砖填充墙普遍开裂严重;西北角底层钢筋混凝土柱上端破碎,钢筋弯曲;三层和六层框架梁出现竖向裂缝
2	唐山新华路商业旅馆 	28m, 地上8层, 地下一层		10度	现浇钢筋混凝土框架;二、四层及屋面为现浇钢筋混凝土楼板,其他各层楼板采用预制空心板;空心砖围护墙(采取先砌墙后浇柱)	轴线⑧五层三个中柱上端破碎,大梁下沉400mm,6~8层大梁折断;砖填充墙,五层东侧坍塌,五层以上普遍严重开裂,四层以下开裂较轻;五层以上,楼梯间严重开裂,踏步板和平台梁折断;与东侧六层楼发生碰撞(缝宽仅40mm)

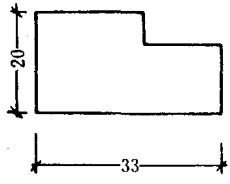
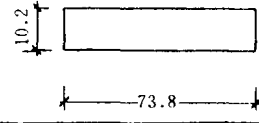
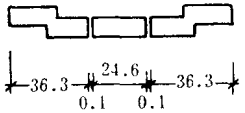
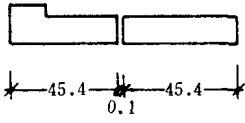
续表

序号	建筑物名称和平面(m)	高度层数	烈 度		结构特征	震 害 状 况
			设防	遭遇		
3	唐山第一面粉厂加工车间 	20m, 地上5层	8度	10度	现浇钢筋混凝土框架, 砖填充墙	底层柱破坏严重,混凝土酥碎,钢筋外露;二至四层柱在窗顶和窗底水平断裂;砖填充墙破坏严重,普遍出现交叉裂缝和水平缝,上层破坏较轻
4	唐山开滦煤矿第三招待所 	26m, 地上8层, 地下1层		10度	砖混结构,6~8层为现浇钢筋混凝土楼板,其余各层楼板采用预制空心板	全部倒塌
5	天津友谊宾馆  防震缝 29.4 0.15 50.4 17.7	东段: 高37m, 地上8层, 地下1层	7度	8度	钢筋混凝土框架,空心砖填充墙;楼板采用预制多孔板及40mm厚配筋面层;有桩筏板基础	框架仅底层东南角柱节点出现斜裂缝;砖填充墙,底层和二层严重破坏,往上渐轻,六层以上无裂缝
		西段: 高47m, 地上11层, 地下1层	7度	8度	钢筋混凝土框墙体系,空心砖填充墙;楼板,同东段;有桩箱形基础	1~3层钢筋混凝土墙出现细微裂缝;砖填充墙,1~4层基本完好,五层开始出现细微裂缝,往上渐加重
6	天津骨科医院 	34m, 地上8层		8度	装配整体式钢筋混凝土框架,空心砖填充墙;预制多孔楼板;筏板基础	主体结构无震害;楼梯间及隔墙有裂缝;三层外窗在窗下有X形裂缝;沉降缝上半部发生碰撞,外墙上有裂缝
7	天津南开大学主楼 	50m, 地上10层, (塔楼3层)		8度	现浇钢筋混凝土框架,砖砌填充墙	7层以下基本完好,7层以上塔楼严重破坏,砖墙龟裂,窗玻璃破碎,顶层向南倾斜200mm
8	天津碱厂蒸吸塔 	55m, 地上13层		8度	现浇钢筋混凝土框架,空心砖填充墙;筏板基础	三层以上全部倒塌,二层局部倒塌;剩余部分,砖填充墙倒塌或严重破坏

续表

序号	建筑物名称和平面(m)	高度层数	烈 度		结构特征	震 害 状 况
			设防	遭遇		
9	天津人民大楼 	50m, 地上13层		8度	现浇钢筋混凝土框架和楼板, 空心砖填充墙; 桩基础	主体结构基本完好, 三、四楼层空心砖墙开裂, 抹灰剥落, 室内烟囱周围空心砖墙出现20mm宽的交叉裂缝
10	天津海河饭店 	47m, 地上11层		8度	现浇钢筋混凝土框架, 现浇钢筋混凝土楼板, 空心砖填充墙; 桩基础	2~4层的隔墙出现细微裂缝, 7层的隔墙开裂, 粉刷剥落
11	北京民航局办公大楼 	61m, 地上15层	7度	6度	装配整体式钢筋混凝土框架, I、III段为格形基础, II段为筏板基础; 外墙为预制挂板, 内墙为木渣板	主体结构无震害, 外墙面个别部位面砖脱落, 内墙在预制板接缝处裂开, 楼梯间普遍发生水平缝, 防震缝处发生碰撞, III段9层顶部女儿墙被撞断
12	北京中医医院病房楼 	43m, 地上10层, 地下一层	8度	6度	装配整体式钢筋混凝土框架, 箱形基础; 外墙为预制钢筋混凝土挂板, 内墙为焦渣空心砖加配筋带	主体结构无震害; 外墙挂板与加气保温层之间裂开; 三层内横墙出现交叉斜裂缝; 二层楼梯间端外墙加气混凝土块斜裂
13	北京饭店老楼 	41m, 地上9层, 地下一层		6度	现浇钢筋混凝土框架, 陶土空心砖填充墙; 箱形基础	外廊柱身包砖脱落, 7、8层内纵墙破坏严重, 出现多道交叉缝和水平缝, 伸缩缝处发生碰撞, 与中楼相接处的端墙发生局部倒塌
14	北京饭店新楼 	75m, 地上18层, 地下3层	8度	6度	现浇钢筋混凝土框-墙体系; 外墙为370mm厚实心砖填充墙, 内纵墙为120mm砖墙及配筋带, 内横墙采用加气混凝土砌块; 箱形基础	顶层内纵墙门洞过梁出现竖向裂缝, 第16层, 内纵墙出现水平裂缝, 个别横墙产生斜裂缝; 顶部几层楼梯间墙面出现水平裂缝; 底层大厅大理石饰面板被挤碎
15	北京民族饭店 	48m, 地上12层, 地下一层	7度	6度	装配整体式钢筋混凝土框架和抗震墙, 空心砖填充墙; 箱形基础	抗震墙在预制和现浇的接缝处出现细微裂缝; 内隔墙有水平及斜裂缝, 顶层及底部几层较重; 防震缝处发生碰撞, 饰面损坏

续表

序号	建筑物名称和平面 (m)	高度层数	烈 度		结 构 特 征	震 害 状 况
			设防	遭遇		
16	北京外交公寓 	58m, 地上18层, 地下二层	7度	6度	装配整体式钢筋混凝土框架和抗震墙, 围护墙采用预制挂板, 内隔墙采用加气混凝土砌块; 桩基础	外墙个别地方面砖脱落; 6~8层, 少数填充墙在与柱面相接处出现裂缝, 相互脱开
17	北京总参住宅 	38m, 地上12层, 地下一层	8度	6度	装配整体式钢筋混凝土框架和剪力墙, 电梯间采用钢筋混凝土竖筒; 隔墙、围护墙采用加气混凝土条板	纵向剪力墙的连梁出现交叉裂缝, 3~7层裂缝较多; 横向预制板墙梁交接处角部断裂; 加气条板的接缝有细裂缝
18	北京广播事业局住宅 	36m, 地上12层, 地下二层	8度	6度	现浇钢筋混凝土全墙体系, 滑模施工; 预制空心楼板; 预制桩基础	顶层端开间内纵墙出现斜裂缝, 顶层内外墙交接处有斜裂缝; 10层以上走道外墙窗下有裂缝, 2、3层内墙出现较细水平裂缝
19	北京东三环路统建一号楼 	31m, 地上10层, 地下一层	8度	6度	现浇钢筋混凝土剪力墙结构, 大模施工; 预制空心楼板; 灌注桩基础	顶层内纵墙端开间出现斜裂缝, 内外墙交接处内墙角上有斜裂缝; 墙面门洞角部原有裂缝加长加宽; 楼板与墙交接处有裂缝出现; 电梯间墙而出现水平缝