



建筑抗震实用技术系列手册

11G329

建筑抗震设计解析 与应用



李守巨 主编



化学工业出版社



建筑抗震实用技术系列手册

11G329

建筑抗震设计解析 与应用



李守巨 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)、《11G329-1》、《11G329-2》、《11G329-3》三本最新图集及国家现行相关标准规范编写而成。本书共分为六章,包括抗震设计的基本要求、建筑场地与地基基础、地震作用和结构抗震验算、多层和高层钢筋混凝土房屋、多层砌体房屋及单层工业厂房等内容。

本书可供广大从事建筑抗震设计、施工、科研的相关人员参考,也可供各大专院校相关专业师生学习。

图书在版编目(CIP)数据

11G329 建筑抗震设计解析与应用/李守巨主编. —北京:化学工业出版社, 2014.4

(建筑抗震实用技术系列手册)

ISBN 978-7-122-19807-5

I. ①1… II. ①李… III. ①建筑结构-防震设计 IV. ①TU352.104

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 029396 号

责任编辑:彭明兰 李健

装帧设计:刘丽华

责任校对:宋夏

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张15½ 字数351千字 2014年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:49.00 元

版权所有 违者必究



前言

地震，是一种不可抗拒的自然现象，严重影响人们的生活和生产，给人类带来了重大损失。为降低地震对人民生命安全和国家财产、经济的损失，加强建筑物的抗震构造措施就显得十分必要与迫切。良好的抗震构造措施是保证建筑工程质量性、抗震性、安全性的一项重要手段。基于上述原因，我们组织编写了本书。

本书主要依据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)、《11G329-1》、《11G329-2》、《11G329-3》三本最新图集及国家现行相关标准规范编写而成。本书内容紧密的围绕图集展开，结构体系上重点突出、详略得当，还注意了知识的融贯性，与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)等规范标准相结合，突出整合性的编写原则。本书共分为六章，包括抗震设计的基本要求、建筑场地与地基基础、地震作用和结构抗震验算、多层和高层钢筋混凝土房屋、多层砌体房屋及单层工业厂房等内容。本书可供广大从事建筑抗震设计、施工、科研的相关人员参考，也可供各大专院校相关专业师生学习。

本书由李守巨主编，参编由张敏、姜媛、张一帆、刘秀民、吕克顺、韩旭、危聪、邹雯、李香香、张敏、李冬云、白雅君共同完成。

本书在编写过程中参考了有关文献和一些相关经验性文件，并且得到了许多专家和相关单位的关心与大力支持，在此表示衷心感谢。随着科技的发展，建筑技术也在不断进步，本书难免有疏漏及不妥之处，恳请广大读者给予指导指正。

编 者

2014 年 1 月

1

抗震设计的基本要求

1.1 抗震概念设计的一般原则	1
1.1.1 地震环境及其对结构抗震的影响	1
1.1.2 建筑体形和结构布置的基本原则	5
1.2 规则结构与不规则结构	11
1.2.1 平面规则性准则	11
1.2.2 立面规则性准则	11
1.2.3 结构计算模型和分析方法	13
1.2.4 等效扭转效应近似分析方法	13
1.2.5 设计不规则的建筑结构时应注意的问题	14
1.3 抗震设计的一般要求	15
1.3.1 适用高度	15
1.3.2 高宽比	16
1.3.3 抗震等级	16
1.3.4 结构布置	17

2

建筑场地与地基基础

2.1 场地类别划分	20
2.1.1 场地土类型	20
2.1.2 场地覆盖层厚度确定	21
2.1.3 场地类别	21
2.2 场地选择	22
2.3 天然地基和基础	25
2.3.1 可不进行天然地基和基础抗震承载力验算的建筑	26
2.3.2 天然地基基础抗震承载力验算	26

2.3.3 地基抗震验算	26
2.4 液化判别与危害程度估计	30
2.4.1 液化的判别	30
2.4.2 液化地基危害程度评价	32
2.4.3 抗液化措施	33
2.5 桩基	38
2.5.1 不需进行抗震验算的建筑桩基	38
2.5.2 低承台桩基抗震验算	38

3

地震作用和结构抗震验算

3.1 水平地震作用计算	41
3.1.1 抗震设计反应谱	41
3.1.2 结构自振周期的计算	44
3.1.3 底部剪力法	47
3.1.4 平动的振型分解反应谱法	52
3.1.5 扭转耦联的振型分解反应谱法	53
3.1.6 楼层剪力在平面内的分配	55
3.1.7 结构水平地震剪力控制	57
3.1.8 时程分析法	59
3.2 竖向地震作用的简化计算方法	61
3.2.1 高层建筑和高耸结构的竖向地震作用	61
3.2.2 网架及大跨度屋架的竖向地震作用	62
3.3 截面抗震验算	62
3.4 结构抗震变形验算	64
3.4.1 多遇地震作用下结构的弹性变形验算	64
3.4.2 罕遇地震作用下结构的弹塑性变形验算	65

4

多层和高层钢筋混凝土房屋

4.1 钢筋混凝土框架震害调查和分析	74
4.1.1 震害调查	74
4.1.2 震害分析	74

4.1.3 抗震加固措施	75
4.2 钢筋混凝土框架结构抗震构造措施	76
4.2.1 框架梁	76
4.2.2 框架柱	77
4.2.3 框架节点	81
4.3 抗震墙结构抗震构造措施	91
4.3.1 抗震墙的厚度及墙肢长度	91
4.3.2 抗震墙的分布钢筋	92
4.3.3 抗震墙的轴压比限值	92
4.3.4 抗震墙的边缘构件	92
4.3.5 连梁	95
4.4 框架-抗震墙结构抗震构造措施	95
4.5 多层及高层钢筋混凝土房屋抗震加固	105
4.5.1 加固方法	105
4.5.2 加固设计及施工	106
4.6 抗震构造详图	116
4.6.1 框架梁、柱箍筋构造	116
4.6.2 框架梁、柱纵筋构造	119
4.6.3 剪力墙结构	123
4.6.4 框架-剪力墙结构	132

5

多层砌体房屋

5.1 多层砖砌体房屋的震害调查与分析	136
5.1.1 震害调查	136
5.1.2 震害总体概况	137
5.1.3 震害分析	138
5.2 多层砌体房屋抗震设计的一般要求	138
5.2.1 房屋的层数和总高度的限制	138
5.2.2 房屋最大高宽比的限制	140
5.2.3 房屋抗震横墙间距的限制	140
5.2.4 房屋局部尺寸的限制	141
5.2.5 房屋的结构体系及平面布置	141
5.3 地震作用计算和截面抗震验算	142
5.3.1 水平地震作用的计算	142

5.3.2 楼层地震剪力设计值在各墙段的分配	143
5.3.3 截面抗震验算	145
5.4 主要抗震构造措施	149
5.4.1 多层砖房的抗震构造措施	149
5.4.2 多层砌块房屋的构造措施	155
5.5 多层砌体房屋的抗震加固	157
5.5.1 多层砌体房屋的加固方法	157
5.5.2 多层砌体房屋加固设计及施工	158
5.6 抗震构造详图	169
5.6.1 多层砖砌体房屋抗震构造详图	169
5.6.2 多层小砌块砌体房屋抗震构造详图	173
5.6.3 底部框架-抗震墙砌体房屋的要求	179

6

单层工业厂房

6.1 单层钢筋混凝土柱厂房	183
6.1.1 单层钢筋混凝土柱厂房的震害	183
6.1.2 单层钢筋混凝土柱厂房一般要求	185
6.1.3 地震作用分析	187
6.1.4 截面抗震验算	194
6.1.5 抗震构造措施	211
6.2 单层钢结构厂房	217
6.2.1 单层钢结构厂房的震害	217
6.2.2 单层钢结构厂房的一般要求	217
6.2.3 地震作用计算和截面抗震验算	218
6.2.4 抗震构造措施	221
6.3 抗震构造详图	223
6.3.1 柱的箍筋加密区	223
6.3.2 屋架与柱的连接	226
6.3.3 柱间支撑及节点	228

参考文献

抗震设计的基本要求

1.1 抗震概念设计的一般原则

1.1.1 地震环境及其对结构抗震的影响

在建筑工程选址规划和方案设计阶段就应考虑到地震的危险性，包括场址和场地条件等因素在内的对建筑物抗震产生的不利影响，以使结构方案控制在可接受的造价范围内，在满足抗震设计的基本要求的前提下，取得较好的经济效益。

(1) 避开抗震危险地段 建筑抗震危险地段一般是指地震时可能发生崩塌、滑坡、地陷、地裂、泥石流等的地段以及震中烈度的发震断裂带可能发生地表错位的地段。

① 发震断层与非发震断层。断层可分为发震断层（或称活动断层）和非发震断层（或称非活动断层）。一般来说，在过去的 3.5 万年内曾活动过一次，或者在 5 万年以内活动过 2 次，即被认为是发震断层，它具有潜在的地震活动性。而非发震断层则被认为是与当地的地震活动性没有成因上联系的一般断层，它在地震作用下一般也不会发生新的错动。

发震断层突然错动，将释放巨大的能量，引起地面震动。当强烈地震时，断层两侧的相对错动，可能出露于地表，从而形成地表断裂。1976 年的唐山大地震，一条北东走向的地表断裂，长达 8km，水平错动达 1.45m。由此可见，在发震断层附近地表的建筑物将会遭到严重破坏甚至倒塌，显然这种地震潜在危险在工程场址选择时是必须考虑的。

国内通海 7.7 级地震（1970 年）、海城 7.3 级地震（1975 年）和唐山 7.8 级地震（1976 年）的震害调查资料表明，有相当数量的非活动断层对建筑震害的影响其实并不明显，位于非活动断裂带上的房屋建筑，与断裂带外的房屋建筑，在震中距和场地土条件基本相同的情况下，两者的震害指数大致相同，因此，在选择工程场址时，无需刻意远离非

活动断层。当然,建筑物的具体位置不宜横跨断层和破碎带,以防万一发生地表错动或不均匀沉降将给建筑物带来危险,造成不必要的损失。

② 山崩与滑坡。在强烈地震的作用下,陡峭的山区常易发生巨石滚落、山体崩塌和滑坡等地震灾害。1932年的云南东川地震,大量山石崩塌,阻塞了小江,并于1966年再次发生6.7级地震时,震中附近一个山头的一侧就崩塌了近 $8 \times 10^5 \text{ m}^3$ 山体。1970年5月,秘鲁北部地震,也发生了一次特大规模的塌方,塌方体以 $20 \sim 40 \text{ km/h}$ 的速度滑移了18km,以致一个市镇全部被塌方所掩埋,死亡人数多达2万人。1970年,通海发生7.7级地震,丘陵地区山脚下的一个土质缓坡,连同土坡上整座村庄的几十户人家,向下滑移了100多米,土体破裂变形,房屋大面积倒塌。1964年,美国阿拉斯加发生地震,岸边含有薄砂层透镜体的黏土沉积层斜坡,因薄砂层的液化而发生了大面积的滑坡,导致土体支离破碎,地面起伏不平。所以应将易发生山崩和滑坡等的地段视为抗震危险地段,不应在此类地段上建造建筑物。

(2) 选择抗震有利地段

① 局部不利地段。根据我国在乌鲁木齐、东川、邢台、通海、海城和唐山等地的地震震害普查结果所绘制的等震线图,在正常的烈度范围内,常存在着小面积的高一度或低一度的局部烈度异常区。此外,同一次地震的同一烈度区内位于不同小区的房屋,尽管建筑形式、结构类型和施工质量等情况基本相同,但震害程度却出现了较大差异。究其原因,主要是由于地形和场地条件的不同所造成的。

一般来说,位于条状突出的山嘴、孤立的山包、山梁的顶部、高差较大的台地边缘、非岩质的陡坡和河岸和边坡边缘等地段的建筑物,均对抗震有着不利影响。1966年的云南东川地震,位于河谷较平坦地带的新村,烈度为8度,而邻近一个孤立山包顶部的硅肺病疗养院,按其破坏程度来看,烈度却不低于9度。1970年的通海地震,位于孤立的狭长山梁顶部的房屋,其震害程度所反映出来的烈度,比附近平坦地带的房屋约高出1度。通海地震烈度为10度区内的房屋震害指数与局部地形的关系如图1-1所示,图中实线A表示地基土为第三系风化基岩,虚线B表示地基土为比较坚硬的黏土。同时,在海城地震时,从位于大石桥盘龙山高差58m的两个测点上所测得的强余震加速度峰值记录来看,位于孤突地形上的加速度峰值要比坡脚平面上的平均大1.84倍。上述现象均充分说明,在狭长山梁顶部和孤立山顶等不利位置,地震波将被放大。

② 河岸边坡。在邢台、海城和唐山地震时,不少河岸边坡都向河心方向滑移,河岸附近地面出现多条平行于河流方向的裂隙。最远的一条裂隙到边坡脚的水平投影距离S,对于一般亚黏土坡体而言,约为坡高 h 的5倍;对于较软的黏土坡体而言,约为坡高 h 的10倍,如图1-2所示。河岸上的房屋,常因地面不均匀沉降或地面裂隙穿过而裂成数段。这种河岸滑移对建筑物的危害,靠工程措施来防治是不经济的,一般来说宜采取避开的方案。不得不在岸边建筑房屋时,应采取可靠措施,增加边坡的稳定性,以保证岸边建筑物的安全。

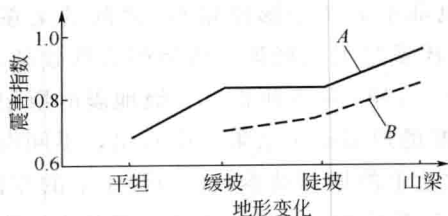


图 1-1 房屋震害指数与局部地形的关系曲线

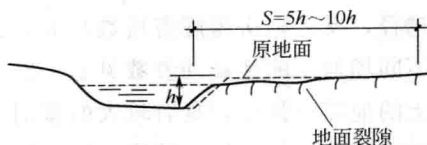


图 1-2 河岸地面裂隙的范围

③ 建筑物不宜在两类不同性质的土层上建筑。研究表明，如果基岩与土壤覆盖层之间的界面是倾斜的，那么将会对建于其上的结构地震反应产生明显的影响。因此，在一个场地内，沿水平方向土层类别发生变化时，一幢建筑物不宜横跨在两类性质不同的土层上，否则将会危及到该建筑物的安全。如果无法避开时，除在分析中要考虑到建于不同土层上对结构地震反应的不利影响以外，还应采取局部深基础等专门措施，使整个结构的基础埋置于同一土层上，如图 1-3 所示。

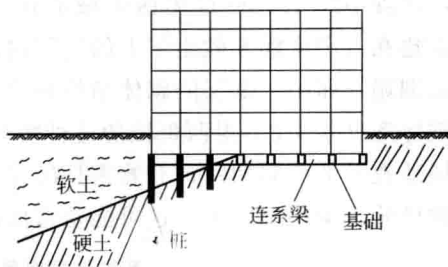


图 1-3 横跨两类土层的建筑物

(3) 重视场地土条件的影响

① 震陷土不能作为天然地基。饱和松散的砂土和粉土，属于可液化土，在强烈地震动的作用下，孔隙水压会急剧升高，土颗粒悬浮于孔隙水中，从而丧失了抗剪承载力，将产生较大的沉陷。土壤液化的后果是非常严重的，它会使建筑物下沉、倾斜，地坪下沉或隆起，从而导致上部结构由于地基不均匀沉降而被破坏，甚至发生钢筋混凝土桩基础折断、地下竖管弯曲等现象。为此，应采用人工地基，或采取措施完全消除土层液化。

淤泥和淤泥质土等软土，属于一种高压缩性土，抗剪强度低。这类软土在强烈地震动作用下，会导致土体向基础两侧挤出，造成上部结构急剧沉降和倾斜。例如，1976 年唐山地震前，累计沉降量分别为 200mm 和 300mm，地震期间沉降量突然增大，分别增加了 150mm 和 200mm。震后，房屋向一侧倾斜，房屋四周的外地坪地面隆起，如图 1-4 所示。

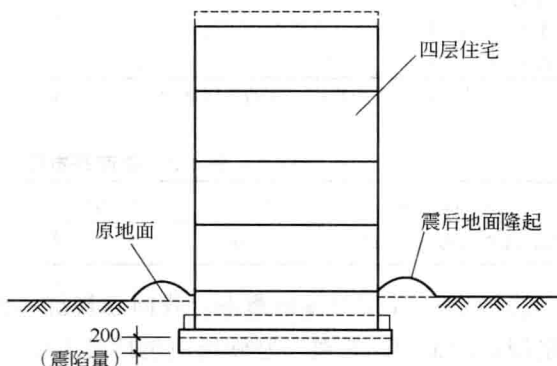


图 1-4 软土地基上房屋的震陷

② 场地土刚度的影响。场地土是指场地范围内的地基土，在平面上大致相当于一个厂区或自然村的面积大小，深度一般为地下 15m。大量地震震害调查数据表明，场地土刚度的大小对其上部的建筑震害程度有着显著影响。

场地土刚度，一般以土体的综合剪切变形模量 G_s 或剪切波速度 v_s 来表述。1975 年海城地震现场调查所得到的房屋震害指数 i 与地基土剪切变形模量 G_s 之间的关系见表 1-1。从表中的数据可以看出，地基土剪切变形模量越大的场地，房屋震害指数越小，破坏越轻，反之则房屋震害指数越大，破坏越严重。1985 年墨西哥 8.1 级地震时所记录到的不同场地土的地震动参数见表 1-2。从表中实测的地震记录结果可以看出，不同类别场地土的地震动强度，具有较大的差别。古湖床软土上的地震动参数，与硬土上的相比，加速度峰值约增加 4 倍，速度峰值增加 5 倍，位移峰值增加 1.3 倍，而反应谱最大反应加速度则增加了 9 倍之多。在这次墨西哥地震中，震源位于墨西哥西部海岸外约 40km 的海底，距震中约 400km 的墨西哥城遭到严重破坏，主要集中在高层建筑和长周期结构上，尤以建在古湖床深厚软土层上的高层建筑破坏最为严重，共有 164 幢 6~20 层房屋倒塌或濒临倒塌，而中、低层的砌体结构和填充墙框架的破坏则比较轻。墨西哥市区不同层数房屋破坏率见表 1-3。墨西哥城的这种特有的破坏现象与当地的地质剖面状况和大震作用下该场地震动的长周期特征有着密切的关系。墨西哥城市中心位于新近代沉积盆地上，土质异常松软，覆层厚度大，这可能是造成高层建筑破坏的主要原因。

表 1-1 海城地震房屋破坏程度与场地土刚度之间的关系

地 名	于官屯 西街	西庙子	感王小 学校	牛庄	于官屯 后街	李家	董家	东拉 拉房
地基土剪变模量 $G_s(\times 10^{-4})$	14.8	2.8	12.2	9.5	8.7	7.2	6.1	3.7
、房屋震害指数 i	0.20	0.38	0.40	0.52	0.65	0.60	0.82	0.92

表 1-2 墨西哥市区不同场地土的地震动参数

场地土类别	地震动卓越周期/s	水平地震动参数			结构(5%阻尼比)最大 反应加速度/g
		加速度(g)	速度/(cm/s)	位移/cm	
岩土	<0.5	0.03	9	6	0.12
硬土	≤1.0	0.04	10	9	0.10
软硬土过渡区	1.0	0.11	12	7	0.16
软土 ^① (古湖床)	2.0	0.20	61	21	1.02
软土 ^② (古湖床)	3.0~4.0	0.14	40	22	0.43

注：1. 震害最严重的地区，土的剪切波速 $v_s=20\sim 50\text{m/s}$ 。

2. Texcoco 湖附近。

表 1-3 墨西哥市区不同房屋破坏率

房屋总层数	1~2 层	3~5 层	6~8 层	9~12 层	13~21 层	各种层数房屋总和
倒塌(或严重破坏)比率/%	0.9	1.3	8.4	2.4	10.5	1.4

③ 场地覆盖层厚度的影响。我国建筑抗震设计规范将场地覆盖层的厚度定义为地面至坚硬场地顶面的距离，坚硬场地包括岩土或剪切波速度大于 500m/s 的坚硬土层，但硬夹层或孤石堆等不得作为基岩对待。国内外多次大地震的经验均表明，对于柔性建筑而言，厚土层上的震害比较严重，薄土层上的震害轻，直接建于基岩上的震害更轻。1923 年日本关东大地震，东京都木结构房屋的破坏率，明显的随冲积层厚度的增加而上升。1967 年委内瑞拉加拉加斯 6.4 级地震时，同一地区不同覆盖层厚度的土层上的震害有明显差异，特别是 9~12 层房屋在厚的冲积土层上的房屋破坏率要高得多。1967 年委内瑞

拉加拉加斯地震时房屋破坏率与覆盖土层厚度的关系如图 1-5 所示。从图中震害调查的统计数据可以看出,当土层厚度超过 160m 时,10 层以上房屋的破坏率显著提高,10~14 层房屋的破坏率约为薄土层上的 3 倍,而 14 层以上房屋的破坏率则上升至 8 倍。1968 年和 1970 年菲律宾马尼拉地震中,不同高度的房屋破坏程度同样随冲积层厚度而发生明显变化。1976 年唐山地震中,市区东郊大城山一带,基岩露头,覆盖土层很薄,虽然位于 10 度极震区内,但房屋倒塌率却仅为 50%,而相距数公里的市区西南郊,由于覆盖土层厚度高达 500~800m,房屋倒塌率则为 90% 以上。1976 年我国云南龙陵地震中,盆地外圈花岗岩地基上房屋的倒塌率为 30%,而在土层厚度超过 200m 的盆地中心地带,房屋倒塌率则比基岩上的明显上升,一般为 50%,个别地段上甚至高达 70%。

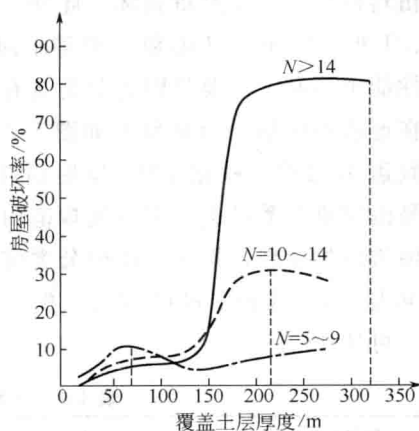


图 1-5 房屋破坏率与覆盖土层厚度的关系

1.1.2 建筑体形和结构布置的基本原则

(1) 简单性 结构的简单性能够保证地震作用具有明确而直接的传递途径,使计算分析模型更容易接近实际的受力状态,所得到的分析结果具有更好的可靠性,据此设计出来的结构其抗震性能更有可靠保证。为了保证结构的简单性,应以建筑体形的简单性为首要前提。国内外多次大地震中都有不少震例表明,凡是建筑体形复杂、不规则,平面上凸出凹进,立面上高低错落,破坏程度一般都较为严重;而建筑体形简单整齐,震害都比较轻微。地震区房屋的建筑平面以方形、矩形、圆形为最佳,正六边形、正八边形、椭圆形、扇形次之,如图 1-6 所示。

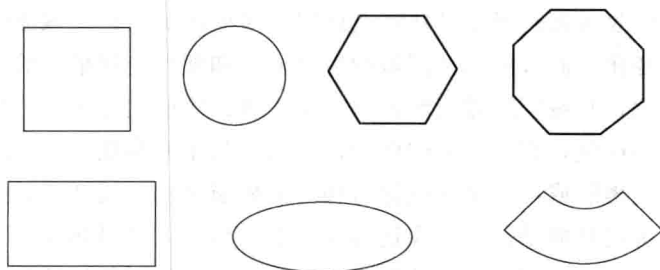


图 1-6 简单的建筑平面形状

三角形平面虽然也属于简单形状的一种,但是,由于它沿主轴方向不完全是对称的,在地震作用下容易发生较强的扭转振动,对抗震会产生不利影响,因而不能作为抗震结构的理想平面形状。例如,1985 年墨西哥地震中,墨西哥城内多数具有三角形平面的建筑

都因扭转振动而产生严重破坏。此外，带有较长翼缘的 L 形、T 形、U 形、H 形和 Y 形等平面型式也对抗震结构的性能也不利，主要是因为此类具有较长翼缘平面的结构在地震动作用下容易发生如图 1-7 所示的差异侧移而导致震害加重。根据 1985 年墨西哥地震震害资料，墨西哥国家重建委员会首都地区规范与施工规程会分析了房屋破坏的原因，按房屋体形分类统计得出的地震破坏率见表 1-4。从表中可以看出，拐角形建筑的破坏率很高，可达 42%。

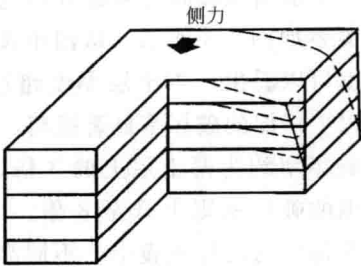


图 1-7 L 形建筑的差异侧移

表 1-4 墨西哥地震中房屋的破坏率

建筑特征	破坏率/%	建筑特征	破坏率/%
拐角形建筑	42	柔性底层	8
刚度明显不对称	15	碰撞	15

(2) 均匀性 结构的均匀性问题通常存在于竖向布置中，由于布置不均匀而产生刚度和强度的突变，引起竖向抗侧力构件的应力集中或变形集中，从而降低了结构抵抗地震的能力，致使地震时结构易发生损坏，甚至倒塌。

结构的均匀性通常以结构构件在平面和竖向上均匀分布为主要特征。当结构抗侧力构件布置满足这一要求时，使地震作用的传递明确而直接，有助于消除局部应力集中和过早屈服的薄弱部位。在薄弱部位将产生较大的弹塑性变形和高延性要求，从而可能引起严重破坏，甚至倒塌。众所周知，结构抗震性能的好坏，除取决于整体的承载力、变形和吸收能力以外，避免局部的抗震薄弱部位是十分重要的。某一层或某一构件，特别是竖向抗侧力构件，均有可能成为结构的抗震薄弱部位，将会导致抗震性能的严重恶化，在抗震设计中应极力避免。结构薄弱部位的形成，往往是由于刚度突变和屈服强度比突变而造成的。刚度突变一般是由于建筑体形复杂或抗震结构体系在竖向布置上不连续和不均匀所造成的。由于建筑功能上的需要，往往将某些楼层处的竖向抗侧力构件截断，造成竖向抗侧力构件的不连续，导致传力路线不明确，从而使局部应力集中，并过早屈服，形成结构薄弱部位，最终可能导致建筑遭到严重破坏甚至倒塌。竖向抗侧力构件截面的突变，也会因刚度和承载力的剧烈变化，而带来局部区域的应力剧增和塑性变形集中的不利影响。

所谓屈服强度比，是按实际截面和材料标准强度计算的实际承载力与罕遇地震作用相应弹性反应计算值的比值，它是影响弹塑性地震反应的重要参数。实际结构的屈服强度比是不均匀的，如果某楼层或某个竖向抗侧力构件的屈服强度比远低于其他各层或其他竖向抗侧力构件，出现抗震薄弱部位，则在地震作用下，将会因过早屈服而产生较大的弹塑性变形，对于这些薄弱部位需要具有高延性的要求。因此，应尽可能地从建筑体形和结构布置上，使刚度和屈服强度变化均匀，尽量减少形成抗震薄弱部位的可能性和减少薄弱程度，力求降低弹塑性变形集中的程度，并采取相应的抗震构造措施来提高结构的延性和变形能力。

1971 年美国圣费南多地震，Olive-View 医院位于 9 度区，主楼遭到严重破坏，这是

一幢刚度和强度在底层突变的建筑的典型震例，其教训值得借鉴。该主楼为六层钢筋混凝土房屋，其剖面如图 1-8 所示。该幢建筑物 3 层以上为框架-剪力墙体系，底层和第 2 层为框架体系，而第 2 层有较多的砖隔墙。该结构上、下层的侧向刚度相差约 10 倍。地震后，上面几层震害较轻，而底层则严重偏斜，纵、横向侧移均达 600mm，角柱出现严重的受压酥碎现象。

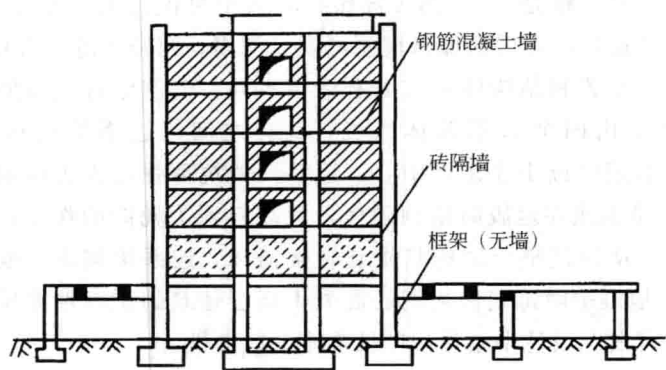


图 1-8 Olive-View 医院主楼剖面

根据均匀性原则，建筑物的立面也要求采用矩形、梯形和三角形等非突变的几何形状，如图 1-9 所示。应尽量避免采用突变性的阶梯形立面，如图 1-10 所示。因为立面几何形状突然变化，必定会带来质量和结构侧向刚度的突变，在突变部位将产生过高的地震反应或过大的弹塑性变形，可能导致建筑严重破坏，应在突变部位采取相应的加强措施。

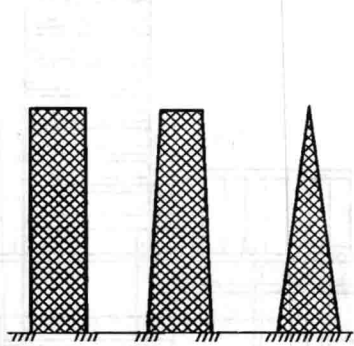


图 1-9 良好的建筑立面

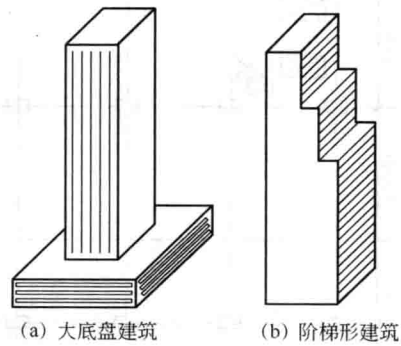


图 1-10 不利于建筑立面的形状

(3) 对称性 对称结构在单向水平地震动下，仅产生平移振动。由于其楼板平面刚度较大，能够起到横隔板作用，各层构件的侧移量相等，水平地震作用则按刚度分配，受力较为均匀。非对称结构由于质量中心与刚度中心不重合，即使在单位水平地震动下也会激起扭转振动，产生平移-扭转耦联振动。由于扭转振动的影响，远离刚度中心的构件侧移量明显增加，从而使所产生的水平地震剪力也随之增大，较易引起破坏，甚至严重破坏。在国内外地震震害调查资料中，不难发现角柱的震害一般较为严重，屡见不鲜，主要因为角柱是受到扭转反应最为显著的部位。

1972 年尼加拉瓜的马那瓜地震，位于市中心的两幢相邻高层建筑的震害对比，有力

地说明了结构偏心会带来严重危害。15 层的中央银行，有一层地下室，采用框架体系，设置两个钢筋混凝土电梯井和两个楼梯间，都集中布置在主楼西端一侧，西端山墙还砌有填充墙，如图 1-11 所示，这种结构布置会造成质量中心与刚度中心明显不重合，偏心很大，显然对抗震极为不利。果不其然，在 1972 年发生地震时，该栋大厦遭到严重破坏，五层周围柱子严重开裂，钢筋屈服，电梯井墙开裂，混凝土剥落，围护墙等非结构构件破坏严重，甚至倒塌。另一幢是 18 层的美洲银行，与中央银行大厦相隔不远。但地震时，美洲银行仅受到轻微损坏，震后稍加修理便可恢复使用。两幢大厦震害程度相差悬殊，主要是因为两者在建筑布置和结构体系方面有诸多不同。美洲银行大厦的结构体系均匀对称，基本抗侧力体系由四个 L 形筒体组成，筒体之间用连系梁对称地连结起来，如图 1-12 所示。由于管道口位于连系梁中心，连系梁的抗剪强度大为削弱，仅为抗弯能力的 35%。这些连系梁虽然在地震时遭到破坏，但却起到了耗能的作用，保护了主要抗侧力构件的抗震能力，从而使整个结构只受到轻微损坏。连系梁破坏是能观察到的主要震害。1972 年马那瓜地震中两幢现代化钢筋混凝土高层建筑的抗震性能所体现出来的巨大差异，说明了在抗震概念设计中结构规则性准则的重要性。

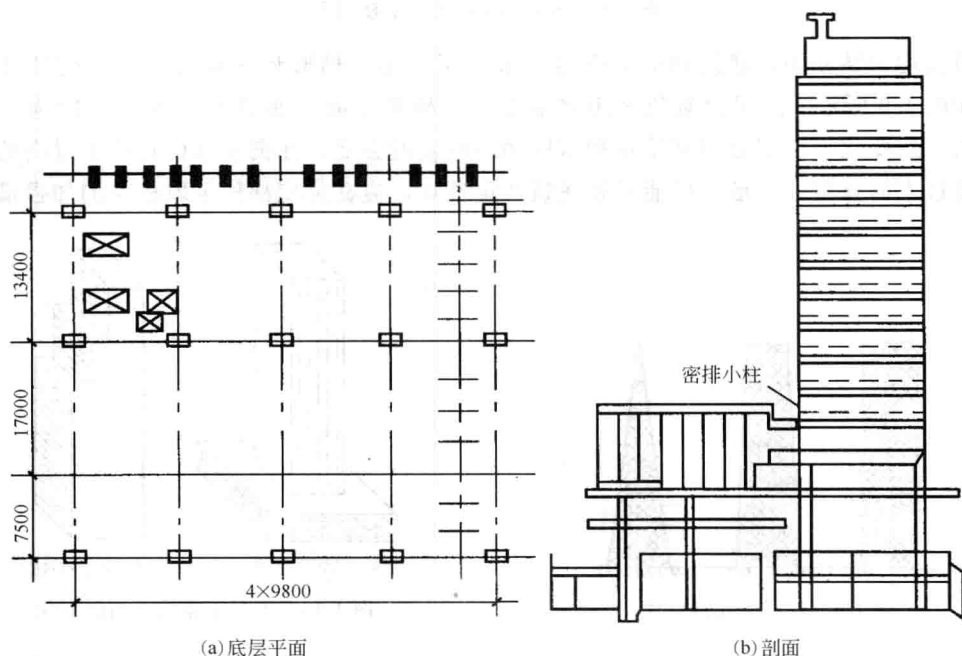


图 1-11 马那瓜中央银行示意图

(4) 赘余度和多道抗震防线 一般来说，超静定的次数越多，对结构的抗震越有利，但是必须设计得当。采用均匀分布结构的构件来增加赘余度，使地震作用下允许结构作用效应具有更有利的塑性重分布的能力，刻意将塑性变形的发展集中在采取特殊构造措施的潜在的塑性铰区，从而使整个结构内具有广泛的塑性变形的能量耗散能力，以达到减少地震反应、减轻地震损坏的目的，使破坏程度限制在能够修复并继续使用的范围内。

在抗震结构中广泛采用的双重结构体系属于设置多道抗震防线的设计思想。我国采用

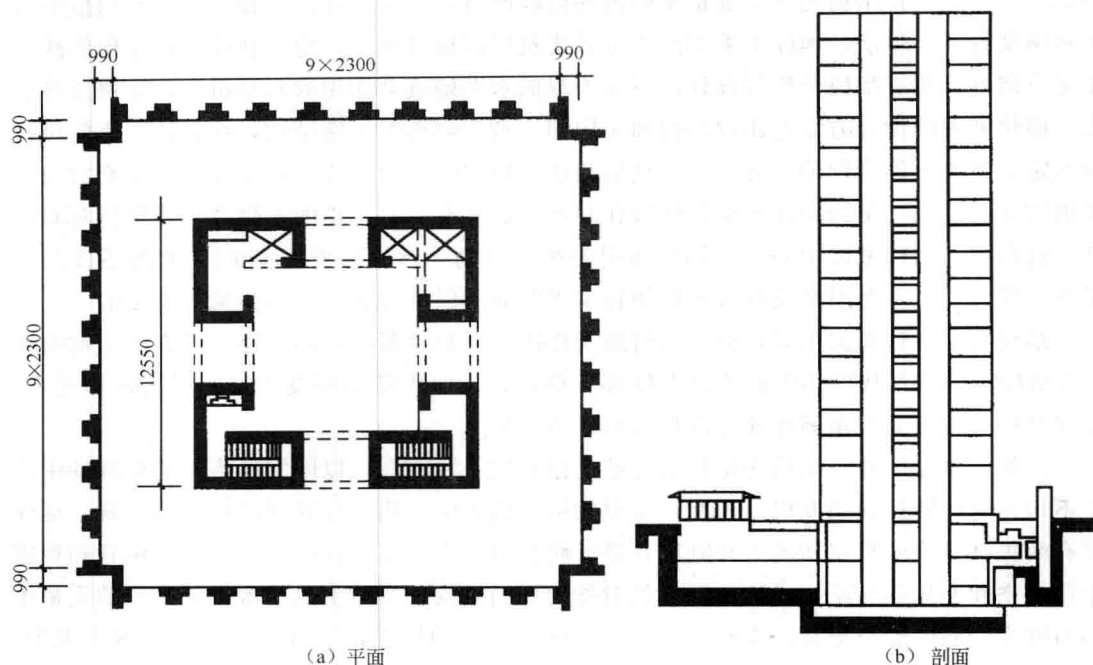


图 1-12 马那瓜美洲银行大厦示意图

得最为广泛的框架-剪力墙双重结构体系，其主要抗侧力构件是剪力墙，是第一道抗震防线，在弹性地震反应阶段，大部分侧向地震力是由剪力墙来承担的，一旦剪力墙开裂或屈服，剪力墙刚度则相应降低，此时框架承担侧向地震力的份额将相应增加，框架部分即成为第二道防线，并在地震动过程中起到支承竖向荷载的重要作用，它承受主要的竖向荷载。

框架-核心筒或框筒-核心筒体系也属于双重结构体系，它与框架-剪力墙体系的不同之处在于，它是由柔性框架和集中在建筑平面中心附近的墙体组合而成的双重结构体系，其抗扭性能明显差于框架-剪力墙双重结构体系，其抗扭刚度一般不能满足下式要求：

$$r/l_s \leq 0.8 \quad (1-1)$$

式中 r ——扭转半径，即所有相应水平方向的扭转刚度与侧向刚度之比的开方；

l_s ——结构平面内的回转半径。

框架填充墙结构体系实际上也是等效双重体系。如果设计得当，填充墙便能增加结构体系的承载力和刚度。在地震动的作用下，填充墙产生裂缝，可大量吸收和消耗地震能量，填充墙实际上起到了耗能元件的作用。填充墙在地震后比较容易修复，但必须采取有效措施来防止填充墙平面外倒塌和框架柱的剪切破坏。

在结构的特定部位上设置专门的耗能元件，例如摩擦耗能或利用材料塑性耗能的元件，以求地震时，有相当一部分的地震输入能量能消耗于这种耗能元件，以减小主体结构的地震作用效应，达到减轻主体结构损坏的目的。

(5) 双向侧向振动和扭转振动的抗力与刚度 水平地震动属于一种双向现象，因此结构必须能抵抗任何方向的水平地震动作用，相应的，结构构件也应布置成能提供任何方向