

工业建筑 抗震设计指南

Gongye Jianzhu Kangzhen Sheji Zhinan

徐建 主编

中国建筑工程出版社



工业建筑抗震设计指南

徐 建 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

工业建筑抗震设计指南/徐建主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 10
ISBN 978-7-112-15783-9

I. ①工… II. ①徐… III. ①工业建筑-防震设计-指南 IV. ①TU27-62②TU352.104-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 207601 号

本书针对工业建筑的抗震设计问题, 以现行国家标准和行业标准为依据, 吸收了国内外最新科研成果、地震震害经验和工程实践, 较全面地总结了工业建筑的震害特征, 有针对性地提出了各类工业建筑的概念设计、抗震计算和抗震构造措施。

本书共分十一章, 包括了抗震设计基本规定, 场地、地基和基础, 地震作用和结构抗震验算, 单层钢筋混凝土柱厂房, 单层钢结构厂房, 单层砖柱厂房, 多层钢筋混凝土厂房, 多层钢结构厂房, 工业建筑消能与隔震设计, 工业建筑抗震鉴定, 工业建筑抗震加固设计。

本书内容丰富、资料齐全, 可供从事建筑工程设计、施工、科研人员及高等院校有关专业师生使用。

责任编辑: 咸大庆 刘瑞霞

责任设计: 李志立

责任校对: 肖 剑 赵 颖

工业建筑抗震设计指南

徐 建 主编

*

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

北京科地亚盟排版公司制版

北京天来印务有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24¼ 字数: 590 千字

2013 年 12 月第一版 2013 年 12 月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-15783-9

(24568)

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)

《工业建筑抗震设计指南》编委会

主 编：徐 建

编 委：黄世敏 辛鸿博 陈 炯

张同亿 李 惠 惠云玲

《工业建筑抗震设计指南》编写分工

第一章 黄世敏 罗开海（中国建筑科学研究院）

第二章 辛鸿博（中冶集团建筑研究总院）

第三章 黄世敏 罗开海（中国建筑科学研究院）

第四章 徐 建 黄尽才（中国机械工业集团有限公司）

刘美琴（中国中元国际工程公司）

陆 锋 王俊永 赵 新 章海斌 丁龙章（中国联合工程公司）

黄 伟（合肥工业大学）

第五章 陈 炯（宝钢工程技术有限公司）

第六章 徐 建 黄尽才（中国机械工业集团有限公司）

刘大海（中国建筑西北设计院）

第七章 张同亿 马付彪（中国中元国际工程公司）

第八章 陈 炯（宝钢工程技术有限公司）

陶 忠（昆明理工大学）

第九章 李 惠 王 建（哈尔滨工业大学）

第十章 惠云玲 张家启 王 玲 李忠煜（中冶集团建筑研究总院）

第十一章 惠云玲 张家启 王 玲 李忠煜（中冶集团建筑研究总院）

序 言

工业建筑由于工艺要求的特殊性，结构空间大，承担荷载重，抗震设计尤其复杂。历次地震震害表明，工业建筑破坏比较严重，地震灾害不仅造成人员伤亡，也会造成机器设备损坏。随着我国工业的快速发展，工业建筑的类型也有很大的变化，对抗震设计提出了更新和更高的要求。虽然我国已有国家标准《建筑抗震设计规范》可以作为设计依据，也有一些设计手册和专业书可供参考，但是在许多情况下还不能满足工程设计的要求。《工业建筑抗震设计指南》从理论和实践上较全面地阐述了各类工业建筑的抗震问题，针对工业建筑抗震中的实际情况给出了解决问题的理论依据和方法，尤其是对一些新型工业建筑的抗震设计作了全面具体的规定，在许多方面比现行国家标准和设计方法有所创新，填补了国内在该领域的不足。该书不仅可以作为工业建筑抗震设计的工具书和参考教材，也为今后抗震设计规范中工业建筑抗震内容的修订奠定了基础。参加本书编写的作者，长期从事工程抗震研究工作，在工业建筑抗震领域有丰富的实践经验和丰硕的研究成果，一些作者还是有关国家标准的主编和主要起草人，该书在工业建筑抗震设计方面具有较强的学术性和实用性，一定会受到工程技术人员的欢迎。

中国工程院院士
重庆大学校长

周绪红

2013年4月

前 言

随着我国工业的发展,工业建筑的材料和结构形式也发生了较大的变化。工业建筑的抗震性能与其他类型建筑相比有其特殊性,如结构跨度大、空间高度高、结构自重大、存在机械设备的振动荷载等,工业建筑的抗震设计方法也经历了不断完善的过程。

我国较早的厂房抗震设计是参照原苏联地震区建筑设计规范,对厂房作近似的计算和采取一些构造措施。

20世纪60年代,我国邢台、河间、阳江、通海、东川地震,为单层厂房的抗震设计提供了依据,特别是积累了单层砖柱厂房的震害经验。在此基础上,1974年正式颁布了我国第一部《工业与民用建筑抗震设计规范》TJ 11—74。

20世纪70年代,我国相继发生海城地震和唐山地震,大量建筑物遭到破坏,一些20世纪50年代建造的钢筋混凝土柱厂房损坏,使人们更加认识到单层厂房抗震问题的重要性。根据海城地震和唐山地震的震害经验和科研成果,修订颁布了《工业与民用建筑抗震设计规范》TJ 11—78。在单层厂房抗震设计方面,该规范对提高厂房抗震薄弱部位的抗震能力作了明确的规定。

20世纪80年代,我国从事工程抗震的科技工作者围绕单层厂房的抗震,开展了一系列理论和科学试验的专题研究,如单层厂房的横向和纵向空间分析、突出屋面天窗架的水平地震作用、不等高厂房中柱地震作用效应的高振型影响、屋架与柱顶连接节点及柱头的抗震性能、单层厂房整体和钢筋混凝土柱的抗震性能、柱间支撑的抗震性能、不等高厂房支承低跨屋盖柱牛腿的抗震性能等,这些成果为《建筑抗震设计规范》GBJ 11—89单层厂房抗震设计部分的修订奠定了基础。

20世纪90年代以来,我国在工程抗震的科学研究和工程实践中取得了较大的进展,国内外发生的澜沧、武定、丽江、伽师、包头、台湾地震及美国旧金山和洛杉矶地震、日本阪神地震,造成了大量建筑物和工程设施的破坏,取得了新的震害经验。2001年,《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001颁布实施。规范在单层厂房抗震设计方面比89规范主要有下列改进:(1)结构布置上增加了厂房过渡跨、平台、上起重机铁梯布置和结构形式的要求。(2)补充了屋架和排架结构选型的要求。(3)完善了钢筋混凝土柱厂房的抗震分析方法,修改了大柱网厂房双向水平地震作用时的组合方法。(4)补充了屋盖支撑布置的规定。(5)补充了排架柱箍筋设置要求和大柱网厂房轴压比控制的要求。(6)增加了砖柱厂房纵向简化计算方法。(7)补充了钢结构厂房结构体系的规定。(8)提出了钢结构厂房按平面结构简化计算的条件。(9)修改了钢构件长细比和宽厚比的规定。(10)增补了钢柱脚的抗震设计方法。

2010年,我国现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010颁布实施,该标准在工业建筑方面根据材料和结构形式的变化,作了较大的改进,主要改进内容有:(1)单层钢筋混凝土柱厂房:补充了高低跨厂房的结构布置和对抽柱厂房的要求;改进了屋面梁的屋盖支撑布置要求;增加了柱顶受侧向约束部位的构造要求;调整了厂房可不验

算抗震承载力的范围，并增加了设置柱间支撑柱脚的抗震承载力验算要求。(2) 单层砖柱厂房：限制了砖柱厂房在 9 度的使用，增补了新型砖砌体材料（页岩砖、混凝土砖）；完善了厂房结构布置的规定，修改了防震缝设置的要求；明确 8 度时木屋盖不允许设置天窗。(3) 单层钢结构厂房：增加了压型钢板围护的单层钢结构厂房的内容。进一步细化了结构布置的要求；补充了防震缝宽度的规定；明确了屋盖横梁的屋盖支撑布置和纵横向水平支撑布置；调整了柱和柱间支撑的长细比限值、提出了根据框架承载力的高低按性能目标确定梁柱板件宽厚比的方法；增加了阻尼比取值和构件连接的承载力验算要求，修改了柱间支撑的抗震验算要求。(4) 多层钢结构厂房：对厂房结构布置、楼盖布置、支撑布置及其长细比限值、支撑承载力计算、框架板件宽厚比、阻尼比取值等方面作出规定。(5) 新增钢筋混凝土竖向框排架厂房的抗震设计要求，根据设计经验和厂房的结构特征，提出了结构布置、抗震验算和构造措施的要求。

本书是在总结国内历次地震中单层工业厂房震害经验的基础上，结合我国单层工业厂房抗震的科学研究和工程实践的成果，根据《建筑抗震设计规范》GB 50011—2001 的设计原则，对单层与多层钢筋混凝土厂房、单层与多层钢结构厂房、单层砖柱厂房的抗震设计方法工业建筑消能与隔振设计、工业建筑抗震鉴定与加固方法进行了深入系统的论述。本书编写的目的是使工程技术人员能够较全面地了解和掌握工业建筑抗震设计的基本原理和概念、抗震设计思想、抗震设计要点和抗震设计方法，并能应用这些原理和方法考虑抗震设计方案和采取相应的措施，对于技术人员解决工程问题具有很好的参考作用。

本书是工业建筑抗震设计方面的一本综合性参考书，在编写过程中得到相关单位和专家学者的大力帮助，中国建筑工业出版社给予大力的支持。杜立波、孙忱、冀筠、高慧贤、刘梅、刘力峰、凌秀美参加了本书的部分编写工作。本书编写过程中，参考引用了一些作者的著作和论文，在此致以谢意！书中不当之处，敬请批评指正。

徐 建

2013 年 4 月

目 录

第一章 抗震设计基本规定	1
第一节 地震震害特征	1
第二节 抗震设防准则	15
第三节 抗震概念设计	21
第四节 材料要求	28
第二章 场地、地基和基础	30
第一节 场地选择	30
第二节 天然地基和基础	35
第三节 液化土和软土地基	38
第四节 桩基础	50
第三章 地震作用和结构抗震验算	55
第一节 地震作用计算	55
第二节 截面抗震验算	72
第三节 抗震变形验算	75
第四章 单层钢筋混凝土柱厂房	89
第一节 一般规定	89
第二节 单层钢筋混凝土柱厂房抗震计算	94
第三节 抗震构造措施	139
第五章 单层钢结构厂房	161
第一节 一般规定	161
第二节 抗震计算	163
第三节 抗震构造措施	179
第六章 单层砖柱厂房	196
第一节 一般规定	196
第二节 抗震计算	199
第三节 抗震构造措施	220
第七章 多层钢筋混凝土厂房	227
第一节 多层钢筋混凝土框架厂房	227
第二节 钢筋混凝土框架-侧向排架厂房	250

第三节 钢筋混凝土框架-顶层排架厂房	273
第八章 多层钢结构厂房	277
第一节 多层钢结构框架厂房	278
第二节 钢结构框排架厂房	295
第九章 工业建筑消能与隔震设计	306
第一节 工业建筑消能设计	306
第二节 工业建筑隔震设计	315
第十章 工业建筑抗震鉴定	319
第一节 工业建筑抗震鉴定基本要求与方法	319
第二节 单层钢筋混凝土柱厂房抗震鉴定	330
第三节 单层砖柱厂房抗震鉴定	346
第十一章 工业建筑抗震加固设计	353
第一节 工业建筑抗震加固设计的基本要求	353
第二节 单层钢筋混凝土柱厂房	357
第三节 单层砖柱厂房	368
参考文献	376

第一章 抗震设计基本规定

第一节 地震震害特征

根据以往地震经验，概括起来，地震期间房屋建筑破坏的直接原因可分为以下三种情况：

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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。

地震中房屋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；结构力学特性又受到建筑的平面布置、体形、结构材料、抗侧力体系、刚度分布等多种因素的制约。因此，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，建筑的破坏状况也各具特点。

尽管每一次地震建筑物的破坏情况各有特点，但其中仍然不乏一些共性、规律性的情况，而这些共性、规律性的东西，即房屋建筑的地震震害特征，对今后进行工程抗震设计无疑具有重要的参考价值和指导作用。

一、场地地基方面

1. 断层错动

发震断裂的突然错动，要释放能量，引起地震动。强烈地震时，断裂两侧的相对移动还可能出露于地表，形成地表断裂。1976年唐山地震，在极震区内，一条北东走向的地表断裂，长8km，水平错位达1.45m。1999年台湾集集地震，地震破裂长度80多公里，最大错动约6.5m，断层所过之处，建筑物无一例外的严重破坏（图1-1、图1-2）。2008年5月12日的汶川大地震，断层长度更是达到了300km，位于断层之上的映秀镇几乎被夷为平地（图1-3）。

2. 山体崩塌

陡峭的山区，在强烈地震的震撼下，常发生巨石滚落、山体崩塌。1932年云南东川地震，大量山石崩塌，阻塞了小江。1966年再次发生6.7级地震，震中附近的一个山头，一侧山体就崩塌了近 $8 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。1970年5月秘鲁北部地震，也发生了一次特大的塌方，塌体以20~40km/h的速度滑移1.8km，一个市镇全部被塌方所掩埋，约两万人丧生。1976年意大利北部山区发生地震，并连下大雨，山体在强余震时崩塌，掩埋了山脚村庄的部分房屋。2008年汶川地震中大量的山体崩塌，北川新县城几乎被滑坡体掩埋

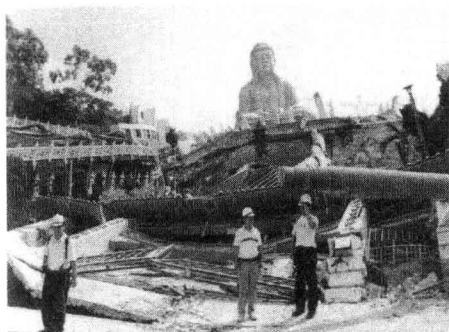


图 1-1 1999 年台湾集集地震，断层切过万佛寺，
庙宇和经舍毁损，仅留七丈高药师佛像

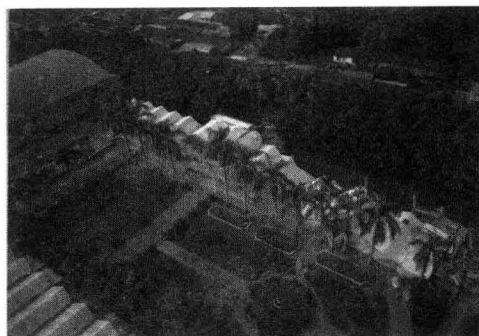


图 1-2 1999 年台湾集集地震，光复
国中三层教室被断层通过全倒



图 1-3 2008 年汶川地震断层
之上的映秀镇几乎被夷为平地

(图 1-4)，山体崩塌产生的巨大滚石，直接造成了建筑的破坏(图 1-5)。所以，在山区选址时，经踏勘，发现有山体崩塌、巨石滚落等潜在危险的地段，不能建房。

3. 边坡滑移

1971 年云南通海地震，山脚下的一个土质缓坡，连同上面的一座村庄向下滑移了 100 多米，土体破裂、变形，房屋大量倒塌。1964 年美国阿拉斯加地震，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滑坡，土体支离破碎，地面起伏不平(图 1-6)。1968 年日本十胜冲地震，一些位于光滑、湿润黏土薄层上面的斜坡土体，也发生了较大距离的滑移。因此，对于那些存在液化或润滑夹层的坡地，也应视为抗震危险地段。

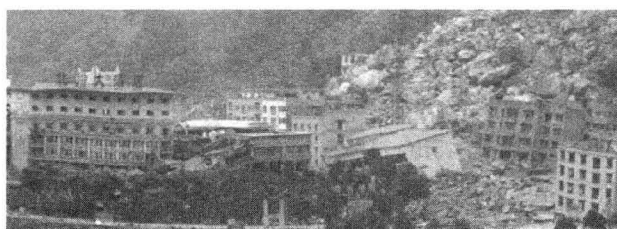


图 1-4 2008 年汶川地震，北川新县城几乎被滑坡掩埋

4. 砂土液化和软土震陷

饱和松散的砂土和粉土，在强烈地震动作用下，孔隙水压急剧升高，土颗粒悬浮于孔隙水中，从而丧失受剪承载力，在自重或较小附压下即产生较大沉陷，并伴随着喷水冒砂。此液化现象的后果是：(1) 建筑物下沉或整体倾斜(图 1-7)；(2) 地基不均匀下沉造成上部结构破坏；(3) 地坪下沉或隆起；(4) 地下竖管弯曲；(5) 房屋基础的钢筋混凝土桩折断。所以，当建筑地基内存在可液化土层时，对于高层建筑，应该采取人工地基，或



图 1-5 2008 年汶川地震中山体崩塌产生的巨大滚石，造成了建筑的破坏



图 1-6 1964 年阿拉斯加大地震引发 Turnagain 高地大面积滑坡

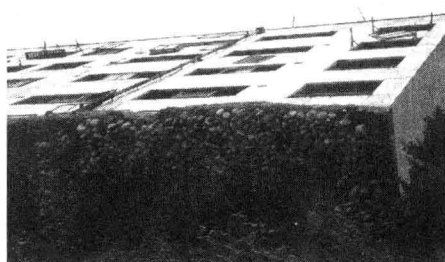


图 1-7 1964 年日本新潟地震，地基液化导致楼房倾斜倒塌

采取完全消除土层液化性的措施。当采用桩基础时，桩身设计还应考虑水平地震力和地基土下层水平错位所带来的不利影响。

泥炭、淤泥和淤泥质土等软土，是一种高压缩性土，抗剪强度很低。软土在强烈地震动作用下，土体受到扰动，絮状结构遭到破坏，强度显著降低，不仅压缩变形增加，还会发生一定程度的剪切破坏，土体向基础两侧挤出，造成建筑物急剧沉降和倾斜。天津塘沽

港地区，地表下 3~5m 为冲填土，其下为深厚的淤泥和淤泥质土。地下水位为 -1.6m。1974 年兴建的 16 幢 3 层住宅和 7 幢 4 层住宅，均采用筏形基础。1976 年地震前，累计下沉量分别为 200mm 和 300mm，地震期间的突然沉降量分别达 150mm 和 200mm。震后，房屋向一侧倾斜，房屋四周的外地坪地面隆起。

二、房屋体形方面

1. 平面形状

从有利于建筑抗震的角度出发，地震区的房屋建筑平面形状应以方形、矩形、圆形为好，正六边形、正八边形、椭圆形、扇形次之（图 1-8），L 形、T 形、十字形、U 形、H 形、Y 形平面较差。1985 年 9 月墨西哥地震后，墨西哥“国家重建委员会首都地区规范与施工规程分会”对地震中房屋破坏原因进行了统计分析。结果表明，拐角形建筑的破坏率达到 42%，明显高于其他形状的房屋。

2. 竖向体型

一般来说，地震区建筑的竖向体型变化要均匀，宜优先采用图 1-9 所示的矩形、梯形、三角形等均匀变化的几何形状，尽量避免过大的外挑和内收。因为立面形状的突然变化，必然带来质量和抗侧刚度的剧烈变化，地震时，该突变部位就会因剧烈振动或塑性变形集中效应而加重破坏。1985 年 9 月墨西哥地震，一些大底盘高层建筑，由于低层裙房与高层主楼相连，没有设缝，体型突变引起刚度突变，使主楼底部接近裙房屋面的楼层变成相对柔弱的楼层，地震时因塑性变形集中效应而产生过大层间侧移，导致严重破坏。

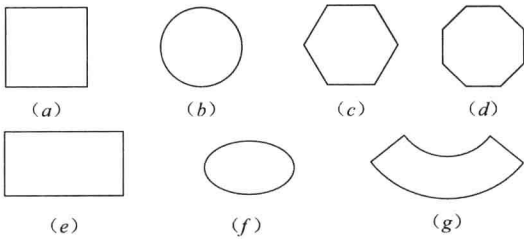


图 1-8 简单的建筑平面形状

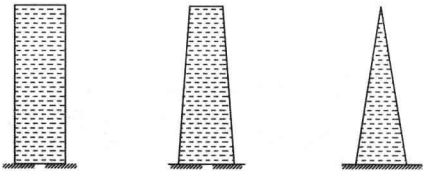


图 1-9 良好的建筑立面形状

3. 房屋高度与高宽比

一般而言，房屋愈高，所受到的地震力和倾覆力矩愈大，破坏的可能性也就愈大。墨西哥市是人口超过一千万的特大城市，高层建筑甚多。1957 年太平洋岸的 7.6 级地震，以及 1985 年 9 月前后相隔 36 小时的 8.1 级和 7.5 级地震，均有大量高层建筑倒塌。1985 年地震中，倒塌率最高的是 10~15 层楼房；6~21 层楼房，倒塌或严重破坏的共有 164 幢。

而抗震设计中，房屋的高宽比是一个比房屋高度更需慎重考虑的问题。因为建筑的高宽比值愈大，即建筑愈高，地震作用下的侧移愈大，地震引起的倾覆作用愈严重。巨大的倾覆力矩在柱中和基础中所引起的压力和拉力比较难于处理。

1967 年委内瑞拉的加拉加斯地震，曾发生明显由于倾覆力矩引起破坏的震例。该市一幢 11 层旅馆，底部三层为框架结构，以上各层为剪力墙结构。底部三层的框架柱，由于倾覆力矩引起的巨大压力使轴压比达到很大数值，延性降低，柱头均发生剪压破坏。另

一幢 18 层框架结构的 Caromay 公寓，地上各层均有砖填充墙，地下室空旷。由于上部砖墙增加了刚度，加大的倾覆力矩，在地下室柱中引起很大轴力，造成地下室很多柱子在中段被压碎，钢筋弯曲呈灯笼状。

1985 年墨西哥地震，墨西哥市内一幢 9 层钢筋混凝土结构，因地震时产生的倾覆力矩，使整幢房屋倾倒，埋深 2.5m 的箱形基础翻转了 45°，并将下面的摩擦桩拔出。

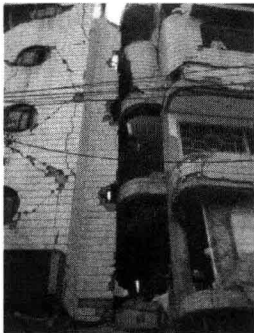
4. 毗邻建筑

在国内外历次地震中，曾一再发生相邻建筑物碰撞的事例。究其原因，主要是相邻建筑物之间或一座建筑物相邻单元之间的缝隙，不符合防震缝的要求。或是未考虑抗震，或是构造不当，或是对地震时的实际位移估计不足，防震缝宽度偏小。

天津友谊宾馆，东段为 8 层，高 37.4m，西段为 11 层，高 47.3m，东西段之间防震缝的宽度为 150mm。1976 年唐山地震时，该宾馆位于 8 度区内，东西段发生相互碰撞，防震缝顶部的砖墙震坏后，一些砖块落入缝内，卡在东西段上部设备层大梁之间，导致大梁在持续的振动中被挤断。1985 年墨西哥地震，相邻建筑物发生互撞的情况占 40%，其中因碰撞而造成倒塌的占 15%。2008 年汶川地震和 2010 年青海玉树地震中，相邻建筑的碰撞破坏现象也是随处可见（图 1-10、图 1-11）。



(a) 抗震缝宽度不够，相邻两栋建筑地震时相互碰撞，导致其中一栋建筑的填充墙倒塌



(b) 8度区某相邻建筑地震中相互碰撞，损坏严重

图 1-10 2008 年汶川地震中相邻建筑的碰撞破坏



(a) 防震缝两侧的结构单体相互碰撞，东侧结构完全倒塌



(b) 西侧结构碰撞产生的斜裂缝清晰可见

图 1-11 玉树州综合职业技术学校女生公寓楼碰撞破坏

三、结构体系方面

1. 平面布局

对称结构在地面平动作用下，一般仅发生平移振动，各构件的侧移量相等，水平地震作用按构件刚度分配，因而各构件受力比较均匀。而非对称结构，由于刚心偏在一边，质心与刚心不重合，即使在地面平动作用下，也会激起扭转振动。其结果是，远离刚心的刚度较小的构件，由于侧移量加大很多，所分担的水平地震剪力也显著增大，很容易因超出允许抗力和变形极限而发生严重破坏，甚至导致整个结构因一侧构件失效而倒塌。

1978 年日本 Miyagiken-Oki 地震中，一幢楼房因底层结构不对称而遭到严重破坏。该楼房底层未砌山墙的一端，框架远离刚心，地震时，该框架因扭转引起的过大层间侧移而折断。1985 年墨西哥地震中，也有一些高层建筑因发生扭转而破坏。一幢楼房，两面临街，全部为大玻璃窗；背街的两面，框架内用砖墙填实，刚度增大很多，造成结构偏心，地震时发生扭转而破坏。美国阿拉斯加地震中，五层框架-剪力墙结构的 Penney 大楼，由于剪力墙的布置不对称，因结构偏心而发生扭转，大块预制板坠落，部分梁柱折断，楼层局部倒塌。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（图 1-12）的震害对比，有力地说明结构偏心会带来多么大的危害。15 层的中央银行，有一层地下室，采用框架体系，两个钢筋混凝土电梯井和两个楼梯间均集中布置在平面右端，同时，右端山墙还砌有填充墙，造成很大偏心。地震时的强烈扭转振动，造成较严重的破坏，一些框架节点损坏，个别柱子屈服，围护墙等非结构部件破坏严重，修复费用高达房屋原造价的 80%。另一幢是 18 层的美洲银行，有两层地下室，采用对称布置的钢筋混凝土芯筒。地震后，仅 3~17 层连梁上有细微裂缝，几乎没有其他非结构部件的损坏。

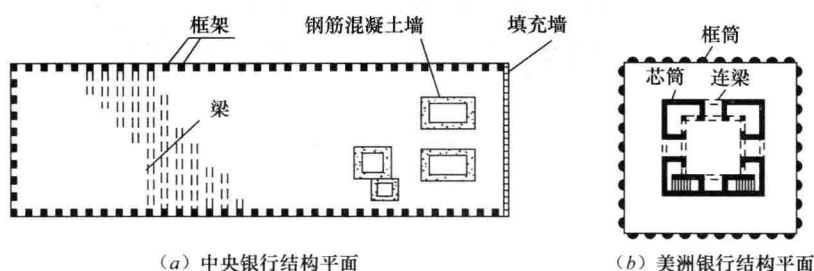


图 1-12 1972 年马那瓜地震中两栋相邻建筑的结构平面简图

国内方面，天津 754 厂 11 号车间（图 1-13），为高 25.3m 的 5 层钢筋混凝土框架体系，全长 109m，房屋两端的楼梯间采用 490mm 厚的砖承重墙，刚度很大；房屋长度的中

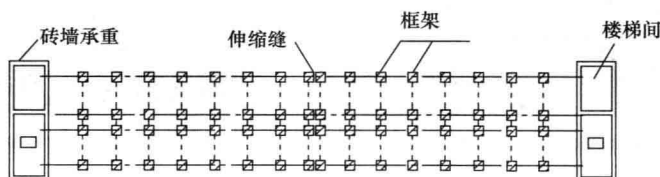


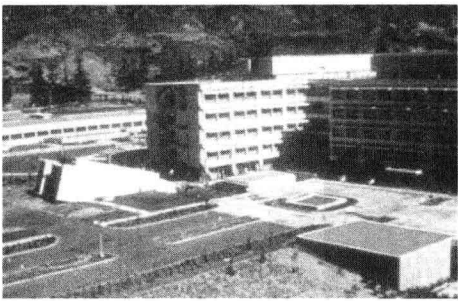
图 1-13 1976 年唐山地震中天津 754 厂 11 号车间结构平面简图

央设双柱伸缩缝，将房屋分成两个独立区段。就一个独立区段而言，因为伸缩缝处是开口的，无填充砖隔墙，结构偏心很大。1976 年唐山地震时，由于强烈扭转振动导致 2 层有 11 根中柱严重破坏，柱身出现很宽的 X 形裂缝。

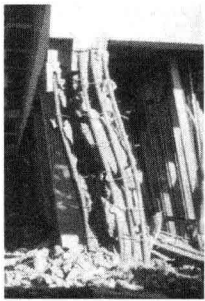
因此，结构平面布置时，应特别注意具有很大抗侧刚度的钢筋混凝土墙体和钢筋混凝土芯筒位置，力求在平面上要居中和对称。此外，抗震墙宜沿房屋周边布置，以使结构具有较强的抗扭刚度和较强的抗倾覆能力。

2. 竖向配置

结构沿竖向的布置宜均匀连续。当结构的侧向刚度、承载力甚至质量沿竖向出现剧烈变化时，极易导致地震时结构严重破坏。1971 年美国圣费尔南多地震中，Olive-View 医院主楼遭受严重破坏，该楼为 6 层钢筋混凝土结构，1、2 层为框架体系，2 层有较多砖填充墙，3 层及以上为框架-抗震墙体系，结构上下的抗侧刚度相差约 10 倍。地震时，上部几层破坏轻微，而底层严重偏斜，纵、横向侧移均达 600mm 左右，角柱酥碎（图 1-14）。



(a) 奥立唯 (Olive View) 医院破坏(全景)



(b) 一层柱破坏(局部)

图 1-14 1971 年圣费尔南多地震，Olive-View 医院破坏严重，一层几乎完全倒塌

1995 年日本阪神 (Kobe) 地震中，相当一部分建筑出现了中间楼层倒塌破坏的现象 (图 1-15、图 1-16)，究其原因，主要是因为这些建筑下部的 5~6 层为劲性混凝土柱，上部采用普通混凝土柱，过渡楼层的刚度、承载力均发生较大变化，从而形成薄弱楼层，进而破坏。



图 1-15 阪神地震某医院中间薄弱层（第五层）倒塌，首层完好

3. 多道防线的设置

一次巨大地震产生的地面运动，能造成建筑物破坏的强震持续时间，少则几秒，多则

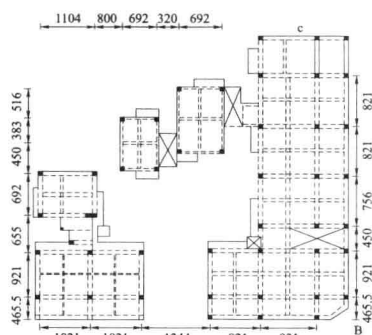


图 1-16 阪神地震，神戸市政府办公楼 2 号馆（8 层）的第 6 层被错平

几十秒，有时甚至更长（比如汶川地震的强震持续时间达到 80s 以上）。如此长时间的震动，一个接一个的强脉冲对建筑物产生往复式的冲击，造成积累式的破坏。如果建筑物采用的是仅有一道防线的结构体系，一旦该防线破坏后，在后续地面运动的作用下，就会导致建筑物的倒塌。1999 年台湾集集地震中，大量单跨框架结构房屋严重破坏、甚至倒塌（图 1-17~图 1-19），主要是由于建筑结构的防线少，冗余度严重不足所致。



(a) 倒塌现场照片

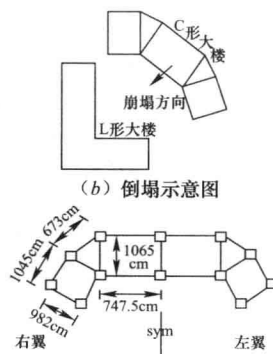


(b) 结构平面简图

图 1-17 1999 年集集地震中云林县中山国宝二期大楼，12 层混凝土框架结构，由于防线少，冗余度不足，东侧六楼以下，西侧五层以下倒塌



(a) 倒塌照片



(b) 倒塌示意图



(c) 平面布置图

图 1-18 1999 年集集地震中彰化县员林镇龙邦富贵名门大楼，16 层混凝土单跨框架结构，防线少，冗余度不足，倒塌