

高层混凝土结构

抗震设计要点、难点及实例

GAOCENG HUNNINGTU JIEGOU
KANGZHEN SHEJI YAODIAN NANDIAN JI SHILI

建筑结构抗震设计丛书

李国胜 编
胡庆昌 审

中国建筑工业出版社

建筑结构抗震设计丛书

高层混凝土结构抗震设计 要点、难点及实例

李国胜 编
胡庆昌 审

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

高层混凝土结构抗震设计要点、难点及实例/李国胜编.

北京:中国建筑工程出版社,2009

(建筑结构抗震设计丛书)

ISBN 978-7-112-10835-0

I. 高… II. 李… III. 高层建筑-混凝土结构-结构设计:
抗震设计 IV. TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 038885 号

本书针对高层混凝土结构抗震设计的要点、难点,较全面地介绍了地震的成因、地震作用的特点和国内外多次有代表性的地震震害情况;论述了建筑结构抗震设计的重要概念、基于性能的抗震设计和防止房屋连续倒塌的方法;依据国家、行业及地方标准,以及近年来收集到的国内外有关资料,提出了各类高层混凝土结构的抗震设计要点、难点的解决方法。本书共六章,包括:建筑抗震设计的重要概念,高层混凝土结构的抗震设计,高层钢筋混凝土结构的抗震设计要点及工程实例,高层建筑竖向转换结构抗震设计要点及工程实例,多塔楼、连体、错层、体型收进及悬挑结构抗震设计要点及工程实例,超高层建筑结构的抗震设计要点及工程实例。全书附有许多工程实例。

本书可供建筑结构设计、施工图审查、监理、施工、科研人员及大专院校土建专业师生参考使用。

* * *

责任编辑:咸大庆 刘瑞霞

责任设计:董建平

责任校对:兰曼利 陈晶晶

建筑结构抗震设计丛书

高层混凝土结构抗震设计要点、难点及实例

李国胜 编

胡庆昌 审

*

中国建筑工程出版社出版、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

北京密东印刷有限公司印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:30¼ 字数:755千字

2009年7月第一版 2009年7月第一次印刷

印数:1—3500册 定价:62.00元

ISBN 978-7-112-10835-0

(18082)

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)

前 言

QIANYAN

我国是世界上多地震国家之一，地震活动频度高，强度大，震源浅，分布广，是一个震灾严重的国家。新中国成立后近 60 年中，遭受 7 级以上大地震多次，例如，1966 年河北邢台；1970 年云南通海；1976 年河北省唐山；1999 年台湾；2001 年昆仑山口；2008 年四川汶川等等。地震是严重危及人类生命财产的自然界灾害，历次地震总会发现一些新问题，各国从地震灾害中不断总结教训和经验，并通过试验修订和完善建筑抗震设计规范，提高抗震防灾的能力。

抗震设计到目前仍不成熟，很大程度靠工程师的判断，而判断则来自概念的积累，抗震概念来自实际震害的分析和结构的试验研究。

本书针对高层建筑钢筋混凝土结构的抗震设计如何实现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的目标，尤其是如何防止连续倒塌，参照现行规范、规程，收集了近年来国内外不断涌现的新技术新经验、有关资料和科研成果编写而成，并附有工程实例，内容共分六章。有些内容与我国现行规范、规程不完全一致，供读者参考和探讨。

本书编写中得到全国结构设计大师胡庆昌的指导，全书稿由他进行了审定，在编写过程中还得到其他同志的帮助，特此表示感谢。编写中参考和引摘了许多文献资料，对原作者深表谢意。限于编者水平，有不当或错误之处在所难免，热忱盼望读者指正，编者将不胜感谢。



目 录

CONTENTS

第一章	建筑抗震设计的重要概念	1
第一节	地震作用	1
第二节	建筑结构的不规则性	12
第三节	地震作用倾覆力矩对高层建筑结构的影响	34
第四节	地震时建筑物之间的撞击	39
第二章	高层混凝土结构的抗震设计	46
第一节	建筑结构的抗震设计理论和方法	46
第二节	结构抗震设计的内容	68
第三节	钢筋混凝土房屋的抗震设计要求	89
第四节	高层建筑结构水平位移限值	107
第五节	防止房屋结构连续倒塌	115
第六节	高层建筑结构的基础设计	140
第三章	高层钢筋混凝土结构的抗震设计要点及工程实例	168
第一节	高层钢筋混凝土结构抗震设计概念	168
第二节	框架结构	202
第三节	剪力墙结构	224
第四节	框架-剪力墙结构	257
第四章	高层建筑竖向转换结构抗震设计要点及工程实例	275
第一节	结构特点及类型	275
第二节	底部大空间剪力墙结构	279
第三节	搭接柱转换结构	291
第四节	斜撑转换结构	298
第五节	工程实例	305



第五章	多塔楼、连体、错层、体型收进及悬挑结构抗震设计要点及工程实例	330
第一节	多塔楼结构	330
第二节	连体结构	336
第三节	错层结构	368
第四节	体型收进结构及悬挑结构	376
第六章	超高层建筑结构的抗震设计要点及工程实例	378
第一节	超高层建筑的结构体系	378
第二节	混合结构	379
第三节	钢管混凝土柱及钢骨混凝土柱和墙	393
第四节	筒体结构	408
第五节	工程实例	436
	参考文献	474



第一章

建筑抗震设计的重要概念

第一节 地震作用

一、地震和地震作用

1. 地震和刮风、下雨一样是一种自然现象，是由地球内部引起的地表震动。地震的类型可分为三类：构造地震、火山地震、塌陷地震。构造地震，是由于地下深处岩层错动、断裂所造成，这类地震发生的次数最多，约占全世界地震的 95% 以上；火山地震，是由于火山作用，如岩浆活动、气体爆炸等引起，只有在火山活动地区才有可能发生，这类地震只占全世界地震的 7% 左右；塌陷地震，是由于地下岩洞或矿井顶部塌陷而引起，这类地震只在小范围发生，次数很少，往往发生在溶洞密布的石灰岩地区或大规模地下开采的矿区。

构造地震是造成灾害的主要地震，也是高层建筑及其他工程抗震设计需要考虑的地震。

2. 一次地震只有一个震级，震级是根据地震时释放的能量大小确定的，震级相差一级，能量相差 30 倍左右，国际上现行震级定义是 1935 年里希特(Richter)给出的，称为里氏震级。地震烈度是地震波及范围内建筑物和构筑物遭受破坏的程度，地震烈度有两种定义：第一，地区建筑物的抗震设防烈度，我国各地区的抗震设防烈度可由《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001)(2008 年版，简称《抗震规范》)附录 A 查得；第二，地震发生后地震波及范围内各地区建筑物、构筑物遭受破坏的地震烈度，可由表 1-1-1 查得。一次地震在震中的烈度在数值上约为震级的 1.3~1.4 倍，见表 1-1-2。某一地区地表和建筑物遭受地震影响的平均强弱程度用烈度表示，烈度因地而异，与震级、震中距、传播介质、场地土质等因素有关。我国将地震烈度分为 12 度，见表 1-1-1。

中国地震烈度表(1980) 表 1-1-1

烈度	人的感觉	一般房屋		其他现象	参考物理指标	
		大多数房屋震害程度	平均震害指数		加速度(mm/s ²) (水平向)	速度(mm/s) (水平向)
1	无感					
2	室内个别静止中的人感觉					



续表

烈度	人的感觉	一般房屋		其他现象	参考物理指标	
		大多数房屋震害程度	平均震害指数		加速度(mm/s ²) (水平向)	速度(mm/s) (水平向)
3	室内少数静止中的人感觉	门、窗轻微作响		悬挂物微动		
4	室内多数人感觉; 室外少数人感觉; 少数人梦中惊醒	门、窗作响		悬挂物明显摆动, 器皿作响		
5	室内普遍感觉; 室外多数人感觉; 多数人梦中惊醒	门窗、屋顶、屋架颤动作响, 灰土掉落, 抹灰出现微细裂缝		不稳定器物翻倒	310 (220~440)	30 (20~40)
6	惊慌失措, 仓惶逃出	损坏——个别砖瓦掉落、墙体微细裂缝	0~0.1	河岸和松软土上出现裂缝。饱和砂层出现喷砂冒水。地面上有的砖烟囱轻度裂缝、掉头	630 (450~890)	60 (50~90)
7	大多数人仓惶逃出	轻度破坏——局部破坏、开裂, 但不妨碍使用	0.11~0.30	河岸出现坍方。饱和砂层常见喷砂冒水。松软土地裂缝较多。大多数烟砖囱中等破坏	1250 (900~1770)	130 (100~180)
8	摇晃颠簸, 行走困难	中等破坏——结构受损, 需要修理	0.31~0.50	干硬土上亦有裂缝。大多数砖烟囱严重破坏	2500 (1780~3530)	250 (190~350)
9	坐立不稳; 行动的人可能摔跤	严重破坏——墙体龟裂, 局部倒塌, 复修困难	0.51~0.70	干硬土上有许多地方出现裂缝, 基岩上可能出现裂缝。滑坡、坍方常见。砖烟囱出现倒塌	5000 (3540~7070)	500 (360~710)
10	骑自行车的人会摔倒; 处于不稳状态的人会摔出几尺远; 有抛起感	倒塌——大部倒塌, 不堪修复	0.71~0.90	山崩和地震断裂出现。基岩上的拱桥破坏。大多数砖烟囱从根部破坏或倒毁	10000 (7080~14140)	1000 (720~1410)
11		毁灭	0.91~1.00	地震断裂延续很长。山崩常见。基岩上拱桥毁坏		
12				地面剧烈变化, 山河改观		

注: 1. 1~5 度以地面上人的感觉为主; 6~10 度以房屋震害为主, 人的感觉仅供参考; 11、12 度以地表现象为主。11、12 度的评定, 需要专门研究。

2. 一般房屋包括用木构架和土、石、砖墙构造的旧式房屋和单层或数层的、未经抗震设计的新式砖房。对于质量特别差或特别好的房屋, 可根据具体情况, 对表列各烈度的震害程度和震害指数予以提高或降低。

3. 震害指数以房屋“完好”为 0, “毁灭”为 1, 中间按表列震害程度分级。平均震害指数指所有房屋的震害指数的总平均值而言, 可以用普查或抽查方法确定之。

4. 使用本表时可根据地区具体情况, 作出临时的补充规定。

5. 在农村可以自然村为单位, 在城镇可以分区进行烈度的评定, 但面积以 1 平方公里左右为宜。

6. 烟囱指工业或取暖用的锅炉房烟囱。

7. 表中数量词的说明: 个别: 10% 以下; 少数: 10%~50%; 多数: 50%~70%; 大多数: 70%~90%; 普遍: 90% 以上。



地震震级、能量释放、加速度、烈度对应关系 表 1-1-2

时 间	地 点	震 级	能量释放 TNT(t)	加速度(Gal)	烈 度
1957	旧金山	5.3	500	52	7.1
1933	长滩	6.3	15800	190	8.6
1940	El Centro	7.1	250000	540	10.1
1906	旧金山	8.2	12.55×10^6	2000	11.7
1964	阿拉斯加	8.5	31.55×10^6	3100	12.3

3. 地震发生的地方称“震源”，震源在地表的投影称“震中”，震源至地面的垂直距离称为“震源深度”。通常把震源深度在 60km 以内的地震称浅源地震，60~300km 称中源地震，300km 以上称深源地震，到目前为止观测到的最深地震震源是 700km，世界上绝大部分地震是浅源地震，震源深度在 5~20km 左右，中源地震比较少，而深源地震为数甚少。一般情况，对于同样震级的地震，当震源较浅时，波及范围较小，而破坏程度较大；当震源深度较大时，波及范围则较大，而破坏的程度相对较小。地面某一位置至震中的距离称为震中距。

地震动的特性可以用峰值(最大振幅)、频谱和持续时间三个要素来描述。峰值是指地震加速度、速度、位移三者之一的峰值、最大值或某种意义的有效值(如：有效峰值加速度)；峰值反映了地震动的强弱程度或地震动的能量。地震动不是单一频率的简谐振动，而是有很多频率组成的复杂振动。工程中用加速度反应谱表征地震动的频谱特征。加速度反应谱是通过一定阻尼比的单自由度弹性体系的地震反应计算得到的曲线，其纵轴为谱加速度，横轴为周期。不同地震加速度时程、相同阻尼比的反应谱曲线不同；同一地震加速度时程、不同阻尼比的反应谱曲线也不同，阻尼比大，相同周期对应的谱值小。增大房屋建筑结构的阻尼，如设置阻尼器等，可以减小结构的地震反应。最大加速度谱值对应的一个周期(频率)或周期范围(频率范围)称地震动的主要周期(主要频率)。若房屋建筑的基本频率与地震动的主要频率相同或接近，则会发生类共振，引起结构严重破坏甚至倒塌。地震动的持续时间是指地震的振动时间，有多种定义。地震动的持续时间越长，可能产生的震害越大。地震动的三要素与震级、震源深度、震中距、传播介质的特性和场地特性等有关。一般而言，震级大、震源浅、震中距小，则峰值大；近震或坚硬土，地震动的高频成分丰富；大震、远距、软土，地震动的低频成分为主，且持续时间长。

二、地震作用的特点

地震对建筑物作用的特点，可以归纳为下述三个方面：

1. 不确定的、不可预知的作用

地震的不确定、不可预知有多方面的含义。其一是指地震发生的时间、地点、强度是不确定的、随机的。地震是在毫无警告的情况下发生的。预期不会发生大震的地方却发生毁灭性的地震，预期会发生地震的地方却没有地震。按 6 度抗震设防的唐山，1976 年地震达 7.8 级，损失惨重。美国加州中部的 Parkfield 小镇，在 20 世纪 90 年代前的 100 年间，每 22 年发生一次中等强度以上的地震，当时估计下一次地震在 1993 年。80 年代中期，美国国家地质调查局花费了大量财力、人力在 Parkfield 安装仪器设备，希望能观察到地震



前的预兆、预报地震,但1993年过去了好多年,地震一直没有发生。1995年前,日本一直认为东海会发生大震,但1995年1月17日,毫无抗震防灾准备的大阪、神户附近的淡路岛却发生了强烈地震,死亡8000多人,经济损失近1000亿美元。地球上的任何一个地方都有可能发生地震。地震不确定性的另一个含义是指没有两次地震的特性是相同的,不同地点同一地震的特性不同,同一地点不同地震的特性也不同。地震的随机性,给建筑结构时程分析时选用地震加速度时程带来困难。

2. 短时间的动力作用

到目前为止持续时间最长的地震是1964年3月发生的美国阿拉斯加地震,约7分钟。一般而言,一次地震的持续时间为1分钟左右,持续时间长的也就是3分钟左右,但造成的破坏却极大。20世纪地震造成的死亡超过200万人,振动时间的总和不到1小时。地震是在短时间内造成巨大灾害的一种自然力量。地震通过地基的摇晃,使建筑结构产生前后、左右、上下的振动,从而使结构产生加速度和惯性力,造成结构破坏甚至倒塌。地震对建筑结构产生的是动力作用,地震发生时,结构加速度的方向和惯性力的方向、大小不断变化。惯性力的大小与地震动的特性有关,与建筑结构本身的动力特性、承载能力等有关。

3. 有选择的破坏作用

地震动是由不同周期的振动组成的,地震动的传播过程非常复杂,但有下列主要规律:短周期的振动衰减快,传播的距离短,长周期的振动衰减慢,传播的距离远;硬土中长周期的振动衰减快、短周期振动的成分多,软土中短周期的振动衰减快、长周期振动的成分多。如果建筑结构的基本频率与地震动振幅大的频率相同或接近,则结构的地震反应相对较大,有可能造成破坏或倒塌;反之,结构的反应小,破坏小,甚至没有破坏。震中附近,硬土上层数少的建筑结构破坏严重;在距离震中远、震级比较大的地震作用下,软土上层数多的建筑结构破坏严重。这就是所谓的地震有选择的破坏作用。

1923年日本关东地震,硬土上刚度大的结构破坏严重,而软土上刚度大的结构破坏不严重。原因是硬土上地震动频率高的成分的能量大,软土上地震动相对低频成分的能量大。1985年墨西哥地震,7.2级,震中距墨西哥城280km,墨西哥城基岩上地震动的峰值加速度为 $0.035g$ 左右,而原河床上地震动的峰值加速度为 $0.166g$ 、主要周期为 $2\sim 3s$ 。峰值加速度增大,主要周期加长,引起层数为14层左右的建筑严重破坏或倒塌。另一个突出的例子是1967年7月29日委内瑞拉加拉加斯地震,6.3级,震中距63km,房屋建筑破坏率与土层厚度关系如图1-1-3所示。土层厚度50m左右的场地,3~5层建筑物的破坏率大;土层厚度大于160m时,10层以上建筑物、尤其是14层以上建筑物的破坏率显著增大;一些地区地震动的主要周期为 $1.42s$,基本周期为 $0.9\sim 1.5s$ 的建筑大量破坏。

三、地震震害概况

1. 我国地震灾害严重的主要原因

(1) 我国处于世界上两个最活跃的地震带上,一是环太平洋地震带(我国东部地区);一是欧亚地震带(我国西部及西南部是其通过地区)。因而我国是有数的多地震国家之一。

地震给人类带来了巨大灾害,而且,不论从有史可考的记载,还是从近代的统计,我



国的地震灾害为全球之冠。地震造成的人员伤亡，中国居世界首位。1556年1月23日陕西华县8级地震，死亡83万人，是有史以来全世界地震中死亡人数最多的一次。进入20世纪后，1920年12月16日宁夏海源8.5级地震，在人口较疏地区，死亡20余万人，1976年7月28日河北唐山7.8级地震，死亡24.2万人，伤残16.4万人，也是世界上近代大地震中伤亡最多的一次。

(2) 地震区分布广。据历史记载，全国除个别省以外，都发生过6级以上地震。需要考虑抗震设防地震基本烈度在6度以上的地区面积占全国陆地国土面积的60%(见表1-1-3)。由于地震活动范围广，震中分散，难以捕捉地震发生的具体地点，集中防御。

中国地震基本烈度面积分类 表 1-1-3

地震基本烈度分类	面积(10 ⁴ km ²)	百分比(%)
5度及其以下地区	384.5	40.1
6度区	263.5	27.4
7度区	206.4	21.55
8度区	71.3	7.37
9度区	23.6	2.46
10度及其以上地区	10.7	1.12
合 计	960.0	100.00

(3) 位于地震区的大中城市多。我国大中城市中70%在7度以上的地震区，特别是一批重要城市包括北京、西安等特大城市都位于地震基本烈度8度的高烈度地震区。

(4) 由于地震基本烈度难以确切预测，我国不少强震发生在6度和7度区，造成很大损失。例如，从1966年进入我国第四个地震活动高潮以来，在原确定地震基本烈度为6度的地区发生了一系列强或中强地震，造成不同程度的破坏，其实例见表1-1-4。

在原定基本烈度6度区实际发生的地震 表 1-1-4

序号	发震地点	时间	震级 M	震中烈度	序号	发震地点	时间	震级 M	震中烈度
1	河北邢台	1966.3.8	6.5	8	8	内蒙博克图	1981.4.26	5.6	7
2	河北邢台	1966.3.22	7.2	10	9	内蒙丰镇	1981.8.13	5.8	7
3	广东阳江	1969.7.26	6.4	8	10	新疆布尔津	1982.3.20	5.2	7-
4	江苏溧阳	1974.4.22	5.4	7	11	黑龙江龙镇	1986.2.9	5.0	7-
5	辽宁海城	1975.2.4	7.3	9	12	黑龙江北安	1986.3.1	5.3	7-
6	河北唐山	1976.7.28	7.8	11	13	四川汶川	2008.5.12	8.0	11
7	江苏溧阳	1979.7.9	6.0	8					

(5) 建筑物抗震能力低。新中国成立后新建工程一般均未考虑抗震设防，25年后于1974年才颁发第一本《工业与民用建筑抗震设计规范》，逐渐考虑抗震设防。在此以前建造的大量房屋和工程设施，难以抵御地震的袭击。旧中国遗留下来的老旧房屋、广大的农村房屋、土石结构房屋、南方地区的空斗墙、半砖墙房屋等建筑抗震性能差，因而带来生命和财产的严重损失。例如在20世纪70年代全球震害较重的10年中，日本发生14次地震，死129人。美国发生12次地震，死65人。中国的10次地震死26.37万人。其中唐山市因过去未考虑建筑抗震设防，在大地震中85%的房屋倒塌或严重破坏，是造成死亡



24.2 万人的主要原因。从上述日、美、中三国地震死亡人数的对比，可以了解抗震设防的重要意义。

(6) 强震的重演周期长。我国灾难性强震的重演周期大多在百年甚至数百年。如河北省历史上发生过三次 7.5 级以上的强震(1679 年三河、平谷 8 级地震, 1830 年磁县 7.5 级地震和 1976 年唐山 7.8 级地震), 发震时间分别相隔 151 年和 146 年; 山西省历史上发生过三次 7.5 级以上的强震(512 年代县 7.5 级地震, 1303 洪县 8 级地震, 1695 年临汾 8 级地震), 发震时间分别相隔 791 年和 392 年; 山东省 1668 年郯城 8.5 级地震和 1937 年菏泽 7 级地震相隔 269 年。由于强震重演的周期长, 就容易在现实生活中忽视地震灾害的威胁, 实际目前全球各国地震的预报可靠性尚无太大把握, 重现期也资料不多, 无法排除大地震突发或提前发生的可能性; 以抗震技术最发达的日本而言, 1995 年阪神大地震就是始料不及的, 因此, 不可忘却历史上的惨痛教训, 心存侥幸, 对抗震防灾的重要性认识不足, 放松警惕, 对突发性震害思想麻痹, 疏忽房屋建设和工程建设中应有的抗震设防措施。或是地震来临时紧张一阵, 过后却不认真对现有房屋进行抗震鉴定与加固, 以致坐失良机, 震害重演。

2. 建筑结构的震害

人们主要通过三条途径认识地震对建筑结构的影响以及结构的抗震能力, 即: 试验研究、计算分析和地震灾害调查。地震是对建筑结构抗震能力的直接检验。在震害调查、科学研究、总结设计成功经验和失败教训的基础上, 修订抗震设计规范, 完善抗震概念设计和设计方法, 提高结构抗震能力。可以相信, 随着对地震影响认识的深入和抗震设计水平的提高, 建筑结构的震害会越来越少。历史上钢筋混凝土房屋建筑结构的震害主要表现在下述几个方面:

(1) 扭转引起破坏。结构平面布置严重不对称, “刚度中心”严重偏离质量中心, 地震中由于结构扭转造成破坏。例如, 1972 年尼加拉瓜地震, 楼梯、电梯间和砌体填充墙集中布置在平面一端的 15 层中央银行严重破坏。

(2) “软弱层”或“薄弱层”破坏。结构某一层的抗侧刚度或层间水平承载力突然变小, 形成所谓“软弱层”或“薄弱层”, 地震时, 这一层的塑性变形过大甚至超过结构的变形能力, 或这一层的承载能力不足, 引起结构构件严重破坏, 或楼层塌落, 或结构倒塌。典型的震害有: 1971 年美国圣弗南多地震使 Olive-View 医院主楼底层柱严重破坏, 残余侧向位移达 60cm; 1995 年日本阪神地震中, 大量多层和高层建筑的空旷底层严重破坏或倒塌, 中部某一楼层坍塌, 其主要原因是钢骨混凝土柱改为钢筋混凝土柱, 刚度和承载力都变小; 1999 年我国台湾集集地震, 许多底层空旷的建筑严重破坏或倒塌。

(3) 地基液化建筑整体倾倒。砂土液化, 使地基丧失承载力, 上部结构整体倾斜、倒塌。最有名的例子是 1964 年日本新泻地震中, 建筑结构整体倾倒。

(4) 鞭梢效应破坏。结构顶部收进过多, 抗侧刚度急剧减小, 地震中出现鞭梢效应, 使结构局部破坏。

(5) 碰撞破坏。地震中相邻结构碰撞破坏, 或一幢建筑倒塌, 压在相邻建筑上, 引起相邻建筑破坏甚至倒塌。

(6) 相邻建筑之间的连廊塌落。1976 年唐山地震、1995 年阪神地震和 1999 年台湾集集地震中, 都有连廊塌落的震害。



(7) 框架柱破坏。框架柱的破坏形式比较多,例如:短柱剪切破坏;梁-柱核芯区剪切破坏;承载力不足、柱折断破坏;箍筋不足引起纵筋压屈成灯笼状、混凝土压碎;角柱破坏较中间柱的破坏严重;框架内的刚性填充墙不到顶,使上部柱成为短柱,且增大了柱的刚度,承受比设计计算大得多的地震作用,柱由于承载能力不足而破坏甚至引起结构局部倒塌。

(8) 剪力墙破坏。主要震害有连梁剪切破坏,墙肢出现剪切裂缝或水平裂缝。

框架梁的震害比较少,究其原因,主要是计算梁的受弯承载力时,不考虑现浇楼板钢筋对梁的承载力的增大作用,即使是按强柱弱梁设计的框架也可能成为强梁弱柱,地震中柱破坏,而梁不破坏。

剪力墙结构或设置剪力墙(筒)的结构,其震害比框架结构轻得多,其原因是剪力墙的刚度大,地震作用下结构的侧移小。合理设置剪力墙,是避免钢筋混凝土房屋建筑震害的重要途径之一。

虽然有大量的震害可供研究,但人类对地震的认识、对于房屋建筑地震震害原因的认识还是很有限的,比如,同一地点、两幢完全相同的房屋建筑,地震时一幢倒塌、一幢没有倒塌,其原因就很难说得清楚。

3. 震害经验及教训

世界上一些大城市先后发生了若干次大地震,有的震中就在城区中心。通过震害分析对高层建筑的破坏规律逐步有了更多的认识,从而推动了科研工作,并取得了抗震设计经验。

1963年南斯拉夫司考比地震证明框剪结构抗震性能有明显的优越性,即使是无配筋的剪力墙,墙开裂但框架完好。

1964年日本新潟地震,对砂土地基液化问题引起重视。地基软,柔性结构破坏严重,刚性建筑整体倾斜,有的倾倒。

1964年美国阿拉斯加地震,有些十几层高的剪力墙结构遭受破坏,有洞口剪力墙的洞口梁均有破坏,凡是洞口梁破坏的,则墙身完好。首层墙身有斜向裂缝,施工缝处多有水平错动。底层和施工缝处是剪力墙的薄弱部位,而洞口梁的破坏对墙肢起保护作用。

1967年委内瑞拉加拉加斯地震,对倾覆力矩的作用表现出强烈反应。有些框架柱由于倾覆力矩产生的压力将柱压坏。有一栋十一层旅馆,下部三层为框架,上部为剪力墙,下部三层的柱顶均发生压剪破坏,主要由于轴力大、延性低。震害还说明建筑外形的高宽比较大时(≥ 5),对倾覆力矩的作用更要注意。

1968年日本十胜冲地震,许多2~4层的钢筋混凝土结构破坏,对剪力墙的设置数量提出了必要墙量的规定。短柱的破坏引起重视,从而开展了对短柱的大量试验研究工作。

1971年美国圣弗南多地震,首层空旷、刚度突变的结构破坏严重。六层楼的 Olive View 医院,一至二层为框架结构,二层以上为剪力墙结构,上下刚度相差十倍,框架柱严重破坏,配有螺旋箍筋的柱表现良好。用坚实材料砌筑的填充墙对框架起不利作用,对柱产生附加轴力,对梁柱节点增大剪力。

1974年马拿瓜地震,再一次证明双肢剪力墙的洞口梁屈服,对墙肢起保护作用。提出了洞口梁抗弯不要太强但要保证受剪承载力的设计方法。此外还说明剪力墙的设置对减



轻非结构构件及设备系统的震害起重要作用。

1975 年日本大分地震，长、短柱合用的框架破坏严重。此外剪力墙沿对角线开洞非常不利。

1976 年我国唐山地震又一次证明框剪结构在防止填充墙及建筑装饰破坏方面比框架结构有明显的优越性。由砖砌填充墙形成的短柱，也遭受严重破坏。柱端、节点核心、角柱及加腋梁的变截面处是框架结构的主要破坏部位。

1979 年美国加州爱尔生居地震，柱在首层埋入地面处破坏，说明地面的约束作用不能忽视。

1985 年墨西哥城地震，梁、柱截面过小而且超量配筋造成框架倒塌，无梁平板及双向密肋板结构由于冲剪，破坏严重。

1995 年阪神地震再一次证明避免底部软弱层及防止中间层刚度、承载力突变的重要性。

1999 年台湾 921 集集地震，大量柱端及底层墙、柱破坏导致倒塌，说明加强预期塑性铰部位的承载力和构造的重要性。由于采用单跨的框架体系，结构冗余度不够，一座 16 层和二座 12 层的高层钢筋混凝土建筑结构倒塌。一座九层钢筋混凝土框架结构，由于仅在周边设梁，内部为单跨框架且不封闭，传力路径中断造成底部倒塌。

多次地震中框架结构震害共同点有：

(1) 短柱的变形特征为剪切型、脆性破坏。震害表明，砖填充墙对框架柱的约束，如：框架柱间砌筑不到顶的隔墙、窗间墙以及楼梯间休息平台使框架柱变成短柱。因填充墙约束形成短梁，同样会剪切破坏。

(2) 由于梁截面高度较高，且与现浇楼板组成 T 形截面构件共同工作，形成强梁弱柱，导致柱子破坏，房屋倒塌。

(3) 梁柱节点区箍筋不足，地震中节点出现脆性的剪切破坏。

4. 四川汶川大地震

(1) 2008 年 5 月 12 日，四川汶川发生了 8 级大地震，震中映秀镇达 11 度，是我国 1976 年唐山大地震以来又一次特大地震，截至 9 月 4 日死亡人数已达 69226 人，大量房屋倒塌，造成经济极大损失。这次地震属于构造地震，是印度板块向亚洲板块俯冲，龙门山构造带中央断裂带在龙门山北川—映秀地区构造应力能量的长期积累突然释放的结果，属浅源地震。

(2) 这次地震是又一次在我国设防属 6 度和 7 度区发生的特大地震，再次表明地震的不确定性和地震难以预报。这次地震的特点是波及的范围特别大，北至北京、南至广州、东至上海、西南至曼谷范围内的人群有震感。再有一种与以往地震的不同现象，地震发生后临近震中范围地面的建筑物、构筑物破坏严重程度等值线不是以震中为圆心呈圆形或椭圆形，而是从西南向东北的条形。1933 年 8 月 25 日在四川茂县的叠溪发生过 7.5 级大地震，西北方向山崩塌下的岩石把全城 278 间房屋埋葬，城中 3000 余人无一幸免，地震崩塌的山石形成了银瓶崖、大桥、叠溪三条大坝，将岷江斩断，由于江水倒流，叠溪城及附近的 21 个羌寨全部被淹没。

1976 年 8 月 16 日和 23 日，在汶川北部松潘、平武之间相继发生了两次 7.2 级强烈地震，由于松、平一带人烟稀少，死亡 41 人。叠溪和松、平地震均属龙门山构造带发生的



地震。

(3) 这次地震后,从受震害的房屋建筑检查表明,凡是倒塌或严重破坏的房屋,都是没有按现行规范抗震设防和进行过加固,或施工质量极差,或既无合理设计又无正规施工的房屋;凡按现行规范进行抗震设计和正规施工的房屋,虽然遭遇的地震烈度大于设防烈度 1 至 2 度,但是没有严重破坏或倒塌,达到“三水准”要求。

(4) 地震震害表明:

1) 框架结构底部为空旷商店,上部黏土实心砖较多填充墙的房屋,因为上下刚度突变,底部框架受损严重,有的柱受破坏,上部填充墙出现受剪斜裂缝;

2) 框架结构采用的黏土实心砖填充墙,普遍出现受剪斜裂缝,有的相连框架柱的上下端因受剪而损坏;

3) 框架结构由于黏土实心砖填充墙窗口处形成短柱,或在楼梯间平台设外边梁形成了短柱,使这些短柱受剪破坏(这类现象以前地震震害中也有);

4) 框架结构,屋顶小房填充墙、楼梯间外挑平台的填充墙,由于与框架柱没有可靠连接造成倒塌和外甩;

5) 框架结构的楼梯跑板出现贯穿裂缝,有的断裂,钢筋也被拉断,这种震害为首次发现,可能因楼梯形成具有较大抗侧刚度的支撑,地震时受较大拉力所致;

6) 框架结构柱头出现损坏,梁端完整无损,没有先出现塑性铰(以前地震震害中也有此现象);

7) 双柱单跨梁框架结构教学楼,由于纵向前后砌体填充墙门窗洞口大小不同,地震时的扭转效应,无抗震设防的造成倒塌,有抗震设防的受损坏或破坏;

8) 框架-剪力墙结构和剪力墙结构,除连梁有少量交叉斜裂缝外无其他震害;

9) 在 8 度及 8 度以上地区的砌体结构,无抗震设防的大量倒塌,有抗震设防的墙体大量出现裂缝;

10) 砌体结构采用预应力空孔板,由于缺少两端出胡子筋与圈梁或楼层梁的叠合层整体连接,以及墙体不设圈梁和构造,此类房屋大量倒塌。

四、结构抗震设计的不确定因素

1. 抗震设计的不确定性

除了地震地面运动不确定性之外,工程结构方面还有以下不确定因素。

(1) 结构分析的影响

影响结构自振周期和动力反应有以下因素:质量分布不均匀;基础与上部结构共同工作;节点的非刚性转动;偏心、扭转及 $P-\Delta$ 效应;柱轴向变形以及非结构墙体刚度的影响等。节点非刚性转动的影响可达 5%~10%;高层建筑中柱子的轴向变形可使周期加长 15%,加速度反应降低 8%; $P-\Delta$ 效应可使位移增加 10%。至于非结构墙体的影响就更大,是分析时不能忽视的。

(2) 材料的影响

混凝土的弹性模量,随着时间的增长可比施工刚完成时降低 50%,在应变增大时还可能继续降低,这意味着周期可能增长 25%,加速度反应减少 10%。

钢筋混凝土构件的惯性矩 I 一般按毛截面计算,这是不正确的。竖向及侧向荷载的不



同，都会影响中和轴的位置；柱配筋的不同可使周期相差达到 40% 左右。

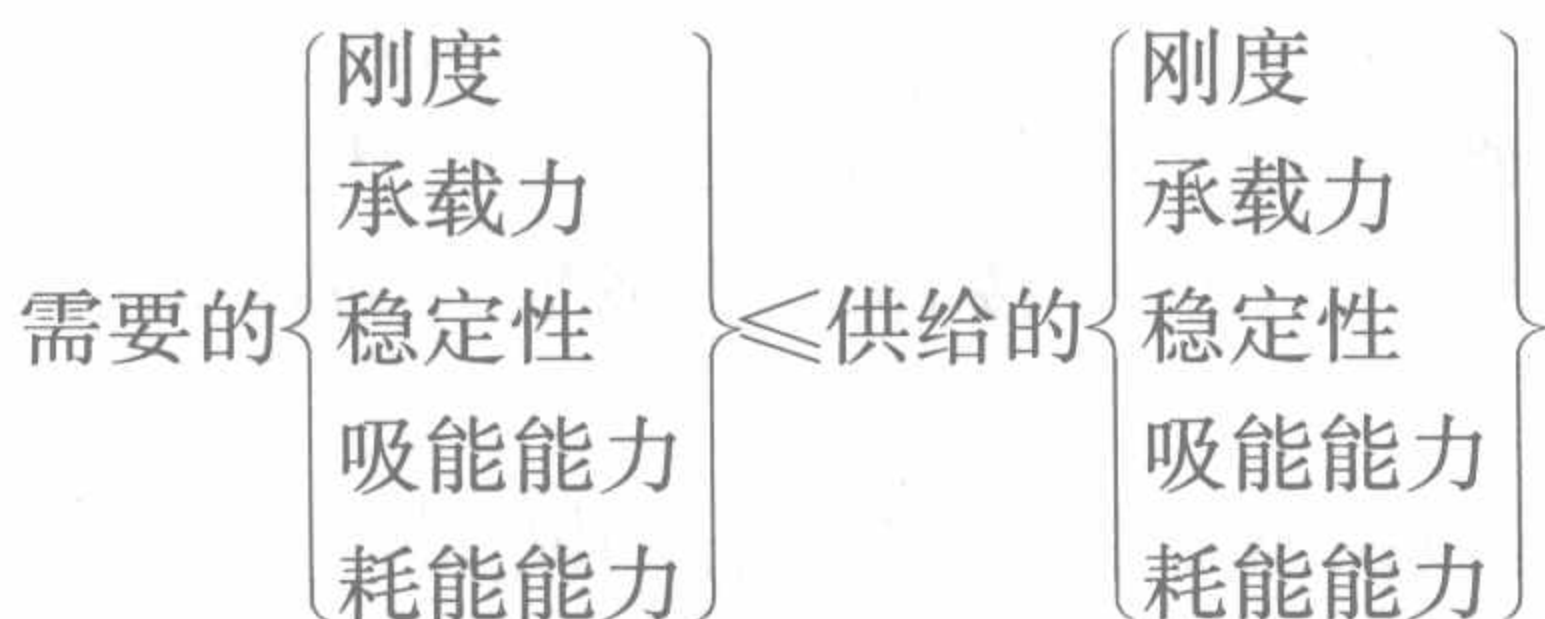
(3) 阻尼变化的影响

钢筋混凝土的阻尼系数一般为 5%，但当结构受震开裂后可达 20%~30%。而只要阻尼系数由 2% 增为 10%，可使计算周期相差 50% 左右。

2. 一些专家学者的观点

美国应用技术局(ATC) R. Sharpe 工程师认为，至今抗震设计尚不能称为一门科学，有很多问题要靠工程判断。在结构布置上应考虑牢固连接或彻底分离，切忌连又连不牢，分又分不清，他还强调设计中必须考虑非结构构件的不利及有利作用。以下是美国加州大学 V. V. Bertero 教授对如何做好抗震设计的意见。

(1) 抗震设计的基本要求是：



困难在于如何可靠地确定“需要量”和真实地估计“供给量”。孤立地考虑上述要求两侧的某一项都会导致不合理与不经济的设计。

用复杂的三维计算程序可进行数学模型的空间动力分析，但在真实的估计建筑物抗震能力方面，则缺少相应的研究。目前估计建筑结构“供给量”的指标，是根据力学理论及拟静力试验求得的经验公式，并不能真实反映地震时的情况。惟一的方法是通过真实建筑物的整体试验分析，但限于试验条件，在这方面的研究是极少的。

目前除必要的计算外，更重要的是概念设计，包括合理的结构选型及正确的构造措施。

(2) 具体设计上应注意：

减轻自重；平立面尽量简单规则对称；承载力、刚度与延性应匹配；慎重考虑构件节点与支座的连接的承载力，钢筋混凝土结构要避免过早的剪切、锚固与受压破坏；设置多道防线；合理控制非弹性区域的部位；上部结构与基础在承载力与刚度方面应相互适应。

(3) 抗震规范的局限性

抗震设计规范都是结合本国或本地区的震害或研究成果制定的，有一定的片面性和局限性。规范只是对设计的最低要求，许多问题要设计者结合具体情况去考虑。

例如，以往不少美国工程师包括 UBC 规范都倾向于采用延性框架而不用框架-剪力墙或剪力墙结构，其原因可能是 1964 年阿拉斯加地震中有若干栋框架-剪力墙结构受到严重破坏，并有一栋倒塌。然而仔细分析破坏的原因是：整体结构布置上存在概念设计的错误，构造设计上存在问题，材料质量有问题，以及施工质量不良。而 1967 年加拉加斯地震中框架-剪力墙结构表现良好。美国加州大学伯克利分校对剪力墙的试验研究说明，当采取必要的构造措施，即使剪应力达到 $15\sqrt{f_c}$ psi (1psi=6.895kPa) (UBC 限值为 $10\sqrt{f_c}$)，仍具有较大的转动及位移延性，特别是当联肢墙的连接梁有较好延性时，更具有“强柱弱



梁”的特点。

又如，不是绝对不能采用短柱，注意构造措施同时使剪应力小于 $10\sqrt{f_c}$ psi，可以做到有较好的延性(位移延性系数 $\mu_\Delta \geq 4$)。

对地震后的建筑进行统计分析说明：按规范设计的结构，其最大抗侧力能力一般为规范值的2倍以上，但仍有按规范设计的部分建筑遭受严重的结构及非结构破坏，这说明单纯提高承载力并不能解决抗震安全问题。

3. 结构体系的塑化过程

塑化过程包括两方面问题，一是屈服机制类别，二是机制形成过程中的屈服历程(图 1-1-1)。

(1) 屈服机制有两种基本类别：楼层机制及总体机制，其他机制均可由这两种机制组合而成。

楼层屈服机制(图 1-1-2)仅竖向构件屈服，水平构件保持弹性，各层可以独立地沿地面运动方向移动，因此整个结构可有相当于总层数的自由度，但全部机制不一定在各层同时形成。只有这种机制可用剪切梁模型来表达。地面运动对其层间位移、梁和有柱铰框架的延性比是非常敏感的，如图 1-1-2(a)、(b)所示。装配大板结构的墙板沿水平缝滑动即属于此种性能。

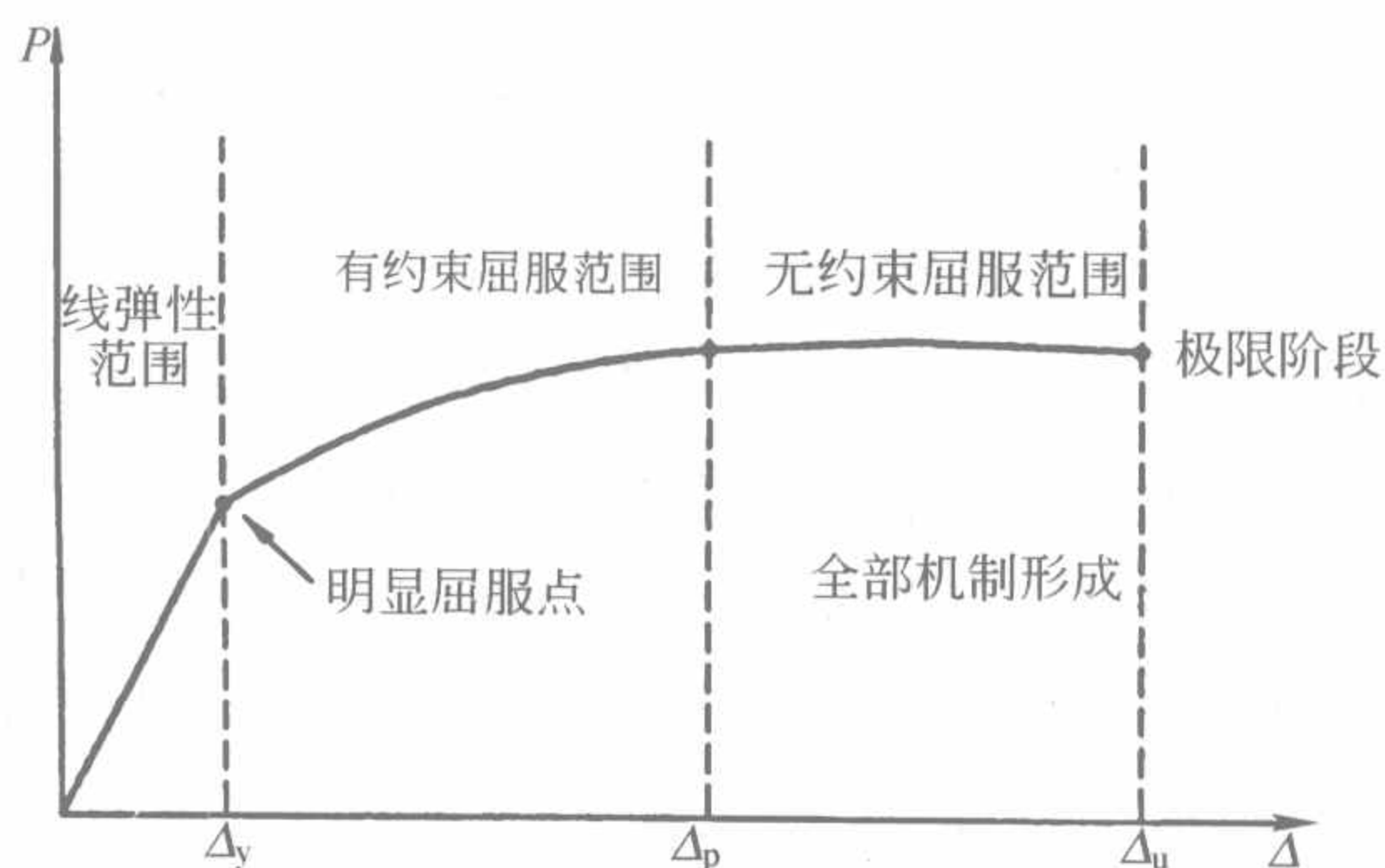


图 1-1-1 屈服历程(抗力与位移关系)

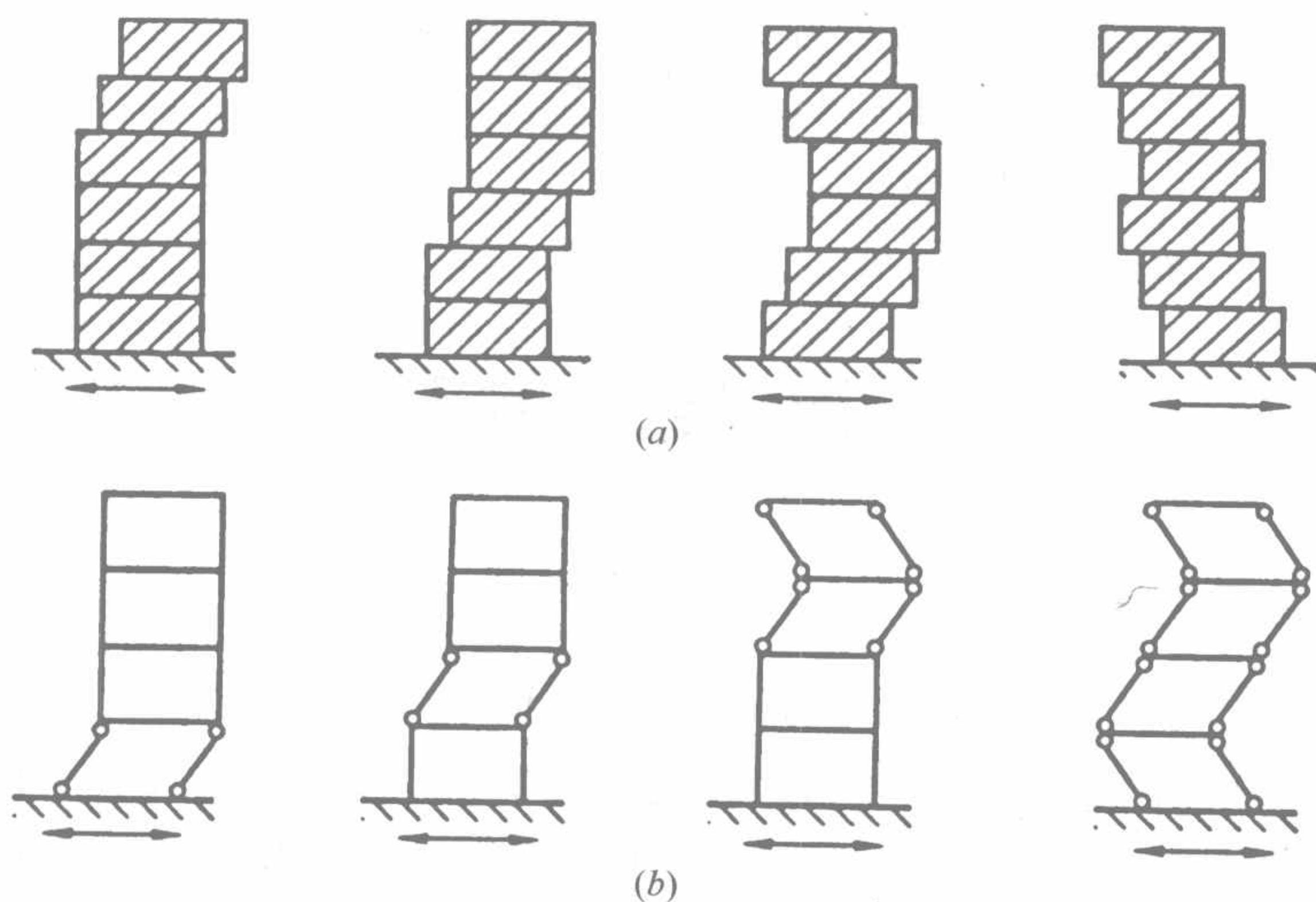


图 1-1-2 楼层屈服机制
(a)墙体层间滑移；(b)框架柱铰

整体屈服机制(图 1-1-3)所有水平构件屈服，竖向构件除根部外均处于弹性，整个结构绕根部作刚体转动，在平面内仅有一个自由度。其层间位移分布均匀，沿高度的延性要求可足够精确地用等效静力分析(非弹性)得到，侧力按倒三角形分布，最大顶点位移可采用动力分析的数值。这种层间位移及延性分布对于地面运动不敏感。

