

简明高层钢筋混凝土 结构设计手册

JIANMINGGAOCENGANGJINHUNNINGTU
JIEGOUSHEJISHOUCE



(第三版)

李国胜 编著

中国建筑工业出版社

简明高层钢筋混凝土结构 设计手册

(第三版)

李国胜 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

简明高层钢筋混凝土结构设计手册/李国胜编著. —3 版.
北京:中国建筑工业出版社, 2011.9
ISBN 978-7-112-13335-2

I. ①简… II. ①李… III. ①高层建筑-钢筋混凝土结构-
结构设计-技术手册 IV. ①TU973-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 122068 号

本书根据《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010、《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010、《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3—2010, 在 2003 年第二版的基础上, 收集到的新结构、新技术、新材料等资料调整和补充改编而成。共 15 章: 高层建筑设计的特点和重要概念; 高层建筑设计的基本规定; 高层建筑结构的荷载和地震作用; 楼盖结构的设计与构造; 高层建筑结构体系选择和结构布置; 框架结构; 剪力墙结构; 框架-剪力墙结构; 底部大空间部分框支剪力墙结构; 板柱-剪力墙结构; 筒体结构; 混合结构; 大底盘多塔、连体、错层、竖向柱转换结构; 旋转餐厅、幕墙结构; 基础及地下室结构; 并附有工程实例。

本书可供建筑结构设计、施工图文件审查、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 封 毅

责任设计: 叶延春

责任校对: 王雪竹 刘 钰

简明高层钢筋混凝土结构设计手册

(第三版)

李国胜 编著

*

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

北京红光制版公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 53¼ 字数: 1300 千字

2011 年 9 月第三版 2011 年 9 月第八次印刷

定价: 118.00 元

ISBN 978-7-112-13335-2
(20825)

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)

第三版前言

本书第一版是在1995年出版发行，第二版在2003年与读者见面，受到同行厚爱和欢迎，对提高建筑结构设计的质量和效率提供了帮助。

本书第三版是在第二版的基础上，根据新修订的《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010、《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010、《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3—2010等规范、规程，近几年来编者参与的一些工程设计经验以及收集到的有关资料，对内容作了调整和补充，并增加了基于性能的抗震设计、抗连续倒塌设计和楼盖结构竖向振动计算等新内容。全书共15章，其中高层建筑结构设计的特点和重要概念（第1章）、高层建筑结构设计的基本规定（第2章）、底部大空间部分框支剪力墙结构（第9章）、混合结构（第12章）和基础及地下室结构（第15章）是本书的重点内容。

本书的特点是简明实用，可读性和可操作性强，既有设计概念、设计要点和构造细节，又有实用图表和工程实例，有助从事建筑结构设计人员参照应用，也可供建筑结构施工图文件审查、施工及监理等工作人员和大专学校土建专业师生参考。

本书编写中参考和引摘的文献资料较多，对有关作者深表谢意。内容涉及的专业技术面广，限于编者的水平，有不当或错误之处在所难免，热忱盼望读者指正，编者将不胜感激。

目 录

第1章 高层建筑结构设计的特点

和重要概念..... 1

- 1.1 高层建筑的界定与特点..... 1
- 1.2 结构概念设计的重要性..... 2
- 1.3 执行规范、规程应区别对待..... 3
- 1.4 对结构分析软件计算结果分析
判断的必要性..... 4
- 1.5 地震与地震作用..... 5
- 1.6 抗震设计的对策 10
- 1.7 三水准设防目标 14
- 1.8 应重视建筑场地对抗震设计的
影响 17
- 1.9 基于性能的抗震设计 19
- 1.10 结构设计防止连续倒塌..... 50
- 1.11 建筑寿命、设计使用年限和
设计基准期..... 53
- 1.12 隔震和消能减震设计..... 54

第2章 高层建筑结构设计的基本

规定..... 58

- 2.1 一般规定及结构方案 58
- 2.2 结构的极限状态 59
- 2.3 抗连续倒塌设计 63
- 2.4 建筑物地震反应观测 64
- 2.5 材料 64
- 2.6 结构的设计使用年限、安全等
级、建筑寿命和结构的设计
基准期 71
- 2.7 抗震设防分类及抗震等级 72
- 2.8 房屋适用高度和高宽比 78
- 2.9 受弯构件的允许挠度、裂缝控
制等级、结构耐久性、及楼盖自
振频率 80
- 2.10 高层建筑结构水平位移限值和
舒适度要求..... 84

2.11 高层建筑结构内力和位移

计算的原则..... 87

2.12 荷载组合和地震作用组合的

效应..... 93

2.13 构件承载力抗震调整系数 γ_{RE}

及结构重要性系数 γ_0 95

2.14 剪切刚度、剪弯刚度、剪力与

层间位移比刚度、剪力与层间
位移角比刚度和层间位移角刚
度及其应用范围..... 95

2.15 纵向受力钢筋的最小配筋率..... 97

2.16 钢筋的锚固及连接..... 99

2.17 预应力混凝土结构抗震设计

要求 105

2.18 超限高层建筑结构审查的规定 ... 106

第3章 高层建筑结构的荷

载和地震作用 117

3.1 竖向荷载..... 117

3.2 风荷载及雪荷载..... 123

3.3 地震作用..... 149

3.4 塔楼的水平地震作用..... 158

3.5 我国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..... 160

第4章 楼盖结构的设计与构造 174

4.1 钢筋混凝土楼盖分类和基本

要求..... 174

4.2 现浇单向板和双向板..... 178

4.3 现浇密肋板及空心板..... 186

4.4 预应力混凝土薄板叠合楼板..... 187

4.5 预制大楼板..... 188

4.6 预制预应力混凝土圆孔板..... 189

4.7 预制混凝土双钢筋薄板叠合

楼板..... 190

4.8	现浇无梁楼盖	191	7.11	剪力墙的水平 and 竖向分布钢筋	368
4.9	后张无粘结预应力混凝土现浇板	191	7.12	连梁的延性和设计	372
4.10	悬挑梁外端及梁受集中荷载吊筋的计算与构造	194	7.13	若干问题的处理	378
4.11	梁受扭曲截面承载力计算	197	7.14	工程实例	381
4.12	裂缝控制及挠度验算	206	第8章 框架-剪力墙结构	390	
第5章 高层建筑结构体系选择和结构布置	219		8.1	框剪结构的特点	390
5.1	结构体系的选择	219	8.2	结构布置	391
5.2	结构平面及竖向布置	221	8.3	剪力墙合理数量的确定方法	393
5.3	楼盖结构	229	8.4	刚度计算	396
第6章 框架结构	231		8.5	内力与位移计算	408
6.1	框架结构的特点及布置	231	8.6	抗震等级	423
6.2	梁截面尺寸的确定及其刚度取值	234	8.7	内力调整	425
6.3	柱截面尺寸的确定	238	8.8	框剪结构的设计步骤	426
6.4	竖向荷载作用下的计算	241	8.9	截面设计和构造	429
6.5	水平力作用下的计算	242	8.10	工程实例	433
6.6	构件设计中的一些重要规定	250	第9章 底部大空间部分框支剪力墙结构	442	
6.7	梁正截面受弯承载力计算及构造	251	9.1	结构特点及适用范围	442
6.8	梁斜截面受剪承载力计算及构造	261	9.2	设计原则	443
6.9	梁、柱斜截面受剪承载力计算应用图表	265	9.3	结构布置	443
6.10	柱截面设计与构造	276	9.4	结构设计要点	446
6.11	柱正截面承载力计算应用图表	291	9.5	框支梁	452
6.12	梁柱节点受剪承载力验算	308	9.6	转换梁	453
6.13	梁上开洞的计算及构造	321	9.7	框支柱(转换柱)	454
第7章 剪力墙结构	326		9.8	落地剪力墙及筒体	457
7.1	剪力墙结构的特点及适用范围	326	9.9	上部墙体及楼板	458
7.2	剪力墙的分类及其延性	329	9.10	转换层的框支梁、柱和剪力墙简化计算	460
7.3	剪力墙结构的设计要点	334	9.11	厚板转换层	465
7.4	结构布置	336	9.12	箱形梁转换层	467
7.5	墙厚度的确定	339	9.13	桁架转换	468
7.6	短肢剪力墙结构的设计	342	9.14	其他形式转换	481
7.7	抗震等级及底部加强部位高度	345	9.15	工程实例	483
7.8	结构计算及内力取值	346	第10章 板柱-剪力墙结构	513	
7.9	截面设计	347	10.1	结构特点及适用范围	513
7.10	构造与配筋	353	10.2	结构布置	514
			10.3	内力计算	515
			10.4	截面设计	519
			10.5	构造要求	527
			10.6	工程实例	532
			第11章 筒体结构	537	
			11.1	筒体结构的分类及受力特点	537

11.2	框架-核心筒结构的设计要点	541	13.4	竖向柱转换结构	639
11.3	筒中筒结构的设计要点	547	13.5	工程实例	640
11.4	加强层的作用及设计要点	555	第14章 旋转餐厅、幕墙结构	669	
11.5	《上海筒体规程》和《广东高 规补充》的有关规定	558	14.1	旋转餐厅结构	669
11.6	工程实例	562	14.2	幕墙结构	679
第12章 混合结构	567	第15章 基础及地下室结构	728		
12.1	结构特点及适用范围	567	15.1	基本规定	728
12.2	抗震等级	571	15.2	基础选型和埋置深度	731
12.3	结构布置	572	15.3	地基基础设计及地基承载力	733
12.4	结构设计要点	574	15.4	地基变形计算	738
12.5	构件设计	577	15.5	单独柱基	748
12.6	钢管混凝土柱	581	15.6	交叉梁基础	755
12.7	钢管混凝土组合柱和叠合柱	594	15.7	筏形基础	757
12.8	钢管混凝土柱	596	15.8	箱形基础	765
12.9	端部设置型钢的剪力墙及钢 板-混凝土组合剪力墙	600	15.9	桩箱与桩筏基础	775
12.10	构造细部	604	15.10	桩基	776
12.11	工程实例	620	15.11	复合地基 CFG 桩	806
第13章 大底盘多塔、连体、错层、 竖向柱转换结构	629	15.12	地下室结构	812	
13.1	大底盘多塔结构	629	15.13	后浇带的构造及浇灌时间	824
13.2	连体结构	632	15.14	“跳仓法”施工超长基础 筏板	826
13.3	错层结构	637	15.15	工程实例	829
			参考文献	843	

第 1 章 高层建筑结构设计的 特点和重要概念

1.1 高层建筑的界定与特点

1. 根据《民用建筑设计通则》GB 50352—2005 第 3.1.2 条的规定,住宅建筑 1 层至 3 层为低层住宅,4 层至 6 层为多层住宅,7 层至 9 层为中高层住宅,10 层及 10 层以上为高层住宅;除住宅建筑之外的民用建筑高度不大于 24m 者为单层和多层建筑,大于 24m 者为高层建筑(不包括建筑高度大于 24m 的单层公共建筑);建筑高度大于 100m 的民用建筑为超高层建筑。

2. 根据《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3—2010 (简称《高规》) 规定,10 层及 10 层以上或房屋高度大于 28m 的住宅建筑以及房屋高度大于 24m 的房屋为高层建筑。

3. 高层建筑结构设计 with 低层、多层建筑设计相比较,结构专业在各专业中占有更重要的地位,不同结构体系的选择,直接关系到建筑平面布置、立面体形、楼层高度、机电管道的设置、施工技术要求、施工工期的长短和投资造价的高低。

4. 水平力是设计的主要因素。

在低层和多层房屋结构中,水平力产生的影响较小,以抵抗竖向荷载为主,侧向位移小,通常忽略不计。在高层建筑结构中,随着高度的增加,水平力(风荷载或水平地震作用)产生的内力和位移迅速增大。如图 1.1-1 所示,把房屋结构看成一根最简单的竖向悬臂构件,轴力与高度成正比;水平力产生的

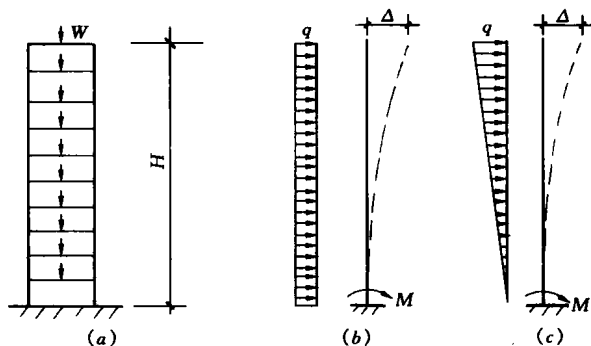


图 1.1-1 高层建筑结构受力简图

弯矩与高度的二次方成正比;水平力产生的侧向顶点位移与高度的四次方成正比。

竖向荷载产生的轴力

$$N=WH \quad (1.1-1)$$

水平力产生的弯矩

均布荷载

$$M=\frac{1}{2}qH^2 \quad (1.1-2)$$

倒三角形分布荷载

$$M=\frac{qH^2}{3} \quad (1.1-3)$$

水平力产生的顶点侧向位移

$$\Delta = \frac{qH^4}{8EI} \quad (1.1-4)$$

$$\Delta = \frac{11qH^4}{120EI} \quad (1.1-5)$$

式中 EI 为竖向构件弯曲刚度。

1.2 结构概念设计的重要性

1. 概念设计是通过无数的事例分析, 历年来国内外震害分析, 模拟试验的定量定性分析以及长期以来国内外的设计与使用经验分析、归纳、总结出来的。而这些原则、规定与方法往往是基础性、整体性、全局性和关键性的。合理的结构方案是安全可靠的优秀设计的基本保证。

2. 强调结构概念设计的重要性, 旨在要求建筑师和结构工程师在建筑设计中应特别重视规范、规程中有关结构概念设计的各条规定, 设计中不能陷入只凭计算的误区。若结构严重不规则, 整体性差, 则仅按目前的结构设计计算水平, 难以保证结构的抗震、抗风性能, 尤其是抗震性能。

3. 高层建筑设计尤其是在高层建筑抗震设计中, 应当非常重视概念设计。这是因为高层建筑结构的复杂性, 发生地震时地震动的不确定性, 人们对地震时结构响应认识的局限性与模糊性, 高层结构计算尤其是抗震分析计算的精确性, 材料性能与施工安装时的变异性以及其他不可预测的因素, 致使设计计算结果 (尤其是经过实用简化后的计算结果) 可能与实际相差较大, 甚至有些作用效应至今尚无法定量计算出来。因此, 在设计中, 虽然分析计算是必须的, 也是设计的重要依据, 但仅此往往不能满足结构安全性、可靠性的要求, 不能达到预期的设计目标, 还必须非常重视概念设计。从某种意义上讲, 概念设计甚至比分析计算更为重要。

4. 概念设计是结构设计人员运用所掌握的知识和经验, 从宏观上决定结构设计中的基本问题。要做好概念设计应掌握以下诸多方面: 结构方案要根据建筑使用功能、房屋高度、地理环境、施工技术条件和材料供应情况、有无抗震设防选择合理的结构类型; 竖向荷载、风荷载及地震作用对不同结构体系的受力特点; 风荷载、地震作用及竖向荷载的传递途径; 结构破坏的机制和过程, 以加强结构的关键部位和薄弱环节; 建筑结构的整体性, 承载力和刚度在平面内及沿高度均匀分布, 避免突变和应力集中; 预估和控制各类结构及构件塑性铰区可能出现的部位和范围; 抗震房屋应设计成具有高延性的耗能结构, 并具有多道防线; 地基变形对上部结构的影响, 地基基础与上部结构协同工作的可能性; 各类结构材料的特性及其受温度变化的影响; 非结构性部件对主体结构抗震产生的有利和不利影响, 要协调布置, 并保证与主体结构连接构造的可靠等; 建筑专业有关的基本空间尺寸; 建筑装修与结构连接构造; 机电专业与结构有关的要求; 造价投资经济性等。

1.3 执行规范、规程应区别对待

1. 现行《建筑结构荷载规范》GB 50009—2001（2006 年版）（以下简称《荷载规范》），《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010（以下简称《抗震规范》），《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010（以下简称《混凝土规范》），《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2002（以下简称《地基规范》），《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3—2010（以下简称《高规》）等规范、规程是建筑结构设计应遵循的依据，但是其条款内容是若干年前的科研和设计经验的总结，已经滞后。

2. 现行规范、规程的条款，是对工程设计的最低要求，不是最高要求。规范、规程既是成熟经验的总结，又是经济技术的体现，所有条款是对一般的、大量的工程设计提出的规定和要求，对于使用功能或标准高的工程，设计时与一般工程应有所区别。

3. 规范、规程是全国性标准，沿海地区与西南、西北等地区的自然条件和经济发展情况不同，房屋建筑的标准、造价有所不同。因此，在工程设计时应贯彻因地制宜方针，执行规范、规程也应因地区的不同而区别对待。如果有的省市或地区有当地制定的标准，在设计该地区的工程时应执行当地的标准。

4. 现行规范、规程的条款，是对一般工程的规定及要求，可是随着经济的发展，人们对房屋建筑使用功能需求不断变化，尤其是建筑艺术的不断创新和多样化，给建筑结构设计提出挑战和新的技术要求。因此，在一些工程设计中要求设计人员去适应新形势发展的需要，根据已有经验或收集必要的有关资料，甚至于试验研究去创新，不能完全依据现行规范、规程的条款。

5. 在设计中对某些构件仅按规范、规程的要求进行截面设计是不够的。例如，承托上部墙或柱的转换梁，其剪压比和受剪承载力应比一般框架梁严格，纵向钢筋应比计算所需要的富余一些；受力较敏感或施工操作中钢筋位置下移对承载力影响较大的悬挑梁和悬挑阳台及走廊、挑檐板，其纵向钢筋应该比计算所需要的多一些。如《混凝土规范》9.2.13 条规定：“当梁的腹板高度 $h_w \geq 450\text{mm}$ 时，在梁的两个侧面应沿高度配置纵向构造钢筋，每侧纵向构造钢筋（不包括梁上、下部受力钢筋及架立筋）的截面面积不应小于腹板截面面积 bh_w 的 0.1%，且其间距不宜大于 200mm”。如果设计的工程平面长度或宽度超过相应结构类型的伸缩缝间距时，梁的腰筋应适当加多。

6. 一个结构设计工程师的首要任务就是在每一项工程设计的开始，即建筑方案设计阶段，就能凭借自身拥有的对结构体系功能及其受力、变形特性的整体概念和判断力，用概念设计去帮助建筑师开拓或实现该建筑物业主所想要的，或已初步构思的空间形式及其使用、构造与形象功能，并以此为统一目标，与建筑师一起构思总结结构体系，并能明确结构总体系和主要分体系之间的最佳受力特征要求。结构工程师不仅仅是“规范加计算”，更不是“规范加一体化计算机结构分析程序”，而应具有结构设计概念、经验、悟性、判断力和创造力。在当前面临困难、挑战和竞争的形势下，建筑结构设计者要不断学习，设计水平要提高，技术要创新，这样才能与时俱进，去适应时代的发展。

7. 我国随着房屋建筑商品化和设计工作与国际接轨，逐步要求进行限额设计，如建筑的总造价、结构单位面积用钢量和混凝土量等。因此，结构设计人员在设计时不仅技术

应先进,而且应该经济合理,始终要贯彻安全、适用、经济的方针。

8. 为了适应市场经济对建筑设计人员的要求,对自己设计的工程应总结整理有关经济技术的资料,掌握不同结构类型的造价和用料指标,同时也应收集这方面信息。要打破仅考虑结构专业的经济比较,应该从施工、材料、工期等对造价和投资进行综合比较。例如,高层建筑地下室楼盖采用无梁楼盖,基础采用平板筏基,按结构设计人员的一般概念,无梁楼盖及平板式筏基的混凝土量和钢筋用量比梁板式筏基多,这是事实。但是,由于采用无梁楼盖和平板式筏基,可减低层高而减少墙体,减小基础埋深而减少护坡和土方量,平板式单价比梁板式低,而且施工方便,其他还有如防水面积减少,降水费用降低,工期缩短,减去了梁板式筏基梁间回填材料等,因此,综合造价降低了许多。

9. 建筑设计,应作多方案比较,不仅要安全可靠技术可行,还应经济合理节省造价。地基基础的方案比较,对节省造价,方便施工,缩短施工周期具有极大的意义。

1.4 对结构分析软件计算结果分析判断的必要性

1. 对结构分析软件计算结果,结构设计人员应根据结构设计概念进行分析判断。

(1) 《抗震规范》第3.6.6条4款,《混凝土规范》第5.1.6条,《高规》第5.1.16条均规定:对结构分析软件的计算结果,应进行分析判断,确认其合理、有效后方可作为工程设计的依据。

(2) 在目前计算机和计算软件广泛应用的条件下,除了根据工程具体情况要选择使用可靠的计算软件外,还应对软件的计算结果从力学概念和工程经验等方面加以必要的分析判断,确认其合理性和可靠性,以保证结构安全。

(3) 计算软件是根据现行规范、规程进行编制的,在建立计算模型时必须作必要的简化,同时现行规范、规程是成熟经验的总结,而且是最低要求,但对当前许多较复杂的工程而言,这些经验是滞后的。

(4) 在某些计算软件中,现行规范、规程规定的一些要求验算的内容却没有或不完全符合。

因此,对软件计算结果应进行分析判断。工程经验上的判断一般包括:结构整体位移、结构楼层剪力、振型形态和位移形态、结构自振周期、超筋超限情况等。

2. 高层建筑结构是复杂的三维空间受力体系,计算分析时应根据结构实际情况,选取能较准确地反映结构中各构件的实际受力状况的力学模型。对于平面和立面布置简单规则的框架结构、框架-剪力墙结构,宜采用空间分析模型,可采用平面框架空间协同模型;对剪力墙结构、筒体结构和复杂布置的框架结构、框架-剪力墙结构应采用空间分析模型。目前国内商品化的结构分析软件所采用的力学模型主要有:空间杆系模型、空间杆-薄壁杆系模型、空间杆-墙板元模型及其他组合有限元模型。

3. 高层建筑按空间整体工作计算时,不同计算模型的梁、柱自由度是相同的:梁的弯曲、剪切、扭转变形,当考虑楼板面内变形时还有轴向变形;柱的弯曲、剪切、轴向、扭转变形。当采用空间杆-薄壁杆系模型时,剪力墙自由度考虑弯曲、剪切、轴向、扭转变形和翘曲变形;当采用其他有限元模型分析剪力墙时,剪力墙自由度考虑弯曲、剪切、轴向、扭转变形。

高层建筑层数多、重量大，墙、柱的轴向变形影响显著，计算时应考虑。

构件内力是与其变形相对应的，分别为弯矩、剪力、轴力、扭矩等，这些内力是构件截面承载力计算的基础，如梁的弯、剪、扭，柱的压（拉）、弯、剪、扭，墙肢的压（拉）、弯、剪等。

4. 在内力与位移计算中，型钢混凝土和钢管混凝土构件宜按实际情况直接参与计算，此时要求计算软件具有相应的计算单元。当结构中只有少量型钢混凝土和钢管混凝土构件时，也可等效为混凝土构件进行计算，比如可采用等刚度原则，但目前有的分析软件，如 SATWE 尚不具有此功能，应由设计人处理后再电算。构件的截面设计应按国家现行有关标准进行。

1.5 地震与地震作用

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—2010，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 1.5-1 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 1.5-2。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 1.5-1。

中国地震烈度表（1980）表 1.5-1

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					
3	室内少数静止中的人感觉	门、窗轻微作响		悬挂物微动		

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)
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,仓皇逃出	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	大多数人仓皇逃出	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。松软土上地裂缝较多。大多数烟囱中等破坏	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塌	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 1.5-2

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，而是由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性。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。

4. 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有关。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。

5. 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 年日本新潟地震中, 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) 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。

(9) 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。

1.6 抗震设计的对策

1. 为了达到抗震要求,钢筋混凝土房屋结构的承载力、刚度、稳定性、能量吸收及能量耗散等性能,均应满足地震作用下的要求。

由于以上供给和需要的两方面存在很多不确定因素,而两方面的因素又是互相影响的(例如,地震作用程度会影响构件的设计,而结构构件设计构造的不同又将影响地震对结构的效应),因此,孤立地考虑任何一方面会导致不合理的或不经济的设计。至今抗震设计很大程度靠判断,而判断能力主要来自以往的震害分析经验和试验研究成果。这种判断称为概念设计,它是抗震设计很重要的一部分。在钢筋混凝土房屋抗震设计中,除了经常提到的合理结构选型和布置以及采取正确的构造措施等原则以外,更要注意重要概念。

2. 结构抗震概念设计的目标是使整体结构能发挥耗散地震能量的作用,避免结构出现敏感的薄弱部位,导致结构过早破坏。现有抗震设计方法的前提之一是假定整个结构能发挥耗散地震能量的作用,在此前提下,才能以多遇地震作用进行结构计算、构件设计并加以构造措施,或采用动力时程分析进行验算,试图达到罕遇地震作用下结构不倒塌的目标。下面重点阐述结构抗震概念设计的基本原则:

(1) 结构的简单性

结构简单是指结构在地震作用下具有直接和明确的传力途径,结构的计算模型、内力和位移分析以及限制薄弱部位出现都易于把握,对结构抗震性能的估计也比较可靠。

(2) 结构的规则和均匀性

1) 沿建筑物竖向,建筑造型和结构布置比较均匀,避免刚度、承载能力和传力途径的突变,以限制结构在竖向某一楼层或极少数几个楼层出现敏感的薄弱部位。这些部位将产生过大的应力集中或过大的变形,容易导致结构过早地倒塌。

2) 建筑平面比较规则,平面内结构布置比较均匀,使建筑物分布质量产生的地震惯性力能以比较短和直接的途径传递,并使质量分布与结构刚度分布协调,限制质量与刚度之间的偏心。建筑平面规则、结构布置均匀,有利于防止薄弱的子结构过早破坏、倒塌,使地震作用能在各子结构之间重分布,增加结构的赘余度数量,发挥整个结构耗散地震能量的作用。

(3) 结构的刚度和抗震能力

1) 水平地震作用是双向的,结构布置应使结构能抵抗任意方向的地震作用。通常,可使结构沿平面上两个主轴方向具有足够的刚度和抗震能力。结构的抗震能力则是结构承载力及延性的综合反映。

2) 结构刚度选择时,虽可考虑场地特征,选择结构刚度,以减少地震作用效应,但也要注意控制结构变形的增大,过大的变形将会因 $P-\Delta$ 效应过大而导致结构破坏。

3) 结构除需要满足水平方向的刚度和抗震能力外,还应具有足够的抗扭刚度和抵抗扭转振动的能力。现有抗震设计计算中不考虑地震地面运动的扭转分量,在概念设计中应注意提高结构的抗扭刚度和抵抗扭转振动的能力。

(4) 结构的整体性

1) 高层建筑结构中,楼盖对于结构的整体性起到非常重要的作用。楼盖相当于水平