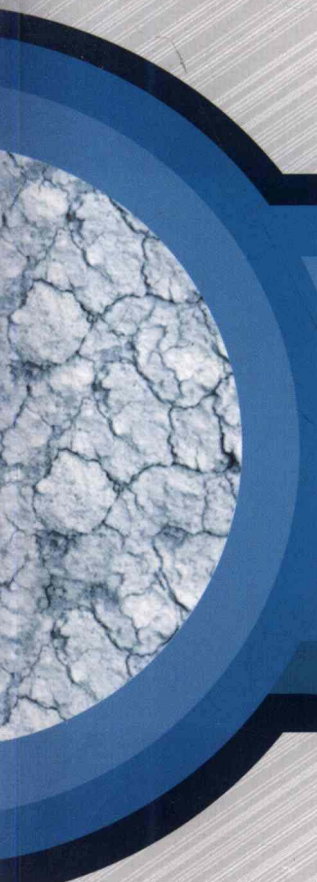


第**二**版



多高层钢筋混凝土 结构设计优化与合理构造

李国胜 主编

(附实例)

中国建筑工业出版社

多高层钢筋混凝土结构设计优化 与合理构造 (附实例)

(第二版)

李国胜 主编



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

多高层钢筋混凝土结构设计优化与合理构造 (附实例)/
李国胜主编. —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 9
ISBN 978-7-112-14506-5

I. ①多… II. ①李… III. ①多层建筑-钢筋混凝土
结构-结构设计-最优设计②高层建筑-钢筋混凝土结构-结构
设计-最优设计③多层建筑-钢筋混凝土结构-工程构造④高
层建筑-钢筋混凝土结构-工程构造 IV. ①TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 161785 号

本书是针对多高层钢筋混凝土结构设计中如何进行设计优化和合理构造编写的, 系依据新修订的《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、《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011 等标准, 在 2008 年初版基础上作了补充和调整。

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: 武晓涛

责任设计: 张 虹

责任校对: 肖 剑 赵 颖

多高层钢筋混凝土结构设计优化与合理构造 (附实例) (第二版)

李国胜 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
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 34 $\frac{3}{4}$ 字数: 867 千字
2012 年 12 月第二版 2012 年 12 月第五次印刷

定价: 78.00 元

ISBN 978-7-112-14506-5
(22576)

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)

第二版前言

本书初版在 2008 年发行以后,深受读者的欢迎和厚爱。第二版是在初版的基础上依据新修订的《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、《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2011 等标准,以及近年来收集的新结构、新材料、复杂结构有关资料和在学术交流中、指导工程设计中大家提出的一些问题,对内容作了补充和调整,供读者参考。

本书共十三章:概述,基本规定,地基基础及地下室结构,楼盖结构,框架结构,剪力墙结构,框架-剪力墙结构,板柱-剪力墙结构,底部大空间剪力墙结构,筒体结构,大底盘多塔、连体、错层、竖向柱转换等复杂结构,混合结构,各类建筑结构经济指标。本书的特点是概念交代清楚、重点突出、简明实用、可读性和可操作性强,对多高层建筑结构设计中一些重要问题如何优化和合理构造进行讨论,第一章概述、第三章地基基础及地下室结构、第四章楼盖结构、第十二章混合结构是重点,附有实用图表和工程实例,可供建筑结构设计人员参考,有利提高设计质量及效率,也可供从事建筑结构工程的施工图文件审查、施工及监理等工作的人员参考。

本书编写中参考和引摘的文献资料较多,对原作者深表谢意。本书的内容涉及专业技术面广,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,编者将不胜感谢。

第一版前言

我国现行的建筑结构设计国家和行业标准、规范、规程，既是成熟经验的总结，又是经济技术的体现。随着我国经济的发展和建筑设计的多样化，建筑结构日趋复杂，例如，高层住宅底部设门厅、商店的剪力墙结构形成底部大空间的框支层，不少公共建筑设置连体结构，超高层建筑采用混合结构和加强层结构等等，但是由于现行规范、规程的许多内容是若干年前的滞后经验，已经不能满足当前建筑结构的需要。

现行建筑结构设计标准图集和手册资料，系根据现行规范、规程和编制单位、个人的经验及习惯做法编制而成的，其内容不仅滞后，而且有许多内容难免与当前的要求不相适应。

基于规范、规程的滞后性和最低要求，近些年建筑设计多样化、新结构新材料的不断涌现，以及由于市场经济的驱动，开发商或投资方要求设计方在保证设计质量和结构安全的前提下进行限额设计，有的要求每平方米单位钢筋用量写入设计合同中。因此，建筑结构设计人员应与时俱进，应该根据不同地区及具体工程情况，以创新精神进行设计优化和合理构造，以适应时代的需要。

本书内容是针对多高层钢筋混凝土结构如何进行设计优化与合理构造编写的，取材于现行规范、规程的内容并作了必要的补充和延伸，以及收集了北京、上海、广东等地方标准的一些规定和近年来许多单位及个人发表的科研成果、设计经验，共十三章，论述了从方案设计、初步设计到施工图设计，如何设计优化和合理构造，使设计作品达到技术先进、经济合理。本书的重点是设计中量大面广又涉及工程用料量和造价影响较大的地基基础、楼盖结构和剪力墙结构，以及近年大量兴建的混合结构和连体、错层、竖向柱转换等复杂结构。第十三章各类建筑结构经济指标也是重要内容。

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，提高设计质量和效率，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院校土建专业师生参考。

本书编写过程中得到李晨、朱杰、王滨夫、文辉、宗国华、王峻、季克平、徐斌、韩永康、王刚、阎颖、李军军、郭法成、束天明、张雷等工程师的帮助，特此表示感谢。编写中参考和引摘的文献资料较多，对原作者深表谢意。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

第一章 概述	1
1. 困难和挑战	1
2. 执行规范、规程应根据具体工程区别对待	1
3. 地方标准是规范、规程的补充和延伸	2
4. 结构设计技术要创新, 观念要适应市场经济	2
5. 结构概念设计的重要性	3
6. 对结构分析软件计算结果分析判断的必要性	4
7. 基于性能的抗震设计	5
8. 结构设计防止连续倒塌	16
第二章 基本规定	19
1. 与《荷载规范》有关的规定	19
2. 结构的设计使用年限、安全等级和设计基准期	21
3. 抗震设防分类及抗震等级	22
4. 结构抗震设计的基本原则	33
5. 多高层建筑结构平面布置	35
6. 多高层建筑结构竖向布置	39
7. 通过计算来限制建筑结构的不规则性	41
8. 建筑结构的水平位移限值和舒适度要求	44
9. 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	48
10. 多高层房屋适用高度和高宽比	50
11. 荷载组合和地震使用组合的效应	51
12. 构件承载力抗震调整系数 γ_{RE} 及结构重要性系数 γ_0	53
13. 钢筋混凝土构件可采用考虑塑性内力重分布的分析方法	53
14. 上部结构嵌固部位的规定	61
15. 超限高层建筑结构审查的规定内容	62
第三章 地基基础及地下室结构	73
1. 建筑地基基础设计的重要性	73
2. 多高层建筑基础设计中的基本概念	73
3. 建筑场地及地基要求	79
4. 设计需要注意的若干问题	83
5. 地基选择及基础埋深	88

6. 地基承载力计算	89
7. 抗浮设计水位及抗浮稳定验算	93
8. 独立柱基抗水板	95
9. 高层主楼地下室及地下车库楼盖结构选型	99
10. 高层建筑筏形基础	99
11. 地下室的基础梁可不考虑延性	108
12. 单独柱基设拉梁	109
13. 后浇带的构造及浇灌时间	110
14. 地下室外墙的计算与构造	111
15. 工程实例	114
第四章 楼盖结构	161
1. 楼盖结构的选型	161
2. 楼板厚度、梁截面高度的确定	162
3. 有关构造的规定	163
4. 梁及单向板手算方法	165
5. 梁斜截面受剪承载力的计算及应用图表	170
6. 梁受扭截面承载力手算方法及应用图表	182
7. 构件裂缝宽度验算	192
8. 受弯构件挠度计算及应用图表	199
9. 主梁支承次梁或上部柱子集中荷载时, 附加横向钢筋的确定及应用图表	208
10. 楼层梁支承在主梁或剪力墙上按固接计算的条件	211
11. 楼层次梁设计可不考虑延性	212
12. 后张无粘结预应力现浇楼板的应用范围	212
13. 楼层梁为使用功能的需要采用分段变截面高度	213
14. 居住建筑中常见的不规则楼板及阳台的设计	213
第五章 框架结构	218
1. 框架结构的特点及布置	218
2. 框架梁的截面设计及应用图表	220
3. 框架柱的截面设计及应用图表	226
4. 小剪跨比柱(短柱)的设计	236
5. 框架梁柱节点核心区截面抗震验算	238
6. 梁上开洞的计算和构造	243
第六章 剪力墙结构	248
1. 剪力墙结构的特点及适用范围	248
2. 剪力墙的分类及其延性	250
3. 一般剪力墙结构的设计要点	255
4. 结构布置	257
5. 抗震等级及底部加强部位高度	260

6. 剪力墙厚度的确定	261
7. 短肢剪力墙结构的设计	264
8. 结构计算及内力取值	267
9. 约束边缘构件和构造边缘构件	268
10. 剪力墙的水平 and 竖向分布钢筋	272
11. 连梁的延性和设计	276
12. 实例	283
第七章 框架-剪力墙结构	291
1. 框架-剪力墙结构的特点	291
2. 结构布置	292
3. 剪力墙合理数量确定的简化方法	295
4. 抗震等级	298
5. 内力调整	301
6. 构造要求	302
7. 实例	305
第八章 板柱-剪力墙结构	311
1. 结构特点及适用范围	311
2. 结构布置	312
3. 内力计算	313
4. 截面设计	318
5. 构造要求	325
6. 实例	330
第九章 底部大空间剪力墙结构	336
1. 结构特点及适用范围	336
2. 设计原则	337
3. 结构设计要点	338
4. 结构布置	339
5. 抗震等级	341
6. 底部加强部位高度及其结构内力调整	341
7. 转换构件的设计	343
8. 工程实例	364
第十章 筒体结构	380
1. 筒体结构的分类及受力特点	380
2. 框架-核心筒结构的设计要点	384
3. 筒中筒结构的设计要点	389
4. 加强层的作用及设计要点	396
5. 《上海筒体规程》和《广东高规补充》的有关规定	399

6. 工程实例	403
第十一章 大底盘多塔、连体、错层、竖向柱转换等复杂结构	408
1. 大底盘多塔结构	408
2. 连体结构	410
3. 连体结构工程实例	424
4. 错层结构	440
5. 错层结构工程实例	441
6. 竖向柱转换结构	446
7. 竖向柱转换结构工程实例	447
第十二章 混合结构	469
1. 结构特点及适用范围	469
2. 抗震等级	473
3. 结构布置	474
4. 结构设计要点	476
5. 构件设计	479
6. 钢管混凝土柱	483
7. 钢管混凝土组合柱和叠合柱	496
8. 钢骨混凝土柱	498
9. 端部设置型钢的剪力墙及钢板-混凝土组合剪力墙	502
10. 构造细部	506
11. 工程实例	523
第十三章 各类建筑结构经济指标	532
1. 掌握经济指标的必要性	532
2. 全国各地一些工程的统计	532
3. 工程材料用量和造价统计	533
4. 地下车库结构选型的比较	535
5. 商业建筑结构选型的比较	540
6. 超高层建筑结构的用料和造价	541
7. 不同结构平面布置形式的楼盖经济性分析探讨	542
参考文献	546

第一章 概 述

1. 困难和挑战

随着我国经济的发展和建筑设计的多样化, 建筑结构工程日趋复杂, 例如, 高层住宅剪力墙结构底部设置门厅、商场形成底部大空间, 不少公共建筑设置连体结构及上部柱与下部柱不连续, 某些住宅设跃层套房形成错层, 地下车库上部花园、多幢高层住宅、会所及其他用房地地下室长宽各数百米连成整体, 许多超高层建筑采用混合结构和设置加强层等等, 这些工程给建筑结构设计人员带来了困难和挑战。因此, 需要建筑结构工程师与时俱进, 不断进取, 有更高的理论知识、技能和创新精神去迎接挑战。

2. 执行规范、规程应根据具体工程区别对待

(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—2011 (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, 但是其条款内容是多年前的科研和设计经验的总结, 可能滞后。

(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了规定和要求, 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。

3. 地方标准是规范、规程的补充和延伸

(1) 我国地域辽阔，各省、市、自治区的经济发展和气候环境各不相同。现行规范、规程是全国性的，有的内容各地不一定完全适用，为了适应本地区建设具体情况，不少省市制订有地区性标准。例如，上海市有《建筑抗震设计规程》DGJ 08—9—2003（以下简称《上海抗震规程》），《钢筋混凝土高层建筑筒体结构设计规程》DGJ 08—31—2001（以下简称《上海筒体规程》），《地基基础设计规范》DGJ 08—11—2010（以下简称《上海地基规范》）等；北京市有《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》DBJ 01—501—2009（以下简称《北京地基规范》），《北京市建筑设计技术细则——结构专业》2004（以下简称《北京细则》）等；广东省有“广东省实施《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3—2002补充规定”（以下简称《广东高规补充》），广东省标准《建筑地基基础设计规范》DBJ 15—31—2003（以下简称《广东地基规范》）等。

(2) 各省市的地方标准是结合本地区具体情况，对国家标准及行业标准的规范、规程中某些不明确、不够具体或不适用于本地区的内容作了补充和延伸，具有更好的操作性，对提高设计质量和工作效率很有意义，有不少内容对其他省、市、地区也有借鉴和参考价值。为此，在本书各章节中将引入一些地方标准的重要内容供读者设计时参考。

(3) 设计外地工程应注意的事项：

- 1) 地基、施工条件的调查了解；
- 2) 当地有关标准、习惯做法；
- 3) 与当地施工图文件审查、质量检查部门沟通。

4. 结构设计技术要创新，观念要适应市场经济

(1) 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。

(2) 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。

(3) 为了适应市场经济对建筑结构设计人员的要求,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,应该从各专业、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,基础采用平板筏形基础,按结构设计人员一般概念,无梁楼盖及平板式筏形基础的混凝土量和钢筋用量比梁板式多,这是事实。但是,由于采用无梁楼盖和平板式筏形基础,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,其他如防水面积减少,降水费用降低,工期缩短,减去了梁板式筏形基础梁间回填材料等,因此,综合造价降低了许多。

(4) 建筑结构设计,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。对设计中的疑难问题和重要方案性问题,必要时可召开专家论证会。

5. 结构概念设计的重要性

(1) 概念设计是通过无数的事故分析,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) 高层建筑结构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,虽然分析计算是必需的,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、场地条件、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等。

6. 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）多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）多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。

7. 基于性能的抗震设计

(1) 基于性能的抗震设计是建筑结构抗震设计的一个新的重要发展,它的特点是:使抗震设计从宏观定性的目标向具体量化的多重目标过渡,业主(设计者)可选择所需的性能目标;抗震设计中更强调实施性能目标的深入分析和论证,有利于建筑结构的创新,经过论证(包括试验)可以采用现行标准规范中还未规定的新结构体系、新技术、新材料;有利于针对不同设防烈度、场地条件及建筑的重要性采用不同的性能目标和抗震措施。这一方法是一种发展方向。目前,这一方法在工程中还未得到广泛的应用,还有一些问题有待研究改进,诸如:地震作用的不确定性、结构分析模型和参数的选用存在不少经验因素、模型试验和震害资料欠缺、对非结构和设施的抗震性能要求和震后灾害估计缺乏研究。但是,这一方法随着在工程中的不断应用,必然会趋于成熟。

基于性能的抗震设计理念和方法,自 20 世纪 90 年代在美国兴起,并日益得到工程界的关注,美国的 ATC 40 (1996 年)、FEMA237 (1997 年)提出了既有建筑评定、加固中使用多重性能目标的建议,并提供了设计方法。美国加州结构工程师协会 SEAOC 于 1995 年提出了新建房屋基于性能的抗震设计。1998 年和 2000 年,美国 FEMA 又发布了几个有关基于性能的抗震设计文件。2003 年美国 ICC (International Code Council) 发布了《建筑物及设施的性能规范》,其内容广泛,涉及房屋的建筑、结构、非结构及设施的正常使用性能、遭遇各种灾害时(火、风、地震等)的性能、施工过程及长期使用性能,该规范对基于性能设计方法的重要准则作了明确的规定。日本也开始将抗震性能设计的思想正式列入设计和加固标准中,并已由建筑研究所(BRI)提出了一个性能标准。欧洲混凝土协会(CEB)于 2003 年出版了“钢筋混凝土建筑结构基于位移的抗震设计”报告。澳大利亚则在基于性能设计的整体框架以及建筑防火性能设计等方面作了许多研究,提出了相应的建筑规范(BCA 1996)。我国基于性能的抗震设计,在新颁布的《抗震规范》和《高规》中已有规定。

(2) 复杂和“超限”高层建筑设计比较适合采用基于性能的抗震设计方法。这些工程都属于不规则结构,甚至是特别不规则结构。这些工程的抗震设计不能套用现行标准,缺少明确具体的目标、依据和手段,必须按照原建设部 2002 年第 111 号部长令《超限高层建筑工程抗震设防管理规定》,以及《全国超限高层建筑工程抗震设防审查专家委员会抗震设防专项审查办法》和 2010 年 7 月 16 日住房和城乡建设部《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》的通知等的要求,设计者需要根据具体工程实际的超限情况,进行仔细的分析、专门的研究和论证,必要时还要进行模型试验,从而确定采取比标准规范的规定更加有效的具体的抗震措施,业主也需要提供相应的资助,设计者的论证还需要经过抗震设防专项审查,以期保证结构的抗震安全性能。这个设计程序某种意义上类似于抗震性能设计的基本步骤。这些年来,高层建筑工程抗震设防专项审查的实践表明,不少工程的设计和专项审查已经涉及基于性能抗震设计的理念和方法。有的工程的设计者主动提出采用基于性能的设计理念和要求,有的工程在抗震审查中由专家组的专家提出某

些基于性能的设计要求。可以认为，目前在我国复杂和超限高层建筑工程中逐步采用基于性能抗震设计的时机已经成熟。

国内外历次大地震的震害经验已经充分说明，抗震概念设计是决定结构抗震性能的重要因素。按本节要求采用抗震性能设计的工程，一般不能完全符合抗震概念设计的要求。结构工程师应根据有关抗震概念设计的规定，与建筑师协调改进结构方案，尽量减少结构不符合概念设计的情况和程度，不应采用严重不规则的结构方案。对于特别不规则的结构，可按本节规定进行抗震性能设计，但需慎重选用抗震性能目标，并进行深入的分析论证。

（3）结构抗震性能设计应分析结构方案不符合抗震概念设计的情况，选用适宜的结构抗震性能目标，并分析论证结构与结构抗震性能目标的符合性。

结构抗震性能目标应符合考虑抗震设防类别、设防烈度、场地条件、结构的特殊性、建造费用、震后损失和修复难易程度等各项因素选定。结构抗震性能目标分为 A、B、C、D 四个等级，结构抗震性能分为 1、2、3、4、5 五个水准（表 1-1），每个性能目标均与一组在指定地震地面运动下的结构抗震性能水准相对应。

结构抗震性能目标

表 1-1

性能水准 地震水准	性能目标	A	B	C	D
	多遇地震	1	1	1	1
	设防烈度地震	1	2	3	4
	预估的罕遇地震	2	3	4	5

地震地面运动一般分为三个水准，即多遇地震（小震）、设防烈度地震（中震）及预估的罕遇地震（大震）。在设计的地震地面运动下，与四级抗震性能目标对应的结构抗震性能水准的判断准则由本节的要求作出规定。A、B、C、D 四级性能目标的结构，在小震作用下均应满足第 1 抗震性能水准，即满足弹性设计要求；在中震或大震作用下，四种性能目标所要求的结构抗震性能水准有较大的区别。A 级性能目标是最高等级，中震作用下要求结构达到第 1 抗震性能水准，大震作用下要求结构达到第 2 抗震性能水准，即结构仍处于基本弹性状态；B 级性能目标，要求结构在中震作用下满足第 2 抗震性能水准，大震作用下满足第 3 抗震性能水准，结构仅有轻度损坏；C 级性能目标，要求结构在中震作用下满足第 3 抗震性能水准，大震作用下满足第 4 抗震性能水准，结构中度损坏；D 级性能目标是最低等级，要求结构在中震作用下满足第 4 抗震性能水准，大震作用下满足第 5 性能水准，结构有比较严重的损坏，但不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。

鉴于地震地面运动的不确定性以及对结构在强烈地震下非线性分析方法（计算模型及参数的选用等）存在不少经验因素，缺少从强震记录、设计施工资料到实际震害的验证，对结构抗震性能的判断难以十分准确，尤其是对于长周期的超高层建筑或特别不规则结构的判断难度更大，因此在性能目标选用中宜偏于安全一些。例如：特别不规则、房屋高度超过 B 级高度很多的高层建筑或处于不利地段的特别不规则结构，可考虑选用 A 级性能目标；房屋高度超过 B 级高度较多或大规则性超过本规程适用范围很多时，可考虑选用 B

级或 C 级性能目标；房屋高度超过 B 级高度或不规则性超过适用范围较多时，可考虑选用 C 级性能目标；房屋高度超过 A 级高度或不规则性超过适用范围较少时，可考虑选用 C 级或 D 级性能目标。结构方案中仅有部分区域结构布置比较复杂或结构的设防标准、场地条件等特殊性的，使设计人员难以直接按本规程规定的常规方法进行设计时，可考虑选用 C 级或 D 级性能目标。以上仅仅是举些例子，实际工程情况很复杂，需综合考虑各项因素。选用性能目标时，一般需征求业主和有关专家的意见。

(4) 结构抗震性能分析论证的重点是深入的计算分析和工程判断，找出结构有可能出现的薄弱部位，提出有针对性的抗震加强措施，必要的试验验证，分析论证结构可达到预期的抗震性能目标。一般需要进行如下工作：

- 1) 分析确定结构超过规程适用范围及不规则性的情况和程度；
- 2) 认定场地条件、抗震设防类别和地震动参数；
- 3) 深入的弹性和弹塑性计算分析（静力分析及时程分析）并判断计算结果的合理性；
- 4) 找出结构有可能出现的薄弱部位以及需要加强的关键部位，提出有针对性的抗震加强措施；
- 5) 必要时还需进行构件、节点或整体模型的抗震试验，补充提供论证依据，例如对本规程未列入的新型结构方案又无震害和试验依据或对计算分析难以判断、抗震概念难以接受的复杂结构方案；
- 6) 论证结构能满足所选用的抗震性能目标的要求。

(5) 结构抗震性能水准可按表 1-2 进行宏观判别，各种性能水准结构的楼板均不应出现受剪破坏。

各性能水准结构预期的震后性能状况

表 1-2

结构抗震性能水准	宏观损坏程度	损坏部位			继续使用的可能性
		普通竖向构件	关键构件	耗能构件	
第 1 水准	完好、无损坏	无损坏	无损坏	无损坏	不需修理即可继续使用
第 2 水准	基本完好、轻微损坏	无损坏	无损坏	轻微损坏	稍加修理即可继续使用
第 3 水准	轻度损坏	轻微损坏	轻微损坏	轻度损坏、部分中度损坏	一般修理后才可继续使用
第 4 水准	中度损坏	部分构件中度损坏	轻度损坏	中度损坏、部分比较严重损坏	修复或加固后才可继续使用
第 5 水准	比较严重损坏	部分构件比较严重损坏	中度损坏	比较严重损坏	需排除大修

注：“普通竖向构件”是指“关键构件”之外的竖向构件；“关键构件”是指该构件的失效可能引起结构的连接破坏或危及生命安全的严重破坏；“耗能构件”包括框架梁、剪力墙连梁及耗能支撑等。

表 1-2 列出了五个性能水准结构地震后的预期性能状况，包括损坏情况及继续使用的可能性，据此可对各性能水准结构的抗震性能进行宏观判断。本条所说的“关键构件”可由结构工程师根据工程实际情况分析确定。例如：水平转换构件及与其相连的竖向支承结构、大跨连体结构的连接体及与其相连的竖向支承构件、大悬挑结构的主要悬挑构件、加强层伸臂和周边环带结构中的某些关键构件及其支承结构、长短柱在同一楼层且数量相当时该层各个长短柱、细腰型平面很窄的连接楼板、扭转变形很大部位的竖向（斜向）构

件、重要的斜撑构件等。

(6) 不同抗震性能水准的结构设计可按下列规定进行：

1) 第 1 性能水准的结构，应满足弹性设计要求。小震作用下，其承载力和变形应符合《高规》的有关规定；在中震作用下，全部结构构件的抗震承载力应符合下式要求：

$$\gamma_G S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{Ekh}^* + \gamma_{Ev} S_{Ekv}^* \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (1-1)$$

式中 R_d 、 γ_{RE} ——构件承载力设计值、构件承载力抗震调整系数；

S_{GE} 、 γ_G 、 γ_{Eh} 、 γ_{Ev} ——见第二章第 11 节 (3) 条；

S_{Ekh}^* ——水平地震作用标准值的构件内力，不需乘以与抗震等级有关的增大系数；

S_{Ekv}^* ——竖向地震作用标准值的构件内力，不需乘以与抗震等级有关的增大系数。

第 1 性能水准结构，要求全部构件的抗震承载力满足弹性设计要求。小震作用下，结构的层间位移、全部结构构件的承载力及结构整体稳定等均应满足《高规》有关规定；结构构件的抗震等级不宜低于《高规》的有关规定，需要特别加强的构件可适当提高抗震等级，已为特一级的不再提高。中震或大震作用下，构件承载力需满足弹性设计要求，如式 (1-1)，式中构件组合内力计算中不计入风荷载作用效应的组合，地震作用标准值的构件内力 (S_{Ekh}^* 、 S_{Ekv}^*) 计算中不需要乘以与抗震等级有关的增大系数。

2) 第 2 性能水准的结构，在中震或大震作用下，普通竖向构件及关键构件的抗震承载力应符合式 (1-1) 的要求；耗能构件的受剪承载力应符合式 (1-1) 的要求，其正截面承载力应符合下式要求：

$$S_{GE} + S_{Ekh}^* + S_{Ekv}^* \leq R_k \quad (1-2)$$

式中 S_{GE} 、 S_{Ekh}^* 、 S_{Ekv}^* ——与式 (1.9-1) 中 S_{GE} 、 S_{Ekh}^* 、 S_{Ekv}^* 相同；

R_k ——材料强度标准值计算的截面承载力。

第 2 性能水准结构的设计要求与第 1 性能水准结构的差别是，框架梁、剪力墙连梁等耗能构件的正截面承载力 (抗弯) 只需要满足式 (1-2) 的要求，即满足“屈服承载力设计”。“屈服承载力设计”是指构件按材料强度标准值计算的承载力 R_k 不小于按重力荷载及地震作用标准值计算的构件组合内力，作用分项系数 (γ_G 、 γ_E) 及抗震承载力调整系数 γ_{RE} 均取 1.0。

3) 第 3 性能水准的结构应进行弹塑性分析，在中震或大震作用下，普通竖向构件及关键部位构件的正截面承载力应符合式 (1-2) 的要求，其受剪承载力应符合式 (1-1) 的要求；部分耗能构件进入屈服阶段，但抗剪承载力应符合式 (1-2) 的要求。大震作用下，结构薄弱部位的最大层间位移角应满足《高规》第 3.7.5 条的规定。

第 3 性能水准结构，允许部分框架梁、剪力墙连梁等耗能构件进入屈服阶段，竖向构件及关键构件正截面承载力应满足式 (1-1) “屈服承载力设计”的要求。整体结构进入弹塑性状态，应进行弹塑性分析。为方便设计，允许采用等效弹性方法计算竖向构件及关键部位构件的组合内力 (S_{GE} 、 S_{Ekh}^* 、 S_{Ekv}^*)，计算中可适当考虑结构阻尼比的增加 (增加值一般不大于 0.02) 以及剪力墙连梁刚度的折减 (刚度折减系数一般不小于 0.3)。实际工程设计中，可以先对底部加强部位和薄弱部位的竖向构件承载力按上述方法计算，再通过弹塑性分析校核全部竖向构件均未屈服。