



高层建筑结构优化 设计方法、案例及软件应用

焦柯 吴文勇 主编

中国城市出版社

高层建筑结构优化设计方法、案例及软件应用

焦 柯 吴文勇 主编

中国城市出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

高层建筑结构优化设计方法、案例及软件应用/焦柯, 吴文勇主编. —北京: 中国城市出版社, 2016. 4

ISBN 978-7-5074-3068-4

I. ①高… II. ①焦… ②吴… III. ①高层建筑—结构设计 IV. ①TU973

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 094751 号

责任编辑: 常 燕 付 娇

编 辑: 司 汉 季 帆

高层建筑结构优化设计方法、案例及软件应用

焦 柯 吴文勇 主编

*

中国城市出版社出版、发行

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

广州市一丰印刷有限公司印刷

*

开本: 880×1230 毫米 1/16 印张: 23.75 字数: 709 千字

2016 年 5 月第一版 2016 年 5 月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-5074-3068-4

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 100835)

本社网址: <http://www.citypress.cn>

本书编委会

主 编：焦 柯 吴文勇

章节负责人：赖鸿立 吴桂广 贾 苏 欧旻韬 梁施铭

参 编 人：童慧波 秦 政 陈永辉 周凯旋 陈剑佳

赵云龙 黎国彬 翁泽松

前 言

结构设计的过程其实就是对结构不断优化的过程，经过优化的结构蕴含着结构设计的核心价值。随着社会经济技术的进步和业主对高质量设计产品的需求，优化设计的目的和手段也在不断发展变化中。建筑结构的设计，特别是高层混凝土结构的设计有其特殊性，首先混凝土材料是不利于抗震的，抗震设计成为结构设计最重要的工作；其次建造高层建筑要消耗大量的建材和能源，并对环境有较大的影响，节材设计也是结构设计的重要工作。高层结构的优化设计就是紧紧围绕着抗震和节材两方面工作展开的。

提高结构抗震性能和降低建造成本，需要采取精细化设计方法对结构进行全面深入分析，保证建筑结构抗震设计质量，将材料用到结构抗震最需要的位置，减少建材浪费。提高结构抗震性能与节省建材不是对立的关系，提高材料的利用效率，不仅可以使结构具备合理的刚度和承载能力，也可以充分发挥每一份材料的作用。

本书在作者近年来参与完成的数十项高层（超高层）混凝土结构设计项目的基础上，通过大量的计算分析和比较研究，从高层建筑的结构方案、结构体系、楼盖布置、基础和施工图设计等方面，阐述了高层混凝土结构优化设计的基本方法和具体措施。这些内容对于进行高层结构抗震优化设计具有一定的指导意义。

优化设计离不开计算分析软件的应用，作者在优化计算方面进行了多年探索和应用软件开发。本书介绍了作者开发的高层建筑结构优化分析与设计软件（GSOPT）和任意组合截面承载力及延性计算软件（SRCTRACK）及其在工程中的应用。这些软件可用于辅助高层混凝土结构优化设计，能够显著提高结构优化设计的效率。

本书在编写过程中得到了广东省建筑设计研究院陈星总工的指导，书中引用的工程实例均来自于广东省建筑设计研究院近年来完成的工程项目，许多同事为本书编写提供了项目技术资料，在此一并表示感谢。

本书内容繁多，书中论述难免有不妥之处，望读者批评指正。

目 录

前 言	
第 1 章 概述	1
1.1 高层结构设计中的主要问题	1
1.1.1 荷载	1
1.1.2 材料	5
1.1.3 承载力	7
1.1.4 稳定性	9
1.1.5 刚度	10
1.2 结构优化设计的主要内容	12
1.2.1 结构方案优化	12
1.2.2 结构体系优化	13
1.2.3 楼盖结构优化	14
1.2.4 基础设计优化	14
1.2.5 结构施工图优化	15
1.3 结构优化设计软件	15
1.3.1 通用结构优化软件介绍	15
1.3.2 建筑结构优化软件计算方法	20
1.3.3 建筑结构优化设计软件 (GSOPT)	22
参考文献	22
第 2 章 结构方案优化	23
2.1 传力体系和刚度	23
2.1.1 竖向荷载下力的传递	23
2.1.2 水平荷载下力的传递	26
2.1.3 结构刚度突变部位应力集中	29
2.2 高层结构抗震概念设计	32
2.2.1 规范概念设计条文分类	32
2.2.2 概念设计关系图	35
2.3 结构选型布置	37
2.3.1 结构方案对建筑方案的影响分析	37
2.3.2 结构概念设计与建筑方案的协调	39
2.3.3 结构选型布置基本思路	40
2.3.4 常见建筑结构平面布置	44
2.3.5 常见建筑结构竖向布置	47
2.4 结构方案的经济分析	53
2.4.1 建筑体型	54
2.4.2 结构体系	56
2.4.3 结构材料	61
2.4.4 施工周期	62
2.5 工程实例	62
2.5.1 工程概况	62
2.5.2 方案介绍	63
2.5.3 各方案综合效益对比	65

2.5.4	结论	66
	参考文献	66
第3章	结构体系优化	67
3.1	常用结构体系的特点和适用范围	67
3.1.1	框架结构	67
3.1.2	剪力墙结构	67
3.1.3	框架—剪力墙结构	68
3.1.4	框架—核心筒结构	69
3.1.5	板柱—剪力墙结构	69
3.2	框架结构优化	70
3.2.1	变形和受力特点	71
3.2.2	计算模型的优化调整与节材	74
3.3	剪力墙结构优化	78
3.3.1	变形和受力特点	78
3.3.2	剪力墙的布置原则	82
3.3.3	计算参数合理取值及敏感性分析	84
3.3.4	材料用量的合理范围	92
3.4	框架核心筒结构优化	100
3.4.1	变形和受力特点	100
3.4.2	计算参数敏感性分析	100
3.4.3	核心筒尺寸与布置分析	106
3.4.4	二道防线分析	108
3.4.5	连梁的作用	117
3.4.6	框架梁的布置	120
3.5	板柱—剪力墙结构	122
3.5.1	结构受力特点	123
3.5.2	板柱—剪力墙结构与框剪结构的比较	124
3.6	高层结构减震优化	131
3.6.1	减震器选择	131
3.6.2	隔震器的应用	133
3.6.3	粘滞阻尼器的应用	136
3.6.4	约束屈曲支撑的应用	138
3.7	基于抗震性能分析的结构优化	140
3.7.1	基于大震分析的核心筒布置优化	141
3.7.2	超高层结构破坏特点分析及优化	142
3.7.3	受拉墙体性能分析及优化	148
	参考文献	154
第4章	楼盖结构优化	156
4.1	楼盖结构选型	156
4.1.1	常用楼盖结构形式	156
4.1.2	常用楼盖结构的受力特点及适用范围	158
4.2	常用楼盖结构的计算方法	161
4.2.1	梁板式楼盖	161
4.2.2	无梁楼盖、空心楼盖和密肋楼盖	165
4.2.3	钢—混凝土组合楼盖	170
4.2.4	预应力楼盖	172
4.3	上部结构楼盖经济性对比	174
4.3.1	框架结构	174
4.3.2	高层框架核心筒结构	176

4.4	地下室楼盖经济性对比	180
4.4.1	地下室顶板楼盖经济性比较	181
4.4.2	地下车库楼盖经济性比较	186
	参考文献	187
第5章	基础设计优化计算	188
5.1	基础设计的基本原则	188
5.1.1	基础安全性	188
5.1.2	基础经济性	188
5.1.3	基础选型	190
5.2	地基参数	190
5.2.1	地基土的分类	191
5.2.2	地基土的主要技术参数	192
5.3	扩展基础的计算	193
5.3.1	地基承载力验算	193
5.3.2	扩展基础承载力计算	194
5.3.3	扩展基础的基本造价	196
5.4	桩基础的计算	197
5.4.1	桩基计算基本要求	198
5.4.2	桩基变形计算	200
5.4.3	桩基础的基本造价	201
5.4.4	桩基础优化	203
5.5	筏形基础的计算	210
5.5.1	筏板冲切计算及筏板厚度	210
5.5.2	筏板抗浮设计	222
5.5.3	筏板配筋	223
5.6	高层住宅剪力墙结构基础优化实例	225
5.6.1	工程概况	225
5.6.2	筏板基础优化设计	226
	参考文献	231
第6章	结构施工图优化	232
6.1	计算模型	232
6.1.1	计算参数	232
6.1.2	结构布置复核	234
6.1.3	荷载检查	235
6.2	构件承载力检查	239
6.2.1	梁的强剪弱弯检查	239
6.2.2	柱的强剪弱弯检查	242
6.2.3	强柱弱梁检查	244
6.2.4	强节点弱构件检查	245
6.2.5	大悬挑检查	248
6.3	剪力墙构件优化	252
6.3.1	剪力墙约束边缘构件判断	252
6.3.2	合理确定约束边缘构件的 l_e 长度	254
6.3.3	约束边缘构件纵筋的优化	255
6.3.4	约束边缘构件箍筋的优化	259
6.3.5	墙身纵筋的合理直径搭配与合理间距	262
6.3.6	剪力墙拉筋的合理设置	263
6.3.7	混凝土的选用及优化	263
6.3.8	其他优化建议	263

6.4	框架柱优化	264
6.4.1	规范要求	264
6.4.2	截面尺寸	265
6.4.3	配筋控制原则	266
6.4.4	特殊框架柱构造	269
6.5	框架梁和次梁优化	269
6.5.1	规范要求	269
6.5.2	截面尺寸	271
6.5.3	框架梁及次梁钢筋	271
6.5.4	梁挠度裂缝验算	274
6.5.5	加腋梁应用	275
6.6	楼板优化	277
6.6.1	规范要求	277
6.6.2	截面尺寸	278
6.6.3	板钢筋	278
6.6.4	加腋板应用	280
6.7	组合构件承载力和延性计算	281
6.7.1	常用正截面承载力及延性计算软件介绍	281
6.7.2	SRTRACT 主要功能介绍	282
6.7.3	组合构件承载力计算原理	284
6.7.4	组合构件延性计算原理	285
6.7.5	SRTRACT 在工程中应用	286
	参考文献	290
第7章	HyperStudy 在高层建筑结构优化设计中的应用	291
7.1	优化控制程序 OptiDesign 介绍	291
7.1.1	OptiDesign 主要功能	291
7.1.2	OptiDesign 使用说明	291
7.2	不同优化算法效率对比	293
7.2.1	自适应响应面法 (Adaptive Response Surface Methodology)	293
7.2.2	遗传算法 (Genetic Algorithm)	294
7.2.3	可行方向法 (Method of Feasible Direction)	294
7.2.4	序列二次规划法 (Sequential Quadratic Programming)	294
7.3	关键构件的敏感性分析	297
7.3.1	DOE 灵敏度分析的基本思想	297
7.3.2	敏感度分析的操作流程	297
7.3.3	某超高层结构加强层布置 DOE 灵敏度分析	302
7.4	抗震性能优化分析	304
7.4.1	抗震性能优化操作流程	304
7.4.2	某高烈度区框架核心筒结构抗震性能优化	310
	参考文献	314
第8章	GSOPT 在高层建筑结构优化设计中的应用	315
8.1	GSOPT 软件主要功能	315
8.1.1	结构三维建模	315
8.1.2	结构有限元分析	318
8.1.3	结构设计	322
8.1.4	结构优化分析	324
8.1.5	结构优化流程	324
8.2	优化算法	325
8.2.1	响应面算法	325

8.2.2	数据实验	330
8.2.3	多级优化和网格搜索法	331
8.3	优化功能图形交互界面	333
8.3.1	构件分组	333
8.3.2	变量设置	334
8.3.3	约束条件和优化目标	335
8.3.4	优化结果输出	336
8.4	结构抗震性能优化	337
8.4.1	构件分组	337
8.4.2	变量敏感度分析	338
8.4.3	高层框剪结构关键构件敏感度分析	339
8.4.4	8度区超高层框筒结构抗震性能优化	342
8.4.5	超高层结构方案阶段加强层布置分析	348
8.5	构件强度优化	351
8.5.1	造价计算	351
8.5.2	利保商贸中心裙房梁构件超筋优化	352
8.6	综合造价优化	354
8.6.1	综合造价优化流程	354
8.6.2	某政务服务大楼抗震性能及造价优化分析	354
8.6.3	美华国际中心项目结构抗震性能及总重量优化	359
	参考文献	365

第1章 概 述

1.1 高层结构设计中的主要问题

高层建筑设计中要解决的问题很多，一般可以归纳为荷载作用、材料选择、结构承载力、结构稳定性、结构刚度等五方面问题。这五方面问题既相互独立，又密切联系和相互制约。

1.1.1 荷载

结构上的作用是指使结构产生效应（结构或构件的内力、应力、位移、应变、裂缝等）的各种原因的总称。建筑结构设计中的作用包括直接作用和间接作用。直接作用是指作用在结构上的力集（包括集中力和分布力），习惯上统称为荷载，如永久荷载、活荷载、风荷载等。间接作用是指那些不是直接以力集的形式出现的作用，如地基变形、混凝土收缩和徐变、温度变化以及地震等引起的作用等。

荷载（或作用）的大小直接决定了结构形式及材料的选用。因此结构体系、构件等优化前，要判断荷载作用是否合理，荷载取值过大则设计保守，造成建材浪费，荷载过小则不满足规范要求，结构不安全。规范对荷载取值进行了原则性规定，但需要对具体情况进行具体分析。表 1.1-1 列出高层建筑设计中常见荷载。

高层建筑结构的常见荷载及分类

表 1.1-1

荷载分类	荷载名称	荷载分类	荷载名称
恒载	结构自重	风荷载	整体风荷载
	承载物自重产生的压力		局部风荷载
	水平土压力	温度作用	整体温度作用
	竖向土压力		局部温度作用
	水浮力	雪荷载	屋面雪荷载
	地下水压力	偶然荷载	水平地震作用
	预应力荷载		竖向地震作用
	爆炸荷载		
活荷载	屋面活荷载		
	楼面活荷载		
	地面活荷载		

1. 恒载与活载

恒载是指在结构发挥效用的时间范围内（建筑物的设计寿命期），位置、方向、量值均不发生变化的荷载，构件的自重以及其他构件传来的相应构件的自重均属于恒载。荷载大小往往决定构件截面大小、地震力大小，且恒载的取值及布置具有一定的可优化性，因此荷载优化首先从恒载入手。

在结构发挥效用的时间范围内，位置、方向、量值三个参数中其中一个指标发生变化的荷载都属于活荷载。人群、风、家具等所形成的荷载均属于活荷载。

恒载是比较容易度量与计算的，确定的材料与截面，必然会有确定的构件自重；确定的结构体系以及确定的构件之间关系，会有确定性的传力路径与方式。活荷载是相对复杂的，必须预测可能出现荷载的变化状况、范围、幅度，才能选择应对活荷载的基本策略；对于各种活荷载可能出现的状况均进行设计、验算与比较，才能确定结构的安全性能。

2. 静荷载与动荷载

根据荷载作用量值的短期变化特征，可以将荷载分为静荷载与动荷载。

静荷载是指短时间尤其是瞬时，量值不发生变化或变化幅度不大的荷载。瞬时不发生变化，简单地讲就是不会对结构产生冲击作用的效果，如人群、自重、家具等。静荷载多由重力引起。

动荷载是指短时间量值发生较大变化的荷载，对于结构会产生冲击作用，如车辆、风、地震以及设备的运行等。除风、爆炸等特殊动荷载外，多数动荷载由重力与运动速度共同产生。

3. 荷载取值

作用在结构上的荷载是多种多样的，对于每一种荷载，都必须被确定下来，使之成为可以计算的荷载值——即确定计算荷载的特征值，该值可以代表该类荷载对于建筑物的作用，以该特征值来设计建筑物，结构是相对安全的。

(1) 荷载特征值取值的测算范围

一般来讲，建筑物所承受的荷载特征值的测算要按以下前提来进行：

1) 功能范围

所谓功能范围是指建筑物的设计功能，住宅、办公、商用、仓储等不同的功能建筑物所承担的对象不同，因此不同功能的建筑物与构筑物所承担的荷载也就是不一样的。

2) 时间范围

时间范围是指对于特定荷载的测算与统计的时间长度范围，测算时间越长，建筑物所面临的荷载峰值越大，尤其对于自然界的各种作用，如风、雪、雨、地震、洪水等。千年一遇的洪水所形成的水流荷载，要远远大于百年一遇的洪水荷载。一般来说，建筑物的设计基准期是该结构的荷载最短测算期，设计基准期越长，往往荷载越大。

3) 空间范围

空间范围是指建筑物所在地，也就是建筑物所面临的特定荷载发生区。对于自然界来讲，不同的区域与自然环境，荷载发生的状况不同，这种自然荷载的差异构成了对于不同荷载的荷载发生区域，如地震等级区、雪压等级区、降水等级区、风向与风压等级区等。

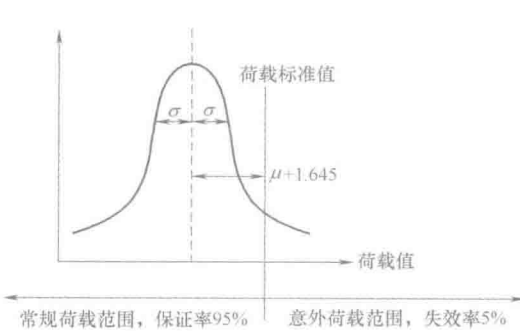


图 1.1-1 活荷载的取值模式

(2) 荷载特征值的确定

从活荷载的量值分布规律来看，不同荷载量值出现频率基本符合正态分布规律，如图 1.1-1 所示。根据正态分布函数的数学特征，确定特征荷载 $Q = \mu + 1.645\sigma$ ，该特征值被称为该荷载的标准值，记作 Q_k 。

根据工程需要，以 95% 为保证率指标，即以所选的荷载特征值衡量所有荷载出现的概率状况，95% 的荷载小于该指标——基于该荷载指标进行设计是相对安全的。

4. 荷载传递效率

人们在长期的实践、验证中不断积累经验，总结出一条最为基本的原理：传力不能走“弯路”——结构上的所有荷载，最佳传递路径是能被支座反力直接平衡的——即从荷载作用点通过结构构件、支座到达地基的传力路线越短，则构件用料越少、结构自重越轻、经济效益也越好。

人们由此出发，来改进、寻求、探索更经济合理的结构形式。根据结构承荷传力路线的长短，其荷载平衡方式有直接平衡、间接平衡与迂回平衡三种。

(1) 直接平衡

既然荷载应以最短、最直接途径来达到平衡，那么二力平衡是最直接的平衡。例如，在轴心受压柱中。荷载直接沿柱轴线以最简单、最直接、最短途径传入地基，达到平衡。

严格地按照力的最短途径来确定构件外形是最经济的方式，但在建筑中却很不现实。形成跨度是结构的基本要求，而跨度的支座两端距离较大，外荷载与支座反力并不共线，总要走一定“弯路”才能传到支座上去。因此，建筑中的承荷传力很少以这种直接平衡方式出现，大多是以间接甚至迂回平衡方式实现。

(2) 间接平衡

间接平衡是指通过间接的方式将荷载传递至支座上。虽非直接平衡，却是各类结构中最接近直接平衡，因而也是最好的承荷传力方式，拱传力是间接平衡的例子。

(3) 迂回平衡

直线的梁是典型的迂回平衡结构——依靠受弯来形成空间。由于弯矩的作用在截面内会产生两种相反的应力，因此截面内材料的利用率较低。

为在梁下获得使用空间，梁两端必须支于柱顶上才能构成房屋，因此梁柱结构是承荷与传力方式中路线最迂回、效率最差的结构。

梁柱相接的刚架是梁柱结构中的改善形式，其弯矩峰值减少。迂回传力必然产生弯矩，使得刚架仍是以抗弯为主、抗拉压为次的结构。

5. 风荷载

(1) 风的形成与危害

风是由于大气层的温度差、气压差等大气现象导致的空气流动现象。建筑物会对风形成阻挡，因此，风会对于建筑物形成反作用。建筑物受到的风的作用效果，受地形（空旷、多树、偏斜、多山、城乡、植被、凹凸不平等）、建筑类型（形状、大小、高度、材质、柔度、密封性、空旷性等）以及气流的性质（密度、方向、速度、稳定程度等）的影响，如图 1.1-2 所示。由于建筑物形体的关系，不同的建筑物以及建筑物的不同侧面所受的风的作用也不相同，但不论如何，风对建筑物会产生巨大的影响。

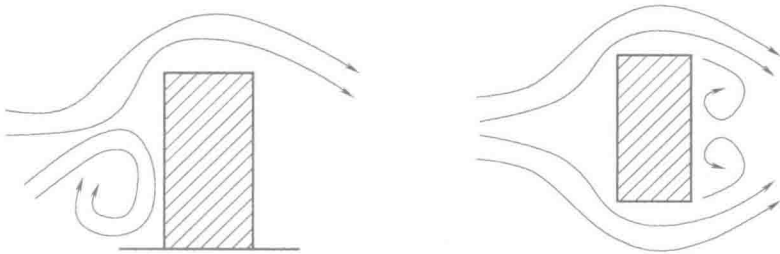


图 1.1-2 建筑物与风的相互作用

一般来讲，在风作用下导致的建筑物破坏有以下形式：

- 1) 主体结构变形导致内墙裂缝；
- 2) 长时间的风振效应使结构受到往复应力作用而发生局部疲劳破坏；
- 3) 外装饰，尤其是玻璃幕墙、广告牌受风力作用而脱落，对于地处繁华市区的高层建筑来讲，尤其危险；
- 4) 对于设计时为减少荷载而设计的轻屋面，受风的作用会向上浮起，甚至破坏。

(2) 设计主导风向

风的方向是复杂多变的、随机性的。通常以风玫瑰图表示风向的分布规律——表示某一地区的全年冬季、夏季的风向的分布状况。如图 1.1-3 所示的风玫瑰图，虚线表示该地区冬季风向的分布规律，可以看出，冬季西北风为主导风向；实线表示该地区夏季风向的分布规律，可以看出，夏季东南风为主导风向。在设计中，以标准风荷载与风玫瑰图的主导风向为该地区的设计标准。

(3) 基本风压

基本风压是指风力在迎风表面产生作用的标准值，是某一地区风荷载的基本参数。基本风压表示

的是一个地区风力的基本状态，是在诸多限制条件下测算出来的。在实际工程中，建筑物的具体位置的基本风压，需要经过相应的调整才能得到。

(4) 高度与风的作用

随着高度的增加，建筑物所受风力作用也随之加大（图 1.1-4），这是因为在高空处没有风的阻挡物，风速较大而造成的。高层建筑所承受的风力作用明显高于低层建筑物。

(5) 建筑体形与风的作用

建筑物所采用的平面与剖面形状，与其外表面所受风的作用大小与方向有密切关系：迎风面风力为压力，所受风作用强烈；侧风面随着与风的夹角的变化，风力逐渐由压力转变为吸力；背风面表现为吸力。

矩形、圆形、三角形等不同的平面形状的建筑，各个侧面所受的风力作用差异很大。一般来说，圆形、六边形、十字形、三角形平面所受风力作用小于矩形，“Y”形所受风力作用大于矩形，矩形平面建筑物做切角处理后，风力作用会降低。

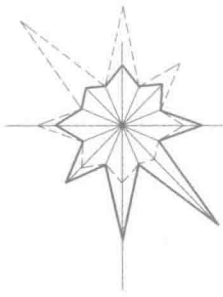


图 1.1-3 风玫瑰图

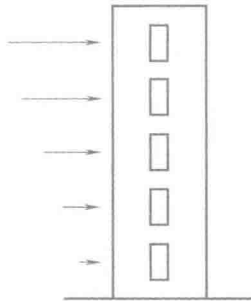


图 1.1-4 高度与风荷载

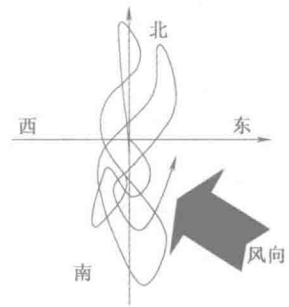


图 1.1-5 风的振动效应

(6) 风的振动效应

风是随机出现的，除了平均风，阵风对于建筑物的影响也不能忽视。阵风会产生强烈的风振效应，并且具有极大的不稳定性。图 1.1-5 记录的是某高耸桅杆结构的顶部在风的作用下所产生的运动轨迹，可以看出其轨迹是极不规律的。阵风会产生顺风的振动效应与侧风的振动效应，尤其对于高耸的细长建筑，侧风振动效应较大。

(7) 风荷载计算公式

综合各种因素，我国《建筑结构荷载规范》GB 50009—2012 采用公式 (1.1-1) 表达建筑物特定区域的风荷载基本设计指标：

$$w_k = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (1.1-1)$$

式中： w_k ——风荷载标准值；

β_z ——高度 Z 处的风振系数；

μ_s ——建筑物对于风荷载的体形系数；

μ_z ——风荷载的高度变化系数；

w_0 ——建筑物所在地区的基本风压。

6. 地震作用

与风荷载相比，地震作用的破坏性更加严重。与风荷载所不同的是，地震并非是一种直接的力学作用，而是在地面发生位移时，由于建筑物的惯性形成与地面的相对运动差，这种不协调就会造成建筑物严重的破坏。

(1) 地震的形成与危害

地震是由于地壳内部发生错动等地质因素引起的地表震颤（图 1.1-6）。地震时，在地球内部出现的弹性波叫作地震波。地震波主要包含纵波和横波。振动方向与传播方向一致的波为纵波（P 波），

振动方向与传播方向垂直的波为横波（S波），来自地下的横波能引起地面的剧烈的水平晃动，是地震时造成建筑物破坏的主要原因。

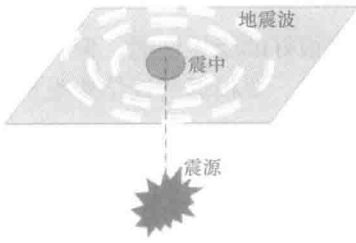


图 1.1-6 地震示意图

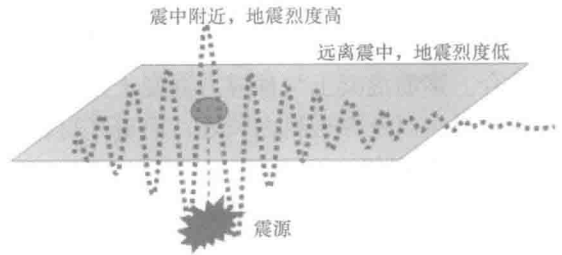


图 1.1-7 地震的烈度

用来衡量地震强度大小的尺度有两种：震级与地震烈度。震级是衡量地震大小的一种度量，地震烈度是指地面及房屋等建筑物受地震破坏的程度。距离震源近，破坏就大，烈度就高；距离震源远，破坏就小，烈度就低（图 1.1-7）。

（2）地震作用的基本理论

与直接荷载作用不同的是，地震作用不是由于外界的力主动产生的，而是由于建筑物自身惯性产生的，因此建筑物所受到的地震作用与建筑物自身质量关系密切。恒载的取值大小一定程度上也决定了地震力的大小，因此对恒载进行优化，不但影响水平构件的受力，也影响到地震力大小。

根据牛顿力学第一定律，当地面出现水平运动时，建筑物由于惯性作用并没有与地面一同运动，这种运动不协调所产生的作用力就是地震作用。建筑物重量越大，惯性越大，地震作用也越大。

在实际计算中，采用达朗伯原理，将地面运动所产生的惯性力等效为地面不动而施加到结构上的力，如图 1.1-8 所示。

（3）地震力计算

规范规定高度不超过 40m、以剪切变形为主且质量和刚度沿高度分布比较均匀的结构，以及近似于单质点体系的结构，可采用底部剪力法等简化方法。高层建筑高度大于 40m 时，地震力计算一般采用振型分解反应谱法，具体公式见《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010。

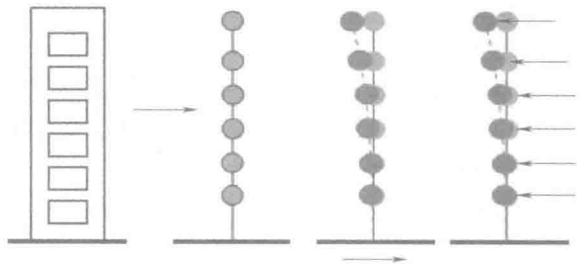


图 1.1-8 地震作用的等效

1.1.2 材料

1. 结构材料的基本要求

高层建筑结构的重要性以及结构所承担荷载的复杂性，对结构所采用的材料有着较高的要求。材料不仅需要有足够的强度，抵抗变形能力的要求也很高。

从微观来看，以现有的科技水平与工艺水平，任何天然材料与人工生产的材料，均存在着各种缺陷，如材质不均匀、不稳定等。材料强度分布图一般呈正态分布函数，规范要求按照 95% 的保证率的原则来选择特征强度指标，使高于该指标的材料强度的总概率为 95%，即失效概率为 5%。

高层建筑体量大，耗用材料多，造价非常高，因此在选择结构材料时，首先价格低廉是非常重要的前提条件，其次是材料要尽可能发挥自身性能，混凝土发挥其良好的抗压性能，钢材发挥其良好的抗拉性能，做到“好钢用在刀刃上”，才能做到结构造价最省。

当然，材料的价格并非施工成本的全部，施工的难易程度也是总成本的重要影响因素。施工复杂不仅会使施工投入量增加，而且还会使施工期限延长，导致资金占用时间增加，机会成本与风险加大。

2. 结构材料的利用效率

一切材料都应发挥出最大强度潜力，以材料所能承担的最理想的方式、最大的应力作用来设计结构体系，无疑是最有效率的。可从以下四方面考虑：

(1) 选材合宜

各种结构材料受力特性不同：脆性材料耐压，如钢材虽然有很好的受压性能，但其作为受拉材料更为适合。钢筋混凝土与预应力混凝土是结合两者长处的结构材料。要根据所选结构类型的受力状态来进行选料，以发挥材料之长处，而避开材料之弱点。

(2) 内力均匀

构件截面尺寸是按内力最危险截面、应力最危险点来确定的，因此，内力与应力分布越均匀越好，这样结构的效率才高。构件内力峰值要小，且沿构件纵轴内力分布要均匀。内力分布均匀，各个设计截面会趋于相等，材料利用率在所有的截面都接近 100%，施工也比较方便。内力不均匀，为了保证材料效率的发挥，各截面就会发生变化，不但施工困难，还会由于应力集中发生破坏。

(3) 应力均匀

构件横截面上正应力分布要均匀，才能充分发挥材料的强度潜力。轴向力的作用结果是截面上分布着均匀的应力。正应力分布不均匀的根本原因在于有弯矩的存在，弯矩越大，正应力分布越不均匀，因而越不能“材”尽其用。

(4) 强度破坏

结构设计要确保强度破坏先于失稳破坏。因此，为保证压杆稳定，对已满足强度要求的构件加大截面尺寸，必然多用材料。特别是钢结构受压的承载效果不如受拉，受拉力的结构是材料效率最高的结构形式，不过在实际工程中很少可以将结构设计成只有拉力。

3. 混凝土

混凝土是常见的建筑材料，作为一种优异的建筑材料，不仅价格相对低廉，可以就地取材，而且更可以被塑造成各种形状，满足建筑师在设计时对于建筑形体、曲线等的特殊需求。另外，混凝土耐火性能、耐腐蚀性能好，可以在许多恶劣的条件下使用。但是混凝土的缺点也是显而易见的，与其强度相比，其自重较大，因此很多采用混凝土的结构所承担的荷载，实际上就是结构的自重，这在大跨度结构中尤甚。同时，相对于混凝土较好的承压能力来讲，其抗拉能力很弱；混凝土的强度和力学位能具有极大的离散性与不稳定性。

现代的工程技术已经可以有效地控制混凝土的质量，比如采用钢筋、钢纤维等材料改善混凝土的性能、弥补其缺陷。从现在的建筑工程材料发展来看，可以大范围取代混凝土的材料还没有出现。

4. 建筑用钢材

钢材是优秀的建筑材料，与混凝土、木材相比，虽然质量密度较大，但其强度设计值较混凝土和木材要高得多（可以达到 10 倍以上），而且钢材质地均匀，各向同性，弹性模量大，有良好的塑性和韧性，为理想的弹塑性体，具有较好的延性，因而抗震及抗动力荷载性能好。

钢材的质量密度与屈服点的比值相对较低，因此在承载力相同的条件下，钢结构与钢筋混凝土结构、木结构相比，构件横截面较小，重量较轻，更加便于运输和安装；钢结构生产具备成批大件生产和高度准确性的特点，可以采用工厂制作、工地安装的施工方法，所以其生产作业面多，可缩短施工周期，进而为降低造价、提高效益创造条件，可节约资金占用时间，对于商业建筑更有利于提前进入市场。

钢材的缺点在于不耐火，当温度在 250℃ 以内时，钢的物理力学性质变化很小，但当温度达到 300℃ 以上，强度逐渐下降，达到 450 ~ 650℃，强度降为零。因此，钢结构可用于温度不高于 250℃ 的场合。在自身有特殊防火要求的建筑中，钢结构必须用耐火材料予以维护。当防火设计不当或者当防火层处于破坏的状况下，有可能产生灾难性的后果。

钢结构抗腐蚀性较差，新建造的钢结构一般都需仔细除锈、镀锌或刷涂料，以后隔一定时间又要重新刷涂料，维护费用较高。目前国内外正在发展不易锈蚀的耐候钢，可大量节省维护费用，但还未

能广泛采用。

5. 建筑用复合材料——钢筋混凝土与钢管混凝土

钢筋混凝土、钢管混凝土以及钢管混凝土属于钢与混凝土两种材料的复合材料。复合材料中，不同的材料成分往往承担不同的微观力学作用，其工作性能往往是单一材料所难以达到的。

(1) 钢筋混凝土

钢筋混凝土（SRC）结构是钢—混凝土组合结构的一种主要形式。以钢筋混凝土为主体结构的结构与构件，有时称之为组合结构。组合结构的力学实质在于钢与混凝土间的相互作用和协同互补，这种组合作用使此类结构具有一系列优越的力学性能。

SRC 结构比钢结构可节省大量钢材，增大截面刚度，克服了钢结构耐火性、耐久性差及易屈曲失稳等缺点，使钢材的性能得以充分发挥。采用 SRC 结构，一般可比纯钢结构节约钢材 50% 以上。与普通钢筋混凝土（RC）结构相比，钢管混凝土结构中的配钢率可比钢筋混凝土结构中的配钢率要大很多，因此可以在有限的截面面积中配置较多的钢材，所以钢管混凝土构件的承载能力可以高于同样外形的钢筋混凝土构件的承载能力一倍以上，减小构件的截面积，避免钢筋混凝土结构中的肥梁胖柱现象，增加建筑结构的使用面积和空间，产生较好的经济效益。

(2) 钢管混凝土

外包钢管对核心混凝土的约束作用使混凝土处于三向受压应力状态，延缓了混凝土的纵向开裂，而混凝土的存在避免或延缓了薄壁钢管的过早局部屈曲，所以这种组合作用使结构具有较高的承载能力。同时，该组合材料具有良好的塑性和韧性，因而抗震性能好。另外，高强混凝土的弱点——脆性大，延性差，可以通过钢管混凝土的组合构件形式较好的解决。

1.1.3 承载力

1. 结构承载能力极限状态

结构或构件达到最大承载能力或者达到不适于继续承载的变形状态，称为承载能力极限状态。当结构或构件出现了下列情况之一时，即认为超过了承载力的极限状态：（1）由于材料强度不够而破坏，或因疲劳而破坏，或产生过大的塑性变形而不能继续承载；（2）结构或构件丧失稳定性；（3）结构转变为机构体系；（4）整个结构或结构的某一部分失去了平衡，如整体倾覆。超过承载能力极限状态后，结构或构件就不能满足安全性的要求。常见的承载能力极限状态计算包括：抗压、抗拉、抗弯、抗剪、抗扭、抗冲切、局部受压等。

2. 混凝土结构的受弯承载力

(1) 适筋梁正截面工作的三个阶段

对配筋适当的钢筋混凝土梁，从开始加载到受弯破坏的全过程可划分为三个阶段：未开裂阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段。表 1.1-2 简要地列出了适筋梁正截面受弯三个受力阶段的主要特点。

(2) 正截面受弯的破坏形态

根据试验研究可知，受弯构件中纵向受拉钢筋的相对数量对其正截面的受力性能特别是受弯破坏形态有着很大影响。纵向受拉钢筋的相对数量一般用配筋率 ρ 来表示。对于单筋矩形截面，配筋率 ρ 是指纵向受拉钢筋截面面积 A_s 与梁或板的截面有效面积 bh_0 的比值，即

$$\rho = \frac{A_s}{bh_0} \quad (1.1-2)$$

当梁的截面尺寸和材料强度一定时，若改变配筋率 ρ ，不仅梁的受弯承载力会发生变化，而且梁在破坏阶段的受力性质也会发生明显的变化。当配筋率过大或过小时，甚至会使梁的破坏形态发生实质性的变化。根据正截面破坏特征的不同，可将受弯构件正截面受弯破坏形态分为适筋破坏、超筋破坏和少筋破坏三种，与之相应的梁称为适筋梁、超筋梁和少筋梁。