

内 容 提 要

本书结合我国正在修订的结构设计类规范,根据宽口径的土木工程专业培养要求编写。主要包括:建筑结构设计概论,单层排架结构设计,多层框架结构设计,剪力墙结构设计,框架—剪力墙结构设计,筒体和转换层结构设计,单、多层砌体房屋和底部框架、内框架房屋结构设计,结构程序分析等。对课程内容体系进行了大规模的整合和优化,涵盖了混凝土结构、钢结构、砌体结构和钢筋混凝土组合结构。

本书可以作为高等院校土木工程专业本科生的教材,也可供从事土木工程设计、施工、监理的工程师继续教育和学习新规范之用。

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构设计/邱洪兴,舒赣平等编著. —南京:东南大学出版社,2002.2

ISBN 7-81050-882-2

I. 建... II. ①邱...②舒... III. 建筑结构—结构设计—高等学校—教材 IV. TU318

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 007401 号

东南大学出版社出版发行
(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 溧阳市印刷厂印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:28.25 字数:705 千字

2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

印数:1~4 000 册 定价:46.00 元

目 录

1 结构设计概论	(1)
1.1 建筑结构的类型	(1)
1.2 结构设计的基本内容	(3)
1.2.1 结构设计的程序	(3)
1.2.2 结构设计的一般要求	(7)
1.3 建筑结构的作用	(8)
1.3.1 建筑结构作用的种类	(8)
1.3.2 荷载代表值	(9)
1.3.3 可变荷载的一般特性	(9)
1.3.4 楼面和屋面可变荷载	(10)
1.3.5 风荷载	(13)
1.4 结构的耐火设计	(19)
1.4.1 结构构件的耐火性能	(19)
1.4.2 耐火设计方法	(23)
1.4.3 结构耐火设计的发展趋势	(24)
2 单层排架结构	(27)
2.1 单层厂房的结构型式	(27)
2.2 排架结构厂房的结构组成和结构布置	(28)
2.2.1 结构组成与传力路线	(28)
2.2.2 结构布置	(31)
2.3 排架结构的计算	(38)
2.3.1 计算简图	(38)
2.3.2 荷载的计算	(39)
2.3.3 用剪力分配法计算等高排架	(46)
2.3.4 内力组合	(49)
2.3.5 排架结构的整体空间作用	(50)
2.3.6 排架计算中的几个问题	(53)
2.4 钢筋混凝土排架柱	(55)
2.4.1 柱的型式	(55)
2.4.2 矩形、工字形柱的设计	(57)
2.4.3 牛腿	(59)
2.5 柱下独立基础	(63)
2.5.1 柱下独立基础的型式	(63)
2.5.2 柱下扩展基础的设计	(64)
2.6 屋面构件	(72)

2.6.1	屋架、屋面梁的结构型式	(72)
2.6.2	混凝土屋面梁设计要点	(73)
2.6.3	屋架设计要点	(74)
2.6.4	屋面板、檩条及天窗架	(89)
2.7	吊车梁	(92)
2.7.1	吊车梁的受力特点	(92)
2.7.2	吊车梁的型式	(93)
2.7.3	吊车梁的设计要点	(95)
2.8	单层厂房设计示例	(98)
2.8.1	已知条件及设计要求	(98)
2.8.2	厂房平面剖面布置及结构构件选型	(98)
2.8.3	排架内力计算	(103)
2.8.4	内力组合	(117)
2.8.5	截面设计	(120)
2.8.6	基础设计	(126)
3	多层框架结构	(131)
3.1	多层框架结构的组成与布置	(131)
3.1.1	多层框架结构的组成	(131)
3.1.2	框架结构分类	(132)
3.1.3	框架结构布置	(133)
3.2	框架结构内力与侧移的近似计算方法	(139)
3.2.1	框架结构计算简图	(139)
3.2.2	竖向荷载作用下的分层法	(143)
3.2.3	水平荷载作用下的反弯点法	(144)
3.2.4	水平荷载作用下的 D 值法	(147)
3.2.5	框架结构侧移近似计算	(151)
3.2.6	框架结构的 $P - \Delta$ 效应与柱的计算长度	(153)
3.3	框架—支撑结构体系	(155)
3.3.1	框架—支撑结构的布置	(155)
3.3.2	框架—支撑结构的分析	(157)
3.4	框架结构构件设计	(161)
3.4.1	内力组合	(161)
3.4.2	混凝土框架构件设计	(165)
3.4.3	钢框架构件设计	(173)
3.4.4	钢骨混凝土构件设计	(189)
3.5	框架结构基础设计	(216)
3.5.1	基础的类型及其选型	(216)
3.5.2	基础分析模型	(218)
3.5.3	条形基础设计	(220)

3.5.4	十字形基础的内力分析	(222)
3.5.5	片筏基础内力分析要点	(224)
3.6	多层框架结构设计示例	(224)
4	高层建筑结构	(261)
4.1	高层建筑结构体系及其布置原则	(261)
4.1.1	高层结构的基本受力单元	(261)
4.1.2	高层结构体系	(262)
4.1.3	高层建筑结构布置原则	(265)
4.1.4	结构构件截面尺寸的估算	(268)
4.2	剪力墙结构分析	(269)
4.2.1	单榀剪力墙受到的水平荷载	(269)
4.2.2	单榀剪力墙的受力特点	(273)
4.2.3	水平荷载作用下的材料力学法	(274)
4.2.4	水平荷载作用下的连续栅片法	(277)
4.2.5	水平荷载作用下壁式框架的 D 值法	(284)
4.2.6	剪力墙分类判别方法	(286)
4.3	框架—剪力墙结构分析	(295)
4.3.1	框架—剪力墙结构的简化计算模型	(295)
4.3.2	框架—剪力墙铰接体系的基本方程	(296)
4.3.3	框架—剪力墙刚接体系的基本方程	(297)
4.3.4	框架—剪力墙结构的内力与侧移计算	(298)
4.3.5	框架—剪力墙的协同工作性能	(304)
4.4	剪力墙截面设计	(312)
4.4.1	钢筋混凝土剪力墙截面设计	(312)
4.4.2	型钢混凝土剪力墙截面承载力计算	(322)
4.5	筒体结构分析简介	(324)
4.5.1	筒体的受力特性	(324)
4.5.2	筒体结构的简化分析方法	(326)
4.6	转换层结构简介	(330)
4.6.1	转换层结构的设计原则	(330)
4.6.2	剪力墙结构中的转换梁	(330)
5	砌体结构	(338)
5.1	砌体结构布置	(338)
5.1.1	砌体结构种类	(338)
5.1.2	砌体结构的组成与布置	(340)
5.2	砌体结构分析	(343)
5.2.1	静力计算模型	(343)
5.2.2	刚性方案房屋的内力分析	(346)
5.2.3	弹性和刚弹性方案房屋的内力分析	(348)

5.2.4	上柔下刚多层房屋的内力分析	(349)
5.2.5	上刚下柔多层房屋的内力分析	(350)
5.2.6	内框架和底部框架砌体房屋的内力分析要点	(350)
5.2.7	砌体房屋的抗震分析要点	(351)
5.3	砌体房屋墙体设计	(353)
5.3.1	墙、柱的受压承载力计算	(353)
5.3.2	墙、柱的高厚比验算	(354)
5.3.3	墙体抗震承载力验算	(365)
5.3.4	配筋砌块砌体剪力墙的承载力计算	(367)
5.4	砌体房屋水平构件设计	(371)
5.4.1	过梁的计算与构造	(371)
5.4.2	墙梁的计算与构造	(374)
5.4.3	挑梁设计	(384)
5.5	砌体房屋的构造措施	(387)
5.5.1	墙体开裂及其防止措施	(387)
5.5.2	圈梁的构造要求	(388)
5.5.3	墙、柱的一般构造要求	(389)
6	结构程序分析简介	(392)
6.1	概述	(392)
6.2	结构程序分析的基本原理	(392)
6.2.1	单元模型	(392)
6.2.2	结构分析过程	(395)
6.3	常用结构设计程序介绍	(396)
6.3.1	TBSA 程序	(396)
6.3.2	PKPM 系列程序	(407)
6.4	常用结构有限元分析程序	(414)
6.4.1	有限元的基本概念	(414)
6.4.2	有限元的基本过程	(415)
6.4.3	常用有限元的简介	(415)
附录 1		(417)
附录 2		(429)
附录 3		(433)
参考文献		(440)

1 结构设计概论

作为结构设计的预备知识,本章将对建筑结构的类型、结构设计的基本内容、建筑结构的作用和结构的耐火设计作一介绍,重点讨论楼(屋)面可变荷载和风荷载的确定方法和取值标准。

1.1 建筑结构的类型

建筑物有各种不同的使用功能要求,因此有许多类型及分类方法。

根据建筑物的用途,可以分为工业建筑与民用建筑。

根据建筑物的层数,可以分为单层、多层、高层和超高层建筑。冶金、机械等重工业厂房一般采用单层结构,民用建筑中的体育馆、展览厅等大跨度建筑也常常是单层的。多层和高层的界限,世界各国的规定不尽相同。我国《钢筋混凝土高层建筑结构与施工规程》中规定 8 层及以上的建筑物为高层建筑,这也是必须设置电梯的界限;在《民用建筑设计防火规范》中,规定 10 层及以上的住宅、高度超过 24 m 除体育馆等大跨度公共建筑以外的其它民用建筑为高层建筑,其划分原则以我国消防车供水能力等为依据。一般将高度超过 100 m 的建筑称为超高层建筑。

建筑物根据所使用的结构材料可以分为:木结构、砌体结构、混凝土结构、钢结构和混合结构等。因木材来源少且有防火要求,木结构已很少使用。由于砌体材料的抗拉性能较差,纯粹的砌体结构很少,一般与其它材料混合使用,砌体材料多用于竖向构件,如砌体—木结构、砌体—混凝土结构。混合结构是指不同部位的结构构件由两种或两种以上结构材料组成的结构(同一部位的构件由不同结构材料组成一般称为组合结构,如钢筋混凝土、钢管混凝土、组合楼板),如砌体—混凝土结构、混凝土—钢结构。

建筑物根据其结构形式,可以分为排架结构、框架结构、剪力墙结构、筒体结构和大跨结构等。

梁、柱铰接,在结构中称为排架,单层工业厂房常采用排架结构。这种结构对地基的不均匀沉降不敏感。框架又称为刚架,是目前多层房屋的主要结构形式。剪力墙结构和筒体结构主要用于高层建筑。

大跨结构包括桁架结构、网架结构、壳体结构、膜结构、拱结构和索结构。

桁架有铰接和刚接之分,铰接桁架中的杆件为轴向受力构件,刚接桁架的杆件除有轴力外,还产生弯矩和剪力。目前世界上最大的预应力混凝土桁架为贝尔格莱德机库屋盖,跨度为 135.8 m。1993 年挪威建成的胶合层木桁架最大跨度达 85.8 m。

网架结构的杆件以钢管或型钢为主,有时也采用木、铝合金或塑料制作。我国第一座网架结构是 1964 年建成的上海师范学院球类房,平面尺寸为 31.5 m × 40.5 m。北京首都机场机库,东西方向一跨 95 m,南北方向两跨的门梁跨度 153 m。上海虹桥机场机库的跨度也达到 150 m。网架的形式很多,常用的有四角锥体网架、三角锥体网架和平面桁架系网架等。

壳体结构承受竖向荷载的性能非常优越,厚度可以做得很薄。常用的有穹顶、筒壳、折壳、双曲扁壳和双曲抛物面壳等,多用作屋盖结构。

日本出云的木结构圆顶,直径 140.7 m,是世界上最大的木结构。加拿大多伦多的多功能体育场采用了钢结构圆顶,圆形直径 192.4 m,可伸缩,1989 年建成。世界上最大的混凝土圆顶是美国西雅图金郡圆球顶,直径 202 m。

筒壳分长筒壳和短筒壳,跨度与宽度之比大于 1 的为长筒壳。北京展览馆、上海展览馆的展览大厅采用的都是短筒壳。

折壳亦称折板,由若干厚度很薄的平板构成,形成多边形横截面,最常用的是 V 形截面。1976 年建成的美国波士顿机场,采用混凝土折壳,跨度 76.8 m,是目前世界上跨度最大的折壳。我国的预应力混凝土 V 形折板,最大跨度已做到 30 m。

双曲扁壳是由一条曲线在另一条曲线上移动构成的曲面,一般采用抛物线或圆弧形移动曲面。1959 年建成的北京火车站候车大厅,采用扁壳,跨度 40 m。

双曲抛物面壳常称扭壳,是由一根直线沿两根不在同一水平面的直线上移动构成的曲面。这种曲面与垂直面的相交线,一个方向为正高斯曲率抛物线,另一个方向则为负高斯曲率的双曲线,因此而得名。

膜结构是又称充气薄膜结构,是在高强布罩内部充气用作建筑空间的覆盖物,自重很轻。日本东京后乐园的棒球场采用空气薄膜结构,跨度 201 m,高度 56.19 m。美国密执安州庞蒂亚光城的室内体育场,平面尺寸 234.9 m×183 m,是目前世界上规模最大的空气薄膜结构。

拱和索结构是桥梁的主要结构形式之一,在房屋建筑中也有应用。北京工人体育馆屋顶采用了索结构,设内外两个环,两环之间的上、下层索采用高强钢丝。德国法兰克福国际机场机库为双跨悬索结构,每跨 135 m。

随着科学技术水平的发展和人们对建筑物新的要求,会不断出现新的结构形式和结构材料。

上述的各种基本结构形式可以组合,形成复合结构形式,如框架—剪力墙结构,网—壳结构等。不同的结构形式可以使用不同的材料,如混凝土排架结构、钢排架结构等。

在后面的各章节中将介绍几种最基本的结构形式。第 2 章介绍单层排架结构;在第 3 章介绍多层框架结构(包括混凝土框架结构和钢框架结构);第 4 章将重点介绍高层剪力墙结构和框架—剪力墙结构,并对筒体结构作简单介绍;第 5 章介绍砌体混合结构。

建筑结构由上部结构和下部结构组成。通常将天然地坪或 ± 0.00 以上的部分称为上部结构,以下部分称下部结构。上部结构又有水平结构体系和竖向结构体系两部分组成。《工程结构设计原理》介绍的梁板结构设计即属于水平结构体系。大跨结构的种类就是根据水平结构体系进行分类的,其余的结构类型,一般根据竖向结构体系进行分类。本书主要介绍竖向结构体系的设计方法。

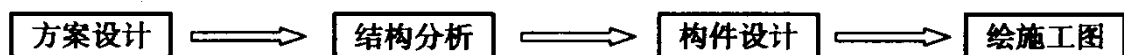
下部结构主要包括地下室和基础。基础可以分为柱下独立基础、墙下和柱下条形基础、十字型基础、片筏基础、箱基础和桩基础。

1.2 结构设计的基本内容

1.2.1 结构设计的程序

建筑物的设计包括建筑设计、结构设计、给排水设计、暖气通风设计和电气设计。每一部分的设计都应围绕设计的4个基本要求:功能要求、美观要求、经济要求和环保要求。功能要求是指建筑物必须符合使用要求;美观要求是指建筑物必须满足人们的审美情趣;经济要求是指建筑物应具有最佳的技术经济指标;环保要求指建筑物应符合可持续发展,成为绿色建筑。

建筑结构是一个建筑物发挥其使用功能的基础,结构设计是建筑物设计的一个重要组成部分,可以分为以下4个过程:



1) 方案设计

方案设计又称为初步设计。结构方案设计包括结构选型、结构布置和主要构件的截面尺寸估算。

(1) 结构选型

结构选型包括上部结构选型和基础选型,主要依据建筑物的功能要求、场地土的工程地质条件、现场施工条件、工期要求和当地的环境要求,经过方案比较和技术经济分析,加以确定。方案的选择应体现科学性、先进性、经济性和可实施性。科学性要求结构受力合理;先进性要求采用新技术、新材料、新结构和新工艺;经济性要求尽可能降低材料的消耗量和劳动力使用量以及建筑物的维护费用;可实施性要求方便施工。

(2) 结构布置

结构布置包括定位轴线、构件布置和设置变形缝。

定位轴线用来确定所有结构构件的水平位置,一般有横向定位轴线和纵向定位轴线,当建筑平面形状复杂时,还采用斜向定位轴线。横向定位轴线习惯上从左到右用①、②、③…表示;纵向定位轴线由下至上用A、B、C…表示。定位轴线与竖向承重构件的关系大致有三种:砌体结构定位轴线与承重墙体的距离是半砖或半砖的倍数;单层工业厂房排架结构纵向定位轴线与边柱重合(封闭结合)或之间加一个插入距(非封闭结合);其余结构的定位与竖向构件在高度方向较小截面尺寸的截面形心重合。

构件布置就是要确定构件的位置,包括平面位置和竖向位置。平面位置通过与定位轴线的关系加以确定;竖向位置用标高来确定。

一般在建筑物底层地面、各层楼面(包括屋面)以及基础底面等位置都应给出标高值。在建筑物中存在两种标高:建筑标高和结构标高。建筑标高指建筑物建造完毕后应有的标高;结构标高指结构构件表面的标高。因楼面结构层上面一般还有找平层、装饰层等建筑层,所以结构标高是建筑标高扣除建筑层厚度(当结构层上不做任何建筑层时,结构标高与建筑标高相同)。在结构设计施工图中既可以采用结构标高,也可以采用建筑标高,而由施工单位自行换算成结构标高。建筑标高以底层地面为 ± 0.00 ,往上用正值表示,往下用负值表示。

变形缝包括伸缩缝、沉降缝和防震缝。

设置伸缩缝是为了避免因房屋长度和宽度过大,温度变化导致结构内部产生很大的温度应力,造成对结构和非结构构件的损坏。建筑物伸缩缝的最大间距见表 1-1。

表 1-1 房屋伸缩缝的最大间距/m

结 构 类 别				间 距	
混凝土结构	排架	装配式	室 内	100	
			露 天	70	
	框架或框架—剪力墙	装配式	室 内	100	
			露 天	75	
		现浇式	露 天	35	
			室 内	外墙装配	65
				外墙现浇	55
	剪力墙	外墙装配		65	
外墙现浇		45			
砌体结构	整体式或装配整体式 混凝土屋盖	屋面有保温、隔热层		50	
		屋面无保温、隔热层		40	
	装配式无檩体系 混凝土屋盖	屋面有保温、隔热层		60	
		屋面无保温、隔热层		50	
	装配式有檩体系 混凝土屋盖	屋面有保温、隔热层		75	
		屋面无保温、隔热层		60	
	粘土瓦或石棉水泥瓦屋盖、木屋盖、石屋盖			100	
钢结构	采暖厂房和采暖地区的厂房			220	
	热车间及采暖地区的非采暖厂房			180	

设置沉降缝是为了避免因建筑物不同部位的结构类型、层数、荷载或地质情况不同导致不均匀沉降过大,引起结构或非结构构件的损坏。不同结构类型的设置原则详见后续各章节。

设置防震缝是为了避免建筑物不同部位因质量或刚度的不同,在地震发生时具有不同的振动频率而相互碰撞导致损坏。防震缝的设置宽度应满足表 1-2 的要求。

表 1-2 防震缝的最小宽度/mm

结构类型	设防烈度			
	6度	7度	8度	9度
框架	$4H+10$	$5H-5$	$7H-35$	$10H-80$
框架—剪力墙	$3.5H+9$	$4.2H-4$	$6H-30$	$8.5H-68$
剪力墙	$2.8H+7$	$3.5H-3$	$5H-25$	$7H-55$

注:表中 H 为相邻结构单元中较低单元的房屋高度,以 m 计, H 至少取 15 m。

沉降缝必须从基础分开,而伸缩缝和防震缝处的基础可以连在一起。在抗震设防区,伸缩缝和沉降缝的宽度均应满足防震缝的宽度要求。

由于变形缝的设置会给使用和建筑平面、立面处理带来一定的麻烦。所以尽量通过平面布置、结构构造和施工措施(如采用后浇带等)不设缝和少设缝。

(3) 结构截面尺寸估算

为了进行结构分析,结构布置完成后需要估算构件的截面尺寸。构件截面尺寸一般先根据变形条件和稳定条件,利用经验公式确定,截面设计发现不满足要求时再作调整。水平构件

根据挠度的限值和整体稳定条件可以得到截面高度与跨度的近似关系。竖向构件的截面尺寸根据结构的水平侧移限制条件估算,在抗震设防区,混凝土构件还应满足轴压比的限值,即轴力设计值与截面面积和混凝土抗压强度的比值。

2) 结构分析

结构分析是要计算结构在各种作用下的效应,它是结构设计的重要内容,也是本书的主要内容。结构分析的正确与否直接关系到所设计的结构能否满足安全性、适用性和耐久性等功能要求。

结构分析的核心问题是计算模型的确定,包括计算简图和采用的计算理论。

(1) 计算简图

确定计算简图时,需要对实际结构进行简化假定。简化过程应遵循三个原则:尽可能反映结构的实际受力特性;偏于安全和简单。为了得到接近实际受力状况的计算简图,需要对各影响因素进行分析,抓住主要因素,对于一些影响较大而又难于在模型中考虑的因素,应通过其它措施加以弥补。偏于安全是工程设计的要求,这样才能使结构的可靠度不低于目标可靠度。在满足工程精度的前提下,忽略一些次要因素,从而得到比较简单的计算模型,不仅可以大大减少计算工作量,并且有利于设计人员对结构受力特性的把握。

由于计算简图是实际结构的一种简化、近似,所以在采用某一种计算简图时,一定要了解其与实际结构的差别以及差别的变化规律,即哪些情况下差别比较大或比较小,了解其适用范围。

下面以在《工程结构设计原理》一书中学习过的现浇单向板肋梁楼盖的单向板计算简图为例,说明这一问题。单向板的计算简图取为连续梁,这意味着支座为不动铰支座。实际楼板与次梁整体浇筑,次梁作为板的支承存在挠度,因而板在支承处存在竖向位移,只有当次梁的挠度比板的挠度小得多时,才能忽略这种竖向位移,符合计算假定。图 1-1 所示的单向板,板厚较大,而次梁的高度相对较小。按连续单向板计算时, l_1 方向是主要受力方向, l_2 方向板的内力可忽略不计,这会带来一定的误差。实际

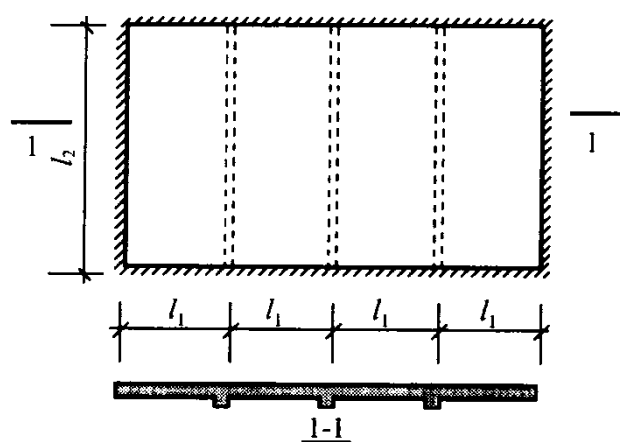


图 1-1 厚板的计算模式

上,此时若将多个肋部合并成以 l_2 为短跨方向的单向 T 形截面板进行计算较为合理。

不动铰支座的另一个假定是支承构件对被支承构件没有转动约束。当板与次梁整浇时,次梁的扭转刚度形成了对板转动的约束能力。计算简图中忽略转动约束造成的误差,在永久荷载作用下比较小,在可变荷载最不利布置下比较大。实际计算中通过增大永久荷载,相应减少可变荷载来弥补计算简图的误差。

(2) 计算理论

结构分析所采用的计算理论可以分为线弹性理论、塑性理论和非线性理论。

线弹性理论最为成熟,是目前普遍使用的一种计算理论,适用于常用结构的承载能力极限状态和正常使用极限状态的结构分析。线弹性理论假定材料和构件均是线弹性的。根据线弹性理论计算的作用效应与作用成正比,这为结构分析带来极大的便利。

塑性理论可以考虑材料的塑性性能,因而更符合结构在极限状态的受力状况。目前使用

塑性理论的实用分析方法主要有塑性内力重分布和塑性极限分析方法。前者如连续梁(连续板)的弯矩调幅法,后者如双向板的塑性铰线法。

非线性包括材料非线性和几何非线性。材料非线性是指材料、截面或构件的非线性本构关系,如应力—应变关系、弯矩—曲率关系、荷载—位移关系等。几何非线性是指由于结构变形对其内力的二阶效应使荷载效应与荷载之间呈现出的非线性特性。在进行高层钢框架的结构分析时,就必须考虑竖向荷载作用下由于结构侧移引起的附加内力。结构的非线性比线弹性分析复杂得多,一般用于大型复杂结构,考虑地震、温度或收缩变形等作用下的结构分析。

(3) 结构分析的数学方法

结构分析依据所采用的数学方法可以分为解析解和数值解两种。解析解又称为理论解,适用于比较简单的计算模型。由于实际工程结构并不像结构力学所介绍的计算模型那样理想化,本书介绍的大多是近似解析解。

数值解的方法很多,常用的有有限单元法、差分法、有限条法等,一般需要借助计算机程序进行计算。其中有限单元法的适用范围最广,可以计算各种复杂的结构形式和边界条件。目前已有许多成熟的结构设计和分析软件,如国内的 TBSA、TAT、PK-PM,国外的 ANSYS、SAP、ADINA。本书的第6章将对结构程序分析作简单介绍。

需要说明的是,尽管目前的结构分析基本上是通过计算机程序完成的,一些程序还可以自动生成施工图,但本书重点介绍的结构分析方法是基于手算的解析解。这是因为解析解概念清晰,有助于人们对结构受力特点的把握,掌握基本概念。作为一个优秀的结构工程师不仅要求掌握精确的结构分析方法,还要求能对结构问题作出快速的判断,这在方案设计阶段和处理各种工程事故,分析事故原因时显得尤为重要。而近似分析方法可以训练人的这种能力。

3) 构件设计

构件设计包括截面设计和节点设计两个部分。对于混凝土结构,截面设计有时也称为配筋计算,因为截面尺寸在方案设计阶段已初步确定,构件设计阶段所做的工作是确定钢筋的类型、放置位置和数量。节点设计也称为连接设计。对于钢结构,节点设计比截面设计更为重要。

构件设计由两项工作内容:计算和构造。在结构设计中一部分内容是根据计算确定的,而另一部分内容则是根据构造规定确定的。构造是计算的重要补充,两者是同等重要的,在各本设计规范中对构造都有明确的规定。初学者容易重计算、轻构造。

实际上,构造的内容很广泛,在方案设计阶段和构件设计阶段均涉及到构造。需要构造处理的原因大致可以分为两大类:一类是作为计算假定的保证;另一类是作为计算中忽略某个因素或某项内容的弥补和补充。

属于第一类原因的:例如,在混凝土结构构件的设计中,总是假定钢筋与混凝土之间有可靠的握裹,这需要通过一定的钢筋锚固长度、钢筋与钢筋之间的最小净距等要求来保证;再比如,分析高层结构在水平作用下的内力和变形时,常常假定楼盖在其平面内的刚度为无限大,因而需对楼盖刚度提出要求。

属于第二类原因的:例如,在一般的房屋结构分析中不考虑温度变化的影响,相应的构造措施是规定房屋伸缩缝的最大间距;再比如,钢受弯构件的承载能力极限状态包括强度和局部稳定两项内容,但为了简化,通常不进行局部稳定计算,而用板件的宽厚比限值来控制。

4) 绘制施工图

设计的最后一个阶段是绘制施工图。图是工程师的语言,工程师的设计意图是通过图纸来表达的。如同人的语言表达,图面的表达应该做到正确、规范、简明和美观。正确是指无误地反映计算成果;规范才能确保别人准确理解你的设计意图。

1.2.2 结构设计的一般要求

为了保证建筑结构的可靠度达到目标可靠度的要求,在设计中应遵循以下基本要求。

1) 计算内容

结构构件应进行承载能力极限状态的计算和正常使用极限状态的验算,具体内容包括:

(1) 所有的结构构件均应进行承载能力(包括屈曲失稳)计算,必要时尚应进行结构的倾覆(刚体失稳)、滑移和漂浮验算,处于抗震设防区的结构尚应进行抗震的承载力计算;

(2) 直接承受动力荷载的构件应进行疲劳强度验算;

(3) 对使用尚需要控制变形值的结构构件应进行变形验算;

(4) 对于可能出现裂缝的结构构件(如混凝土构件),当使用中要求不出现裂缝时,应进行抗裂验算;当使用上允许出现裂缝时,应进行裂缝宽度验算;

(5) 混凝土构件尚应进行耐久性设计。

2) 作用效应的组合

结构上数种作用效应同时发生时,应通过结构分析分别求出每一种作用下的效应后,考虑其可能的最不利组合。承载能力极限状态计算时采用作用效应设计值;对于正常使用极限状态,分别按作用的短期效应组合(标准组合或频遇组合)和长期效应组合(准永久组合)进行验算。

作用效应组合设计值在《工程结构设计原理》中已给出。该表达式需要找出荷载效应最大的一项可变荷载,其余的可变荷载采用组合值,使用上比较麻烦。对于常用的建筑结构可采用简化方法。

对于一般的框架、排架结构的非抗震设计,由可变荷载效应控制的组合,当仅考虑一项可变荷载时,组合值系数为 1;有两项或两项以上可变荷载参与组合时,荷载组合值系数取 0.85。由永久荷载效应控制的组合,可变荷载的组合值系数均取 1,且可变荷载的分项系数取 1,而永久荷载的分项系数取 1.35。

抗震设计时,风荷载的组合系数取 0.2,其余可变荷载组合系数取 1。一般情况下仅考虑水平地震作用,但对于 9 度设防区及高度超过 60 m 的 8 度设防区建筑还需考虑竖向地震作用。

3) 内力组合

对处于复合受力的结构构件,需要进行内力组合。梁作为受弯构件,起控制作用的内力包括弯矩和剪力,需要组合最大弯矩(包括负弯矩)以及相应的剪力,最大剪力以及相应的弯矩。柱和剪力墙等偏心受力构件,需要组合最大弯矩(包括负弯矩)以及相应的轴力和剪力,最大轴力以及相应的弯矩和剪力,最小轴力以及相应的弯矩和轴力。

4) 抗震设计

我国的抗震设防烈度为 6 度~9 度。建筑结构根据所在地区的烈度、结构类型和房屋高度采用不同的抗震等级,分为一、二、三、四 4 个等级。对应不同的抗震等级,有不同的计算和

构造要求。基于建筑结构的抗震设计有专门的教材介绍,本书不作重点介绍。书中除注明外均指非抗震。

对于抗震设防区的建筑,除了需满足非抗震设计的要求外,还需进行抗震承载力计算和地震作用下的变形验算。地震作用下结构构件的承载力计算需考虑承载力抗震调整系数(见表 1-3),采用以下设计表达式:

$$S \leqslant R/\gamma_{RE} \tag{1-1}$$

式中 S ——荷载效应;
 R ——结构抗力;
 γ_{RE} ——承载力抗震调整系数。

表 1-3 承载力抗震调整系数

结构材料	构件类型	受力状态	γ_{RE}
钢	柱	偏压	0.7
	钢结构厂房柱间支撑		0.8
	混凝土厂房柱间支撑		0.9
	构件焊接		1.0
砌体	无筋、网状配筋和水平配筋砖砌体剪力墙	受剪	1.0
	两端均设构造柱、芯柱的砌体剪力墙	受剪	0.9
	组合砖墙、配筋砌块的砌体剪力墙	偏心受压、拉和受剪	0.85
	自承重墙	受剪	0.75
	无筋砖柱	偏心受压	0.9
	组合砖柱	偏心受压	0.85
混凝土	梁	受弯	0.75
	轴压比小于 0.15 的柱	偏心受压	0.75
	轴压比大于 0.15 的柱	偏心受压	0.80
	剪力墙	偏心受压	0.85
	剪力墙	局部受压	1.0
	节点	受剪	0.85
	各类构件	受剪、偏拉	0.85

注:轴压比是轴向力设计值与柱截面面积和混凝土抗压强度设计值的比值, N/f_cA ;当仅考虑竖向地震作用组合时,各类结构构件的承载力调整系数均为 1.0。

1.3 建筑结构的作用

1.3.1 建筑结构作用的种类

在《工程结构设计原理》中,已对工程结构受到的各种作用进行了介绍。对于建筑结构,最常见的作用包括:构件和设备产生的重力荷载、楼面可变荷载(屋面还包括积灰荷载和雪荷载)、风荷载和地震作用。以上的重力荷载为永久荷载,地震作用为偶然荷载,其余均为可变荷载。其中重力荷载和楼面可变荷载是竖向荷载;风荷载是水平荷载;地震作用包括水平和竖向两个方向,但 9 度设防区才考虑竖向地震作用,一般仅考虑水平地震作用。

在设有吊车的工业厂房中,还有吊车荷载,吊车荷载属于可变荷载,包括竖向荷载和水平

荷载。在地下建筑的设计中还涉及到土压力和水压力,在储水、料仓等构筑物中则分别有水的侧压力和物料侧压力。

温度的变化也会在结构中产生内力和变形。对于烟囱、冷却塔等构筑物设计时必须考虑温度作用。一般建筑物受温度变化的影响主要有三种:室内外温差、日照温差和季节温差。目前,建筑物在温度作用下的结构分析方法尚不完善,对于单层和多层房屋,一般采取构造措施,如屋面隔热层、设置伸缩缝、增加构造筋等,而在结构计算中并不考虑。对于 30 层以上或 100 m 以上的超高层建筑,在结构设计中需要考虑温度作用。

1.3.2 荷载代表值

对于不同的设计内容,荷载将以不同的代表值出现。永久荷载以标准值作为其代表值,可变荷载根据设计要求分别以标准值、组合值、频遇值或准永久值作为代表值。

荷载标准值是指其在结构使用期间可能出现的最大荷载值。由于荷载本身的随机性,因而使用期间的最大荷载也是随机变量。《建筑结构设计统一标准》(以下简称《统一标准》)以设计基准期最大荷载概率分布的某个分位值作为该荷载的代表值。

当有两个或两个以上可变荷载在结构上要求同时考虑时,由于所有可变荷载同时达到其单独出现时可能达到的最大值的概率极小,因此,除主导荷载仍以其标准值为代表值外,其它伴随荷载均取小于标准值的组合值作为荷载代表值。可变荷载组合值为可变荷载标准值乘以荷载组合值系数。

频遇值是指在结构上时而出现的较大荷载值,计算时取可变荷载标准值乘以荷载频遇值系数。

准永久值指在结构上经常作用的荷载值,计算时取可变荷载标准值乘以准永久值系数。

一般情况下,结构或非结构构件自重构成的重力荷载因变异性不大,以平均值作为标准值,即可按设计规定的尺寸和材料的平均重度确定。但对于像屋面保温层、找平层等变异性较大的构件,应根据该荷载对结构有利或不利,分别取其自重的下限值和上限值。

下面先简单讨论可变荷载的一般特性,然后介绍楼面(屋面)可变荷载、风荷载标准值的确定方法,吊车荷载将在第 2 章介绍,地震作用的确定方法参见有关抗震设计教材。

1.3.3 可变荷载的一般特性

《工程结构设计原理》一书已介绍过,对于可变荷载需要用随机过程概率模型进行描述。《统一标准》将几种常遇可变荷载统一模型化为平稳二项随机过程 $\{Q(t), t \in [0, T]\}$ 。采用平稳二项随机过程模型,每种可变荷载必须给出三个统计要素,即:荷载出现一次的平均持续时间 $\tau = T/r$;在任一时段 τ 上荷载出现的概率 p 和任意时点随机变量的概率分布 $F_{Q_i}(x)$ 。《统一标准》对楼面均布活荷载和风荷载均采用极值 I 型作为任意时点随机变量的概率分布模型,即假定

$$F_{Q_i}(x) = \exp\{-\exp[\alpha(x - \beta)]\} \quad (1-2)$$

式中 $\alpha = 1.28255/\sigma$; $\beta = \mu - 0.5772/\alpha$;

σ ——子样均方差;

μ ——子样均值。

在考虑基本变量概率分布类型的一次二阶矩结构可靠度分析方法中,是将各种基本量作为随机变量为基础的,因而需要将上述荷载随机过程转化为随机变量。偏于安全,一般取荷载在设计基准期内的最大随机变量 Q_T 。对于等时段平稳二项随机过程,可以推导出设计基准期内最大荷载 Q_T 的概率分布为

$$F_{Q_T} = \{1 - p[1 - F_{Q_i}(x)]\}^r \quad (x \geq 0) \quad (1-3)$$

对于在每一时段上必然出现的可变荷载, $p = 1$, 式(1-3)可以写成

$$F_{Q_T} = [F_{Q_i}(x)]^r \quad (1-4a)$$

当 $p \neq 1$, 但如果式(1-3)中 $p[1 - F_{Q_i}(x)]$ 项充分小, 则利用级数展开, 可得到近似式

$$F_{Q_T} \approx [F_{Q_i}(x)]^m \quad (1-4b)$$

式中, $m = pr$ 为设计基准期内荷载的平均出现次数。

利用式(1-4b), 根据确定的分位值, 可以很容易求出荷载的标准值, 这一标准值与设计基准期有关。建筑物的设计基准期一般为 50 年, 但对于重要建筑, 设计基准期可能大于 50 年; 另一方面, 当进行加固改造设计时, 此时的时间域为下一个目标使用期, 一般小于 50 年。当设计基准期不同于标准基准期时, 各项荷载标准值应作相应调整。

在可变荷载的随机过程中, 荷载超过某水平 x 具有两种形式(参见《工程结构设计原理》图 2-3): 其一是在设计基准期 T 内, 荷载超过 x 的次数 n_x 或平均跨阈率 v_x (单位时间内超过 x 的平均次数); 其二是超过 x 的总持续时间 $T_x = \sum t_i$, 或与设计基准期 T 的比率 $\mu_x = T_x/T$ 。当考虑结构的局部损坏或疲劳破坏时, 设计中应根据荷载可能出现的次数, 也就是通过 v_x 来确定其频遇值; 当考虑结构在使用中引起不舒适感时, 就应根据较短的持续时间, 也就是通过 μ_x 来确定其频遇值, 一般取 $\mu = 0.1$ 。

准永久值在设计基准期内具有较长的总持续时间 T_x , 对结构的影响犹如永久荷载, 一般取 $\mu = 0.5$ 。如可变荷载被认为是各态历经的平稳随机过程, 则准永久值相当于荷载分布中的中值; 对于有可能划分为持久性荷载和临时性荷载的可变荷载, 可以直接引用荷载的持久性部分, 作为准永久荷载, 并取其适当的分位值作为准永久值。

1.3.4 楼面和屋面可变荷载

1) 楼面均布活荷载

楼面均布活荷载按其时间的变异特点, 可分为持久性可变荷载和临时性可变荷载。前者指经常出现的荷载, 如办公楼内的家具、设备、办公用具以及正常办公人员的体重等, 这些荷载除非在房间内进行一次搬迁, 一般变化不大; 后者指短暂出现的荷载, 如办公室内开会时人员的临时集中、临时堆放的物品重量等。持久性可变荷载在基准期内的任意时刻都存在, 故 $p = 1$ 。根据大量的统计调查数据, 在设计基准期 50 年内, 《统一标准》取 $r = 5$ 。对于临时性可变荷载, 取得精确统计数据比较困难, 进行分析后, 《统一标准》取平均出现次数 $m = 5$ 。

根据调查、统计, 办公楼持久性可变荷载和临时性可变荷载的统计参数分别为 $\mu_{L_i} = 386 \text{ N/m}^2$, $\sigma_i = 178 \text{ N/m}^2$ 和 $\mu_{L_s} = 335 \text{ N/m}^2$, $\sigma_s = 224 \text{ N/m}^2$, 分别代入式(1-4a)和式(1-4b)后

得到基准期年内最大持久可变荷载 L_{iT} 和最大临时性可变荷载 L_{rs} 的分布函数

$$\begin{cases} F_{L_{iT}}(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-360-139\ln r}{139}\right)\right] \\ F_{L_{rsT}}(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-245-190\ln m}{190}\right)\right] \end{cases} \quad (1-5)$$

基准期 T 年内最大总可变荷载是持久性可变荷载和临时性可变荷载的组合,取其中一个 T 年最大值和另一个瞬时值随机变量之和,即 $L_T = L_{iT} + L_{rs}$ 或 $L_T = L_i + L_{rsT}$, 于是 $\mu_{L_T} = \mu_{L_{iT}} + \mu_{L_{rs}}$ 或 $\mu_{L_T} = \mu_{L_i} + \mu_{L_{rsT}}$ 和 $\sigma_{L_T} = \sqrt{\sigma_{L_{iT}}^2 + \sigma_{L_{rs}}^2}$ 或 $\sigma_{L_T} = \sqrt{\sigma_{L_i}^2 + \sigma_{L_{rsT}}^2}$ 。楼面可变荷载的标准值按下式计算:

$$L_k = \mu_{L_T} + 1.5\sigma_{L_T} \quad (1-6)$$

表 1-4 是标准基准期,民用建筑楼面可变荷载的标准值及其组合值、频遇值和准永久值系数。

表 1-4 民用建筑楼面可变荷载的标准值及其组合值、频遇值和准永久值系数

项次	类别		标准值 /(kN·m ⁻²)	组合值 系数 Ψ_c	频遇值 系数 Ψ_f	准永久值 系数 Ψ_q
1	住宅、宿舍、旅馆、医院病房、托儿所、幼儿园、办公楼		1.5	0.7	0.5	0.5
2	教室、试验室、阅览室、会议室、医院门诊楼		2.0	0.7	0.6	0.5
3	食堂、餐厅、一般资料管理室		2.5	0.7	0.6	0.5
4	礼堂、剧场、影院、有固定座位的看台		3.0	0.7	0.5	0.3
	公共洗衣房				0.6	0.5
5	商店、展览厅、车站、港口、机场大厅及其旅客等候室		3.5	0.7	0.6	0.5
	无固定座位看台				0.5	0.3
6	健身房、演出舞台		4.0	0.7	0.6	0.5
	舞厅				0.6	0.3
7	书库、档案馆、储藏室		5.0	0.9	0.9	0.8
8	通风机房,电梯机房,包括设备自重		7.5	0.9	0.9	0.8
9	停车库	单向板楼盖(板跨不小于2m)	4.0	0.7	0.7	0.6
		双向板楼盖和无梁楼盖(柱网尺寸不小于6m×6m)	2.5	0.7	0.7	0.6
10	汽车通道	客车	5.0	0.7	0.5	0.3
		消防车	30.0	0.7	0.5	0.3
11	厨房	一般的	2.0	0.7	0.6	0.5
		餐厅的	4.0	0.7	0.6	0.5
12	浴室、厕所、盥洗室	第1项中的民用建筑	2.0	0.7	0.6	0.5
		其它民用建筑	2.5	0.7	0.6	0.5
13	走廊、门厅、楼梯	住宅、托儿所、幼儿园	1.5	0.7	0.5	0.4
		宿舍、旅馆、医院病房	2.0	0.7	0.5	0.4
		教室、餐厅、医院门诊楼、办公楼	2.5	0.7	0.6	0.5
		其它民用建筑	3.5	0.7	0.5	0.3
14	阳台		2.5	0.7	0.6	0.5

- 注：① 本表所给各项可变荷载适用于一般适用条件，当使用荷载较大或情况特殊时，应按实际情况采用。
- ② 第 7 项当书架高度超过 2 m 时，书库活荷载尚应按 2.5 kN/m^2 乘以书架高度（以 m 计）确定。
- ③ 第 9 项活荷载只适用于停放轿车的车库。当单向板板跨小于 2 m 时，可按《建筑结构荷载规范》（以下简称《荷载规范》）附录二规定，将车轮局部荷载换算为等效均布荷载，局部荷载值取 4.5 kN/m^2 ，分布在 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 的面积上。
- ④ 第 13 项楼梯活荷载，对预制构件踏步平板，尚应按 1.5 kN 集中荷载验算。
- ⑤ 第 14 项阳台荷载，当人群有可能密集时，宜按 3.5 kN/m^2 采用。
- ⑥ 第 10 项汽车通道荷载按单向板楼盖考虑，其中消防车按满载总重 3002.5 kN 的车辆最大轮压确定，轮压作用在 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ 的面积上。
- ⑦ 本表各项荷载未包括隔墙自重，当有隔墙但位置可自由布置时，隔墙荷载可取每延米长墙重的 $1/3$ 作为楼面活荷载的附加值，但附加值不小于 $0.5 \sim 1.0 \text{ kN/m}^2$ （对楼面活荷载较大者可取较小值，反之取较大值）。

当设计基准期变化时， r 和 m 相应变化，利用上式可求得不同基准期标准值的修正系数 K_L ，见表 1-5。

表 1-5 不同设计基准期楼面可变荷载标准值的修正系数

T	10 年	30 年	50 年	60 年	70 年	100 年
K_L	0.8	0.95	1.0	1.022	1.05	1.1

设计楼面梁、墙柱及基础时，表 1-4 中的楼面活荷载标准值在下列情况下应乘以规定的折减系数。

设计楼面梁时的折减系数：

- (1) 第 1 项当楼面梁从属面积超过 25 m^2 时，取 0.9；
- (2) 第 2~8 项当楼面梁从属面积超过 50 m^2 时，取 0.9；
- (3) 第 8、9 项对单向板楼盖的次梁和槽形板的纵肋取 0.8，对单向板楼盖的主梁取 0.6，对双向板楼盖的梁取 0.8；
- (4) 第 11~14 项采用与所属房屋类别相同的折减系数。

设计墙、柱和基础时的折减系数：

- (1) 第 1 项按表 1-6 规定采用；
- (2) 第 2~8 项采用与其楼面梁相同的折减系数；
- (3) 第 9、10 项对单向板楼盖取 0.6，对双向板楼盖取 0.8；
- (4) 第 11~14 项采用与所属房屋类别相同的折减系数。

表 1-6 活荷载按楼层的折减系数

墙、柱、基础计算截面以上的层数	1	2~3	4~5	6~8	9~20	> 20
计算截面以上各楼层活荷载总和的折减系数	1.0(0.9)	0.85	0.70	0.65	0.60	0.55

注：当楼面梁的从属面积超过 25 m^2 时，采用括号内的系数。

2) 屋面活荷载

屋面活荷载包括屋面均布活荷载、雪荷载和积灰荷载。屋面均布活荷载不与雪荷载同时考虑。工业与民用建筑房屋，其水平投影面上的屋面均布活荷载可按表 1-7 采用。对于生产中有大量排灰的厂房及其临近建筑，设计时需考虑屋面积灰荷载，常用工业厂房，其水平投影