

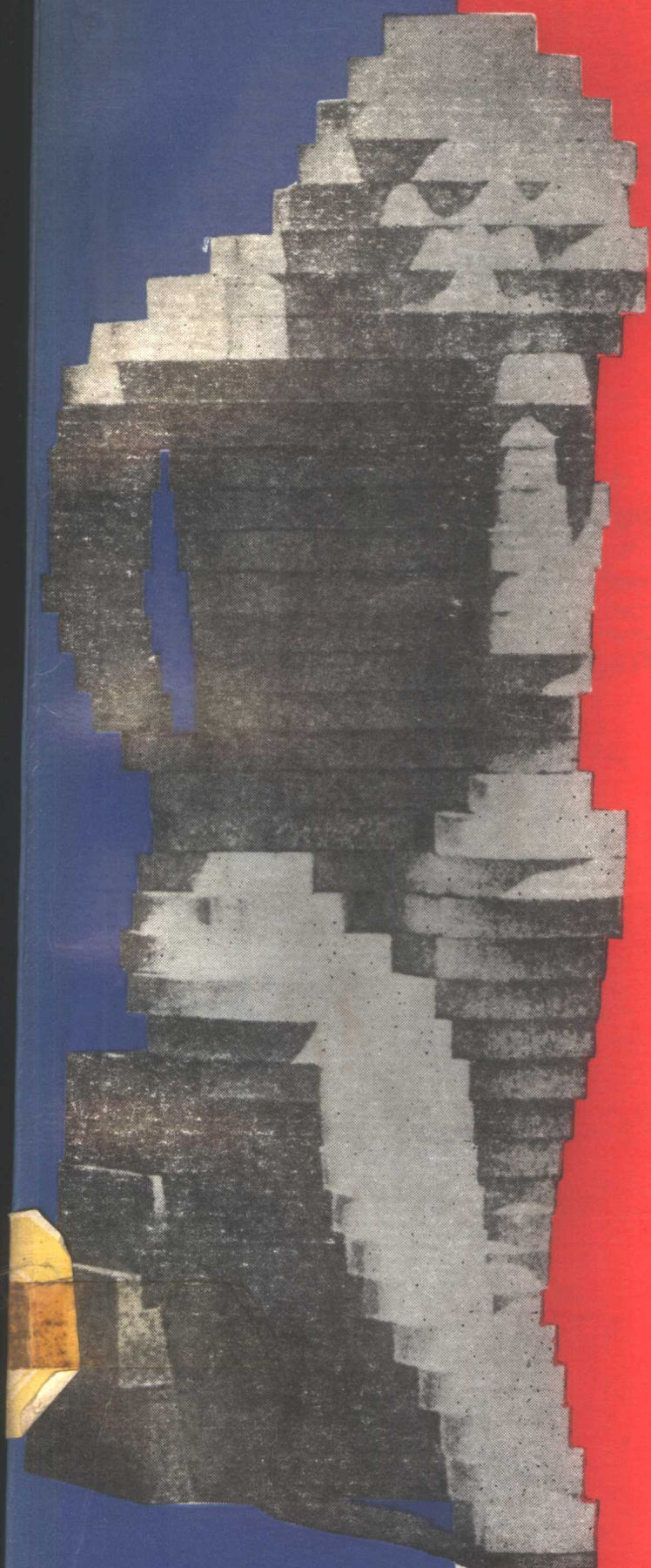
〔美〕E·G·纳维 著

姚崇德 张长瑞 于庆荣 王维汉 倪 钰 译

钢筋混凝土结构设计原理与计算

REINFORCED CONCRETE

A Fundamental Approach



钢筋混凝土结构设计原理与计算

〔美〕E.G.纳维 著

姚崇德 张长瑞 王维汉 倪钰 译

中国建筑工业出版社



本书依据美国新修订的ACI318-83规范,系统介绍了钢筋混凝土结构构件的设计原理和计算方法,手算与电算并重,附有大量设计算例。内容包括:钢筋混凝土的材料性能,结构可靠度,质量保证,梁、板、柱、深梁、牛腿、基础等的受力分析和设计,构造连接。书的最后一章详细介绍了各种构件的计算机程序、设计。

本书可供土建结构设计和科研人员学习参考,亦可作为高等院校土建专业的教学参考书。

Edward G. Nawy
REINFORCED CONCRETE
A Fundamental Approach
PRENTICE-HALL INC
New Jersey 1985

★ ★ ★
钢筋混凝土结构设计原理与计算

姚崇德 张长瑞 于庆荣
王维汉 倪 钰 译

★
中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

★
开本: 787×1092毫米 1/16印张: 31 $\frac{1}{2}$ 字数: 765 千字
1989年10月第一版 1989年10月第一次印刷
印数: 1— 5,100 册 定价: 19.60元
ISBN7—112—00559—0/TU·398
(5709)

译者序

本书根据美国新泽西州立大学土木与环境工程系前主任、资深教授 E.G. 纳维博士 1985 年出版新著 “Reinforced Concrete” 一书译出。

纳维博士在该校任教多年，曾任土木系主任，该校董事会董事。纳维博士为英国伦敦帝国理工学院客座教授，美国斯蒂芬工学院访问教授，并应聘为美国多家公司的顾问。

我国南京工学院于 1986 年聘请他为名誉教授。

纳维博士曾于 1982 年 9 月到天津大学土木系访问讲学，并与我系建立了固定的联系。

纳维博士具有丰富的教学、科研和实际工作的经验。曾设计过多种类型的工程结构，还在钢筋混凝土和预应力混凝土梁、板的开裂性能、延性、变形以及聚合物混凝土方面作过许多研究。他是美国 ACI224 委员会（开裂专题）的第一任主席，还积极参加了 ACI 其它一些委员会的工作，并任 ACI 新泽西州分会主席。

纳维博士撰写并发表了 90 多篇论文，著有专著两部。

由于其工作成绩斐然，曾多次获奖，其中有：ACI 亨利·肯尼迪奖，ACI 新泽西分会奖，1971 年的 PCI 奖，1978 年的 ACI 奖等。自 1967 年起被列入美国名人录。

本书具有下列特点：

1. 本书系按美国新修订的 ACI318-83 规范编写，，是目前同类书籍中内容最新的一本；

2. 本书广泛联系计算机的应用，各种设计步骤均用框图列出，并给出最常用的 HP41 型和苹果 II。型计算机的程序，可供读者直接选用；

3. 本书内容深浅兼顾，一方面着重阐明基本原理和设计方法，同时亦对一些最新发展方向给予介绍。可作为开设选修课及研究生学习用的参考教材。

由于本书的显著特点，截止 1986 年底，已为美国五十多所主要大学采用作为教科书。

我国自执行对内搞活、对外开放的政策以来，随着国际经济合作的增多和各经济开发区的迅速发展，我国在国外承包的土建工程，以及外资或中外合资的建筑工程将日益增多。因此，我国广大土建设计人员接触并按国外设计方法，特别是美国 ACI 规范设计方法，进行设计的机会亦将越来越多。译者希望，本书的出版对我国土建设计人员、高校师生以及科研人员研究并掌握美国规范设计方法起到有益的推动作用。

本书翻译分工如下：天津大学土木系姚崇德（前言、第二、七、八章），于庆荣（第五、六章），王维汉（第九、十二章），倪钰（第四、十三章），天津市地下铁路管理处张长瑞（第一、三、十、十一章），由姚崇德、张长瑞校阅。

天津市地下铁路管理处郝秀琴、天津市市政职工大学陈圆在译稿誊写过程中做了大量工作，在此一并致谢。

天津大学土木系主任 于庆荣

1986 年 12 月于天津大学

致 中 国 读 者

我怀着极为高兴和荣幸的心情将拙著中译本推荐给中华人民共和国建筑工程界和各大学的同行们。本书有可能是第一本向中国广大读者介绍当代美国在钢筋混凝土设计、研究和工艺方面最新实践的书籍。中译本的出版,将使美国和中国这两个伟大的国家在钢筋混凝土的研究和设计方面联系更为密切,并将对钢筋混凝土结构和工艺方面技术知识的进一步发展作出贡献。

我于1982年对天津大学土木系的访问、与该校以及中国工程界的同行们所建立的业务联系,使我得以了解中国在钢筋混凝土结构设计方面所做的巨大工作和表现出的非凡才干。对于天津大学土木系于庆荣主任、姚崇德副教授以及其它同行们为翻译本书所做的大量工作表示深切的谢意,对他们所作的这一卓越工作极为感激。

没有他们对这一工作所表现出的热情,没有他们在这领域内的渊博知识,没有我们相互间的亲密合作与尊重,中译本的出版是不可能的。

Dr. Edward G. Nawy

E. G. 纳维博士

美国新泽西州纽布朗斯维克市

前 言

钢筋混凝土是建筑上广泛应用的一种材料。学习土木工程课程的大学毕业生,至少应掌握钢筋混凝土的基本知识。此外,整个建筑物各个构件的设计只有通过多次试算和调整,即先假设一截面再进行验算方可完成。因此,初次接触钢筋混凝土结构设计的学生要把设计和验算结合起来,才能较快掌握。

本书系作者过去二十五年来在罗特格斯大学(新泽西州立大学)的讲稿以及多年来在钢筋混凝土和预应力混凝土教学与研究方面的经验基础上整理而成。本书的安排是先让学生熟悉素混凝土及其组成材料的性能,再讨论结构的性能。除对一些主要题目进行深入研讨外,本书的大部分内容可在一学期内讲完。

第一章至第四章简要介绍了混凝土的发展史,混凝土的配合比,长期荷载下混凝土的基本性能,还介绍了安全系数的演变过程。这些材料有助于对钢筋混凝土结构性能的理解,还有助于提高基本实验技能,增加在混凝土配合比、强度和性能要求方面的必要知识,以及结构工作可靠性的概念,这是每个工科学生都应懂得的。钢筋混凝土结构从设计到建成使用始终需要一个系统的办法来进行管理。本书通过对质量控制和质量保证问题的讨论,向读者适当地介绍了这种系统管理的方法。

混凝土是一种非弹性材料,在加载初期即已处于非线性状态,因而本书只讲极限强度法,有时又称为“破坏极限状态法”。书中以一定篇幅介绍开裂和挠度的适用性验算以及长期荷载下的效应。这样设计出来的结构,当所用的计算(设计)理论能正确描述所设计构件实际性能时,将满足所有使用荷载的要求。

第五、六、七、八章讲了梁、单向板等单向受力构件的受弯、受剪及其适用性能,重点在于让学生和工程师对钢筋混凝土构件内部的应变分布有所了解,弄懂设计公式中的强度储备和安全系数的基本意义。第九章讲了柱子及其它受压构件的设计和验算,并以类似于第五章梁的设计和验算方法研究了应变协调和应变分布的问题。第九章还详细介绍了如何绘制柱子双向受压的相互关系曲线并确定柱的尺寸。第十章是关于粘结力和钢筋锚固长度问题。第十二章是关于地基基础的设计问题。这样,除双向板外,结构各部分的设计问题都已讲完。

值得一提的是第六章。除了受剪外,还包括深梁、牛腿和支托的受力性能,并以足够的设计例题作理论的补充说明。之所以讲这些内容,是考虑到目前预制构件的使用数量与日俱增、对楼盖承受水平荷载效应的进一步理解,以及当前对不同高度建筑物的剪力墙和深梁的不断需要。此外,限于本书篇幅,第七章对受扭问题只作了部分叙述:从弹性和塑性材料纯扭的基本理论到弯剪扭共同作用下钢筋混凝土构件的设计。这些内容以及所附算例,是在这一领域内进行深入研究所必不可少的(详见参考文献)。

第十一章用了很大篇幅介绍了板和楼盖的设计和计算,先讲基本性能,然后用ACI规范方法和屈服线理论举例详细阐明钢筋混凝土楼盖的抗弯设计问题,还讲了多种类型楼盖

和可能遇到的竖向荷载作用下的极限荷载计算方法。本章还详细介绍了双向板的挠曲性能和双向板的计算，讨论了双向板的开裂机理，附有分析算例，使该章独具特色。

在此需强调的是当今计算机在此领域内的普遍应用。由于携带式小型计算机和微型计算机价格低廉，几乎每个学生均有能力购置这样一种工具。因此，第十三章讲了程序编制方法，并附有计算机程序，包括HP41C/CV/CX计算机和使用BASIC语言的Apple II。和II。型计算机程序，可对弯、剪、扭，复合受力（包括受压）、双向受荷的构件以及深梁，牛腿等进行计算或设计。这样，手册中图表的使用就降到最低限度。与每种设计问题相应的许多框图，列有设计步骤，读者使用起来毫无困难。这些程序均适用于微型和小型计算机。

每章附有精选出的钢筋混凝土构件破坏时的结构性能照片。这些照片是从作者及其硕士和博士研究生过去二十年来在鲁特格斯大学发表的研究报告中选出的。此外，书中附有一些建筑物的照片，大多在美国拍的，这些照片说明了钢筋混凝土结构的多样性。

本书根据ACI318-83规范（每六年修订一次）编写，但并非死扣规范而是强调基础知识的重要性。因此，希望读者不要把任何设计或计算步骤生搬硬套规范某些条款，而要养成从另一角度去熟悉ACI规范条文。因此，读者不仅要掌握本书中的基本理论，而且要把ACI规范理解为是一种不断进行修改和发展的文件。本书例题均采用英制计算，同时还换算成SI制（国际单位制）。

本书尽可能采用简明的方式编写，但无损于作为一门入门课程所必须具有的详细知识。预应力钢筋混凝土不在本书范围之内。本书主要内容是大学学习土木工程的三、四年级学生的基本课程。本书亦可为那些密切注视钢筋混凝土发展的工程师提供有益帮助，对那些关心基本理论的设计工作者也不失为一本很好的参考书。

E·G·纳维

目 录

译者序	
致中国读者	
前 言	
第一章 绪论	1
1.1 建筑用混凝土发展简史	1
1.2 钢筋混凝土的基本前提	2
1.3 截面的分析和设计	2
第二章 混凝土的材料	5
2.1 概述	5
2.2 硅酸盐水泥	5
2.3 水和空气	7
2.4 骨料	8
2.5 外加剂	11
参考文献	13
第三章 混凝土	14
3.1 概述	14
3.2 配合比理论	15
3.3 配合比设计的PCA方法	19
3.4 结构轻混凝土的配合比设计	20
3.5 采用标定抗压强度估算试拌混凝土的抗压强度	20
3.6 核屏蔽混凝土的配合比设计	24
3.7 混凝土的质量检查	24
3.8 混凝土的浇筑与养护	25
3.9 硬结后的混凝土性能	26
参考文献	34
习题	35
第四章 钢筋混凝土	36
4.1 概述	36
4.2 钢筋的种类和性能	36
4.3 钢筋间距和混凝土保护层	38
4.4 钢筋混凝土结构体系	39
4.5 钢筋混凝土构件的可靠性和安全性	40
4.6 ACI 规范的荷载系数和安全储备	43
4.7 设计强度与名义强度的关系 ——强度折减系数 ϕ	44
4.8 质量控制与质量保证	45
参考文献	49
第五章 梁的抗弯强度	50
5.1 概述	50
5.2 矩形折算应力图	51
5.3 界限配筋率 ρ_b	56
5.4 单筋矩形截面梁的抗弯计算	57
5.5 单筋梁设计的试算法	62
5.6 单向板	66
5.7 双筋截面	68
5.8 非矩形截面	75
5.9 T型与L型梁的计算	77
5.10 带翼截面设计的试算法步骤	82
参考文献	90
习题	90
第六章 梁的抗剪强度	94
6.1 概述	94
6.2 匀质梁的性能	95
6.3 钢筋混凝土梁作为非匀质构件的性能	97
6.4 无抗剪钢筋的钢筋混凝土梁	98
6.5 细长梁与中长梁的抗剪强度计算	99
6.6 腹筋的平面桁架比拟	101
6.7 抗剪腹筋设计步骤	104
6.8 抗剪腹筋设计实例	105
6.9 深梁	111
6.10 牛腿与支托	119
参考文献	126
习题	127
第七章 抗扭强度	129
7.1 概述	129
7.2 受纯扭的素混凝土构件	131
7.3 钢筋混凝土构件的扭转问题	135
7.4 弯剪扭共同作用下混凝土的性能	139
7.5 弯剪扭共同作用下钢筋混凝土梁的设计	141
参考文献	161
习题	162
第八章 梁和单向板的适用性	165
8.1 概述	165
8.2 研究挠度的重要意义	165
8.3 梁的变形特性	165

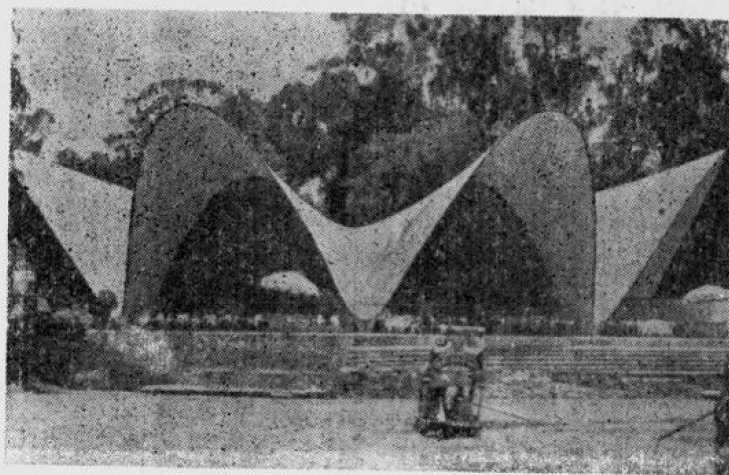
8.4 长期挠度.....	172	11.5 设计与计算步骤	296
8.5 梁和单向板的允许挠度.....	173	11.6 变形计算的直接法	315
8.6 挠度计算.....	174	11.7 双向板及平板的开裂性能及 裂缝控制	321
8.7 连续梁的挠度.....	178	11.8 适用于双向板的屈服线理论	325
8.8 挠度计算步骤及框图.....	187	参考文献	338
8.9 单向板的挠度控制.....	189	习题	339
8.10 梁和单向板的开裂计算	191	第十二章 基础	340
8.11 允许裂缝宽度	196	12.1 概述	340
参考文献	197	12.2 基础的类型	341
习题	198	12.3 基础的抗剪和抗弯性能	342
第九章 柱	200	12.4 基础底面土的承压力	344
9.1 概述.....	200	12.5 基础的抗弯设计	347
9.2 柱的类型.....	200	12.6 基础的抗剪设计	349
9.3 轴心受压短柱的强度.....	202	12.7 基础设计运算步骤	350
9.4 偏心受压柱的强度.....	205	12.8 基础设计实例	352
9.5 柱发生材料破坏的不同形式.....	207	12.9 其它类型基础的构造设计	364
9.6 惠特尼的近似解.....	216	参考文献	365
9.7 柱的强度折减系数 ϕ	221	习题	365
9.8 材料破坏控制时柱的荷载-弯矩 关系图 ($P-M$ 图)	223	第十三章 微型和小型计算机程序设计.....	367
9.9 构造要求.....	229	13.1 概述	367
9.10 非细长柱的设计步骤	231	13.2 矩形截面梁	371
9.11 非细长柱计算实例	232	13.3 带翼梁	380
9.12 长柱纵向压屈破坏状态	237	13.4 剪切和扭转	389
9.13 扩大弯矩法	240	13.5 深梁	403
9.14 二次分析法	241	13.6 牛腿	416
9.15 长柱设计步骤和框图	241	13.7 矩形截面柱: 中和轴高度 c 值 给定时的计算方法	421
9.16 双向偏心受压构件	246	13.8 圆形截面柱: 中和轴高度 c 值 给定时的计算方法	438
参考文献	255	13.9 双向弯曲的矩形截面柱	451
习题	256	13.10 台式和便携式小型计算机的 使用.....	458
第十章 钢筋的锚固与接头.....	259	13.11 Apple II. 台式小型计算机程序; 弯、剪、扭共同作用下的矩形 截面梁.....	459
10.1 概述	259	13.12 Apple II. 台式小型计算机程序; 受压构件.....	468
10.2 锚固应力的形成	259	参考文献	490
10.3 基本锚固长度	262	习题	490
10.4 连续梁抗弯钢筋的锚固	268	附录一 常用英制与国际单位制换算 关系表	491
10.5 钢筋接头	273	附录二 钢筋的几何数据表	491
10.6 梁内钢筋锚固长度与接头设计 实例.....	274	附录三 不同钢筋组合时的截面面积表	493
10.7 钢筋详图及钢筋表	278	附录四 每英尺板带的钢筋面积表	494
参考文献	282	附录五 T形截面的毛截面惯性矩	495
习题	282		
第十一章 双向板及平板设计.....	283		
11.1 概述: 各种计算方法简介	283		
11.2 双向板及平板的受弯性能	285		
11.3 直接设计法	286		
11.4 分配后的设计弯矩值和板的配筋.....	289		

第一章 绪 论

1.1 建筑用混凝土发展简史

在古希腊, 罗马, 甚至可能在更早的古代文明中已经使用了混凝土及其胶结材料, 例如火山灰材料, 然而只是在十九世纪初期才开始广泛地使用这些材料。1801年考格涅特(F. Coignet)发表了有关建筑原理的论著, 指出了这种材料抗拉性能较差。兰博特(J. L. Lambot)在1850年首先建造了一艘小型水泥船, 并于1855年在巴黎博览会上展出。法国花匠莫尼尔(J. Monier)在1867年制作了以金属骨架作配筋的混凝土花盆并以此获得专利。1886年康纳(Koenen)发表了第一篇关于混凝土结构的理论与设计的手稿。1906年, 特纳(C. A. P. Turner)研制了第一个无梁平板。

其后, 到1910年, 德国钢筋混凝土委员会, 奥地利混凝土委员会, 美国混凝土学会, 英国混凝土学会均已相继建立, 从而促使在这个领域内取得了明显的进步。到1920年就已先后建造了许多钢筋混凝土建筑物、桥梁和液体容器, 开始进入了直线形和圆形预应力钢筋混凝土结构新时代。



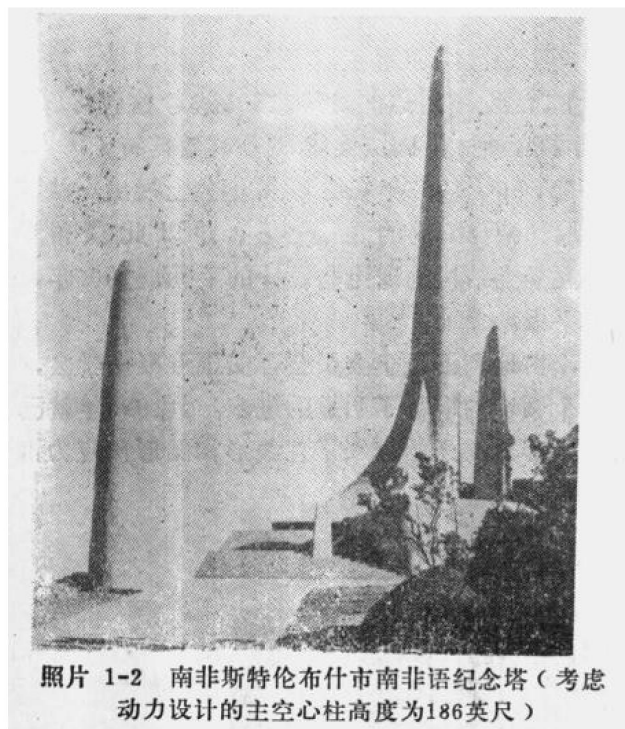
照片 1-1 墨西哥Felix Candela's Xochimilco饭店

由于钢筋混凝土及预应力混凝土在分析、设计与施工等方面的工艺与科研飞速发展, 出现了许多独特的建筑物, 如美国波士顿市的Kresge大会堂, 英国的1951节日穹顶, 美国芝加哥市的Marina摩天大楼, 湖滨大楼以及许许多多其它建筑物, 见照片1-1~1-6。

苏联在1938年编制规范时已采用了极限强度理论, 英国和美国于1956年亦相继加以采

用。其他一些国家也先后在各自的设计规范中采用了极限理论。新的混凝土组成材料及制品,包括抗压强度高达20,000磅/英寸²(137.9MPa)、抗拉强度高达1800磅/英寸²(12.41MPa)的高强混凝土已经盛行。强度大于60,000磅/英寸²(413.7MPa)的钢筋和极限强度大于100,000磅/英寸²(689.5MPa)的高强焊接钢丝网等亦已使用。此外还生产出各种型式的变形钢筋。这种钢筋表面的花纹可以最大程度地提高钢筋与其周围混凝土之间的粘着力。这是混凝土作为一种建筑材料所不可缺少的。极限强度超过300,000磅/英寸²(2068MPa)的预应力钢筋也已出现。

所有上述发展,尤其是近二十年来进行的大量实验和理论研究,形成了严格的理论及实用的规范。为了增加对钢筋混凝土构件基本工作性能的了解,采用简化的方法是十分必要的。



照片 1-2 南非斯特伦布什市南非语纪念塔(考虑动力设计的主空心柱高度为186英尺)

1.2 钢筋混凝土的基本前提

素混凝土是由水泥、水、细骨料、粗骨料(碎石或卵石)及其它外加剂等材料经拌合,凝固,硬化而成。将可塑的混凝土拌合物注入模板内,使其凝结,然后进行养护,以加速水泥与水的水化反应,并使混凝土硬结。其最终制成品具有较高的抗压强度和较低的抗拉性能,其抗拉强度约为抗压强度的十分之一。因此,截面的受拉区必须配置受拉钢筋和抗剪钢筋以增强钢筋混凝土构件中较弱的受拉区。

由于钢筋混凝土截面的组成,与一般本质或钢质截面在匀质性上存在差异,故需对结构设计的基本原理进行修改,这在本书以后有关章节中将予阐明。将钢筋混凝土这种非匀质截面的两种组成部分按一定的比例恰当安排,使这两种材料得到最好的利用。这一要求是可以达到的,因混凝土由配料搅拌成湿拌合物,注入适当的模板后,经过震捣并凝固硬化,故混凝土易于做成任何需要的形状。如果拌制混凝土的材料配合比恰当,则混凝土制成品的强度较高,经久耐用,配置钢筋后,可以用作任何结构体系的主要受力构件。

1.3 截面的分析和设计

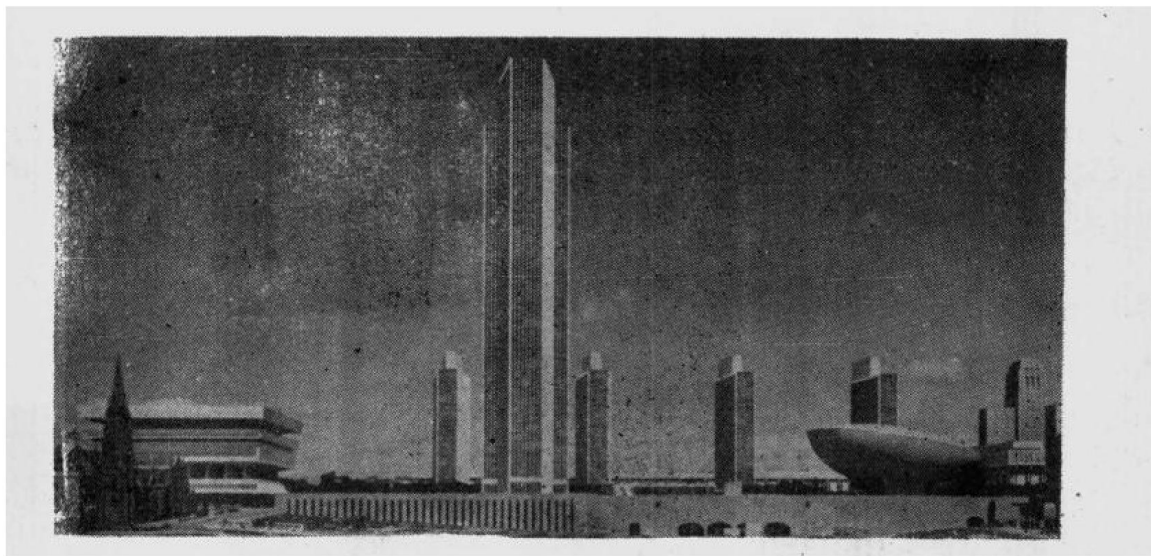
由上述讨论可知,设计钢筋混凝土构件时显然需要处理大量的参数,诸如宽度、高度等几何尺寸,配筋的面积,钢筋及混凝土的应变,钢筋的应力等等。因此,在选择混凝土截面时需要进行试算并作调整,根据施工现场条件、混凝土原材料的供应情况、业主对建筑和净空的特殊要求、所用的设计规范以及建筑物周围环境条件等最后选定截面。

与在工厂中制作的钢结构梁、柱等不同,钢筋混凝土结构通常是施工现场浇筑,因此

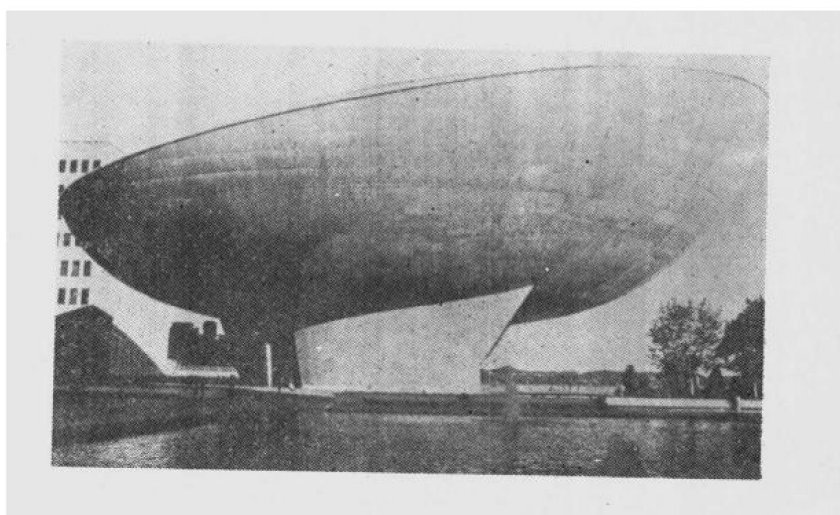
上述一系列因素必须予以考虑。

对结构体系的各个临界部位均需选定试用截面并进行验算，以确定该截面的名义强度是否足以承受所作用的设计荷载。由于常需进行多次试算，方可得出所需的截面，因此设计时第一次采用的数值将导致一系列的试算并作调整。

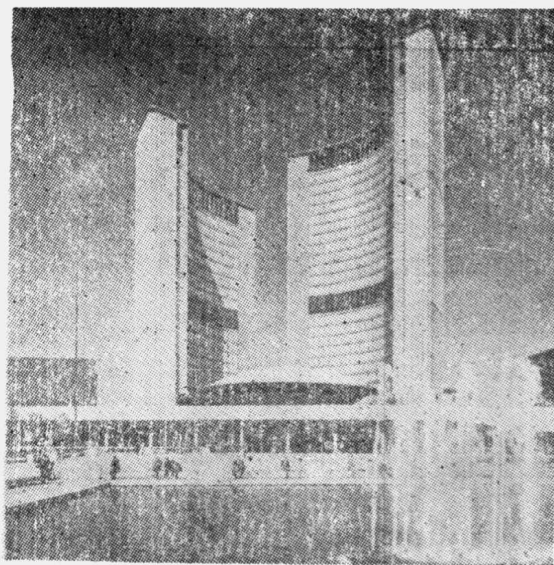
选择混凝土截面时采用试算法使设计与复核过程更为接近。因此，当试用截面选定后，每次设计都是对截面进行复核。手册、图表，小型计算机和微型计算机以及专用程序的使用，使该设计方法更为简捷有效，而传统的方法则把钢筋混凝土的复核与单纯的设计孤立地加以对待。



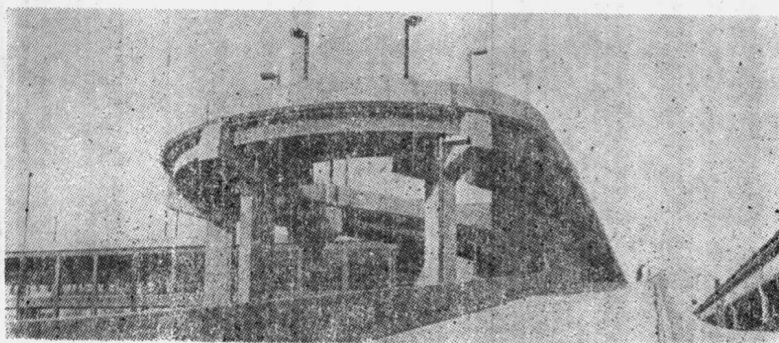
照片 1-3 纽约州，奥尔伯尼市，洛克菲勒纽约州广场



照片 1-4 纽约州，奥尔伯尼市，纽约州艺术演出中心—安曼及惠特尼设计



照片 1-5 加拿大，多伦多市府大厦



照片 1-6 桥式行车斜道

第二章 混凝土的材料

2.1 概 述

要能了解并解释一种混合物的性能，需具备其各组成成分特性的知识。混凝土是由大量组成材料经过机械和化学的作用而构成的。因此，作为一种最终产品来研究混凝土之前，探讨每一种成分的作用很有必要。只有如此，设计工程师和材料工程师才有能力选择合适的材料和配比，获得满足强度和适用性要求的混凝土。

本章扼要介绍构成混凝土的各种材料：水泥、粗细骨料、水、空气、以及外加剂等，对于水泥生产过程、水泥成分、粗细骨料的种类和级配、水的作用及其重要性、空气、以及外加剂等内容均作了讨论。欲作深入了解，读者可参阅本章末所附有关混凝土的参考文献。

2.2 硅酸盐水泥

2.2.1 制备

硅酸盐水泥为粉末状无机结晶，主要由硅酸钙和硅酸铝构成，用水拌合后成为浆状，凝固时其强度可与石类媲美。比重在3.12到3.16之间，每立方呎重94磅，商品水泥每袋即重94磅。

水泥的原料为：

1. 石灰 (CaO)，来自石灰石；
2. 二氧化硅 (SiO_2)，来自粘土；
3. 矾土 (Al_2O_3)，来自粘土。

还有极少量的氧化镁 MgO ，有时还含有一些碱，偶而掺些氧化铁以控制其成分。

水泥生产过程简述如下：

1. 将 CaO 、 SiO_2 和 Al_2O_3 等原料和其它少量成分一起磨碎。可以干磨，也可湿磨。湿磨时称为料浆；
2. 将混合物从倾斜回转窑顶端喂入窑内；
3. 随着窑身加热并旋转，混合物按事先规定的速度由上向下流动；
4. 混合物的温度逐渐升高到烧结温度，并保持这一温度，直至混合物在 华氏 2700° 高温下烧结成硅酸盐水泥料球，其粒径为 $\frac{1}{16} \sim 2$ 英寸。这称为熟料；
5. 使熟料冷却，并磨成细粉；
6. 磨细时加入少量石膏，以控制或延缓水泥在工地上浇筑时的凝结时间；

7.将大部分水泥送入水泥仓储存，以待整批外运；少量零售，每袋94磅。

图2-1为水泥生产过程示意图。水泥的种类和特性将在下节加以介绍。

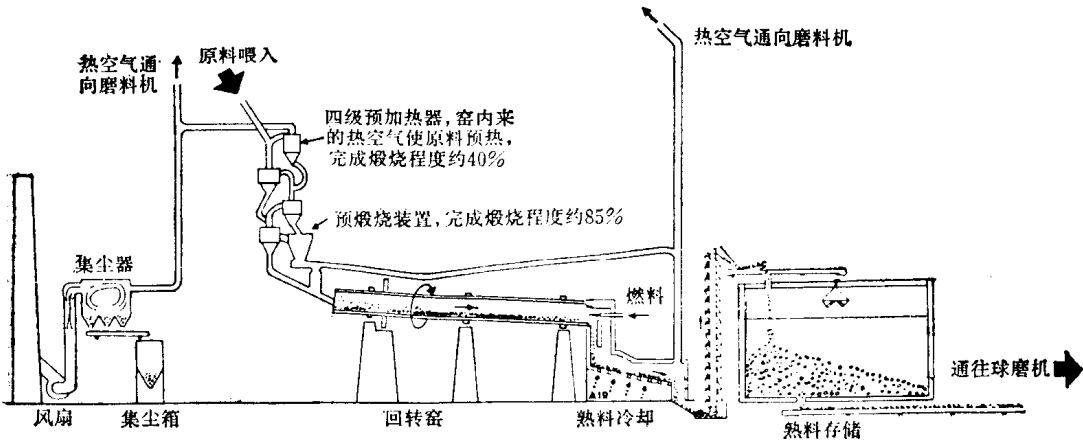


图 2-1 硅酸盐水泥生产过程

2.2.2 强度

水泥的强度为水化过程的结果。这种化学过程引起重新结晶，其形式为晶体互相咬合，所产生的水泥凝胶体在硬结时具有很高的抗压强度。表2-1表示水泥各种成分对于强度增长速度的相对影响。硅酸盐水泥的 C_3S 含量较高时，其早期强度亦较高。如持续采用湿养护，则 C_2S 含量较高时，其后期强度亦较高。 C_3A 可使混凝土浇筑后第一天的强度上升，因其最早水化。

水 泥 各 种 成 分 的 性 质 表 2-1

成 分	反 应 速 度	释 放 热 量	最 终 强 度
硅酸三钙 C_3S	中 等	中 等	好
硅酸二钙 C_2S	慢	少	好
铝酸三钙 C_3A	快	多	差
铝铁酸四钙 C_4AF	慢	少	差

硅 酸 盐 水 泥 的 成 分(百分比) 表 2-2

水 泥 种 类	成 分 (%)							一 般 特 性
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	$CaSO_4$	CaO	MgO	
I 型：普通水泥	49	25	12	8	2.9	0.8	2.4	适用于各种用途 释放热量相对较低，适用于大型结构
II 型：改良水泥	46	29	6	12	2.8	0.6	3.0	
III 型：早高强水泥	56	15	12	8	3.9	1.4	2.6	三天内即达高强
IV 型：低热水泥	30	46	5	13	2.9	0.3	2.7	适用于实体混凝土坝
V 型：抗硫酸盐水泥	43	36	4	12	2.7	0.4	1.6	适用于具有硫酸盐侵蚀作用的下水道或其它结构

硅酸盐水泥与水化合而凝结硬化时,石灰从某些成分中析出,其重量约为水泥的20%。在不利的情况下,由于石灰从水泥中析出,使结构的整体性受到破坏。这种情况可借助于在水泥中加入硅无机物,如火山灰质材料而加以防止。所加硅无机物在有水存在时可与石灰作用,生成强度较高的硅酸钙。

2.2.3 组成成分的平均百分比

水泥种类不同,其用途亦不同。故需研究每种水泥各种化学成分所占的比重,以便解释其性能不同的原因。表2-2及表2-1给出了每种水泥与水接触时其反应不尽相同的缘故。

2.2.4 水泥的细度对强度发展的影响

水泥的颗粒大小对水泥与水的反应速度具有很大影响。当重量为一定时,研磨较细的水泥其颗粒表面积比研磨较粗的水泥要大,因而与水反应的速度较快,硬结过程亦较短。此即Ⅲ型早高强水泥三天强度可达Ⅰ型水泥的七天强度,而七天强度可达Ⅰ型水泥二十八天强度的原因之一。

2.2.5 水泥对混凝土耐久性的影响

由于干湿互易、冻融交替、裂缝蔓延而使混凝土裂解,这在结构中是很重要的问题。如果水泥浆内各处均有微气泡存在,则可增强混凝土对裂解的抵抗力,这可在搅拌混凝土时通过掺入加气剂来达到。

港口工程和地下建筑由于化学物品与结构接触而造成的裂解,亦可采取措施予以延缓或消除。在此情况下,混凝土接触到氯化物,有时则是镁或钠的硫酸盐,故常需采用抗硫酸盐水泥。一般说来,Ⅱ型水泥适用于与海水接触的构筑物中。

2.2.6 初凝时产生的热量

水泥种类不同,产生热的程度就不同,产生的速度亦不同。结构的类型决定了所用水泥的种类。结构断面越大、越重,则希望水泥水化所产生的热量越少。在实体结构中,诸如水坝、墩台和沉井等,以采用Ⅳ型水泥为宜。

由上述讨论可见,结构的类型,结构建造时和建成后所处的气候条件,以及其它条件均为选择水泥种类的决定因素。

2.3 水和空气

2.3.1 水

拌制混凝土时需加水,以加速水泥的水化、润湿骨料、增加和易性。通常饮用水即可用于搅拌混凝土。含有有害杂质、污染物、淤泥、油脂、糖或其它化学物品的水,会影响水泥强度和凝结时的性能,破坏骨料和水泥的亲合力,并损害拌合物的和易性。

凝胶体或水泥浆的性质仅为水泥和水发生化学反应的结果,并不取决于水对所有干物质所占的比重,而仅取决于水对水泥重量之比。水化作用发生后,多余的水分会使浇筑好的混凝土产生不均匀的蜂窝结构。水过少则又使水和水泥不能发生充分的化学反应。二者均可使混凝土强度降低,质量下降。

2.3.2 气孔

随着拌合物中的多余水分逐渐蒸发,混凝土硬结时会产生气孔。若气孔分布比较均匀,则可改善混凝土的性能。在混凝土中掺入松香皂树脂之类的加气剂,可使气孔均匀分

布于整个体积内，造成均匀的孔隙。加气剂可增加和易性，降低密度，增加耐久性，减少泌水和离析，并可降低用砂量。由于这些原因，混凝土中空气含量应保持在保证混凝土质量所需的最佳值。空气最佳含量为混凝土中水泥浆所占体积的 9 %。若空气含量超过总拌合物体积的 5 ~ 6 %，则将使混凝土的强度成比例地下降。

2.3.3 水灰比

由上可知，必须严格控制水灰比和拌合物中空气所占的比重。由于水灰比是混凝土强度的一个真正量度指标，故应作为大多数混凝土配合比设计的主要准则。水灰比通常按水与水泥的质量比计算。

2.4 骨 料

骨料构成混凝土制品的骨架部分，约占混凝土体积的 60 ~ 80 %。其级配应使小颗粒填满大颗粒间的空隙，使混凝土成为一较为密实而均匀的实体。

骨料有二种：

1. 粗骨料（砾石、碎石或高炉矿渣）；
2. 细骨料（自然砂或人工砂）。

骨料构成混凝土拌合物的主要部分。在满足所需和易性的前提下，骨料越多，混凝土造价就越低。

2.4.1 粗骨料

粗骨料是以颗粒最小粒径大于 $\frac{1}{4}$ 英寸（6 mm）来区分的。粗骨料的性质影响到混凝土硬结后的最终强度，以及抵抗碎裂、风化和其它不利因素的能力。粗骨料含有的有机杂质必须清除干净，与水泥凝胶体之间应有良好的粘结。

通常采用的粗骨料有：

1. 碎石：碎石由采石场将天然石或岩层破碎而成，可以是火成岩、沉积岩或变质岩。碎石可使混凝土强度提高较多，但与其它粗骨料相比，拌合和浇筑时的和易性较差。
2. 砾石：在河床或岸边由水流冲蚀而成。砾石浇筑的混凝土，其强度较碎石者为低，但和易性较好。
3. 人造粗骨料：主要为炉渣和膨胀页岩，常用以浇筑轻混凝土。人造粗骨料为其它生产过程的副产品，如高炉炉渣、膨胀页岩或轻混凝土用的浮石等。
4. 重骨料与核防护骨料：随着原子反应堆和核电站的日益增多，由于原子时代的特殊要求和核辐射的危险性，要求生产出特种混凝土，以防护 α 射线，伽玛射线以及中子等。对于这种混凝土，经济上的考虑以及适用性方面的要求已非首要问题。主要的粗重骨料有钢冲剪下脚料，重晶石，磁铁矿，褐铁矿等。

普通骨料浇筑成的混凝土重约 144 磅/英尺³，而重骨料浇筑成的混凝土则重 225 ~ 330 磅/英尺³。防辐射重混凝土的性能取决于其密度，而非首先取决于其水灰比。在某些情况下密度是否足够高是唯一应加考虑的问题，而在其它一些场合，则密度和强度均需加以考虑。

2.4.2 细骨料

细骨料是较小的填充材料。通常用砂作为细骨料，其粒径在美国标准筛尺寸 4 号筛到