

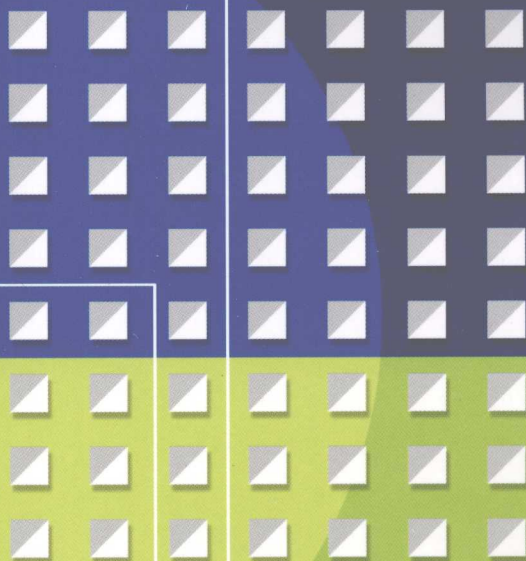


高等学校“十一五”精品规划教材

# 混凝土结构设计原理

主编 翟爱良 李平

HUNJINGTU JIEGOU SHEJI YUANLI



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

◆ 要 容 内 ◆

经《混凝土结构》编委会审定委员会审定业守律学级工木士考高固全委册并本

高等学校“十一五”精品规划教材

混凝土结构设计原理

混凝土结构设计原理

混凝土结构设计原理

混凝土结构设计原理

# 混凝土结构设计原理

主 编 翟爱良 李 平

副主编 周翠玲 刘丽霞

蒋正跃 金宝宏

参 编 徐强以 崔 景 王增奇



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

## ◆ 内 容 提 要 ◆

本书根据全国高校土木工程学科专业指导委员会审定通过的《混凝土结构》教学大纲,以国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)作为主要编写依据。本书主要讲述各类混凝土结构基本构件的受力性能分析和计算,共9章,包括绪论,材料性能、计算原理,受弯构件正截面承载力计算,受弯构件斜截面承载力计算,受压构件承载力计算,受拉构件承载力计算,受扭构件承载力计算,钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性及预应力混凝土构件等。

本书作为高等学校土木工程专业用教材,也可供从事土木工程钢筋混凝土结构设计与施工的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理/翟爱良,李平主编. —北京:中国水利水电出版社,2009

高等学校“十一五”精品规划教材 编主编

ISBN 978-7-5084-6022-2

I. 混… II. ①翟…②李… III. 混凝土结构—结构设计—高等学校—教材 IV. TU370.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第171327号

书 名	高等学校“十一五”精品规划教材 <b>混凝土结构设计原理</b>
作 者	主编 翟爱良 李平
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 19.75印张 468千字
版 次	2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	<b>39.00元</b>

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换  
版权所有·侵权必究

# 前 言

本书是根据全国高校土木工程学科专业指导委员会审定通过的《混凝土结构》教学大纲编写的。

本书主要讲述土木工程专业涉及领域内各类混凝土结构中具有共性的基本构件的受力性能分析和计算,共9章,包括绪论,材料性能,计算原理,受弯构件正截面承载力计算,受弯构件斜截面承载力计算,受压构件承载力计算,受拉构件承载力计算,受扭构件承载力计算,钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性及预应力混凝土构件等。

由于我国建筑、公路、铁道、桥梁等工程的混凝土结构设计规范尚未统一,本教材只将建筑工程有关规范内容作了介绍。全书以国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)作为主要编写依据。

本书编写指导思想是按照21世纪土木工程专业本科学生的培养规格和要求,从全面提高学生素质和创新能力出发,使教材为教育教学改革服务,为培养和造就“厚基础、强能力、高素质、广适应”复合型人才服务。编写内容密切结合课程教学内容的改革和实践,结合工程实际和混凝土结构的国内外最新研究应用成果,注意吸收同类教材的优点,力求文字简练、深入浅出,在讲清基本概念和基本理论的基础上,列出了较多的计算示例,以强化学生对基本理论、基本知识的应用能力。每章均附有思考题,除第一章和第二章外,其他各章都有习题。

本书编写人员及分工为:翟爱良(绪论、第八章)刘丽霞、徐强以(第一章、第三章);蒋正跃、崔景(第二章、第四章);周翠玲、徐强以(第五章、第六章);李平、王增奇(第七章);金宝宏、徐强以(第九章)。翟爱良、李平任本书主编。崔千祥同志对本书进行了细致的审阅,并提出宝贵意见,在此表示诚挚的谢意。

由于本书编写时间仓促及编者水平有限,书中难免会有不妥或错误之处,敬请读者批评指正。

编者

2008年12月





第二节	无腹筋梁的斜截面受剪性能	89
第三节	有腹筋梁斜截面受剪承载力计算	94
第四节	受弯构件斜截面受剪承载力的计算方法和步骤	103
第五节	保证受弯构件斜截面受弯承载力的构造措施	110
第六节	钢筋的其他构造要求	114
第七节	钢筋混凝土伸臂梁设计实例	118
	思考题	125
	习题	126
<b>第五章</b>	<b>钢筋混凝土受压构件的承载力计算</b>	128
第一节	受压构件的一般构造	128
第二节	轴心受压构件正截面承载力计算	130
第三节	偏心受压构件正截面承载力计算	138
第四节	偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	171
	思考题	171
	习题	172
<b>第六章</b>	<b>钢筋混凝土受拉构件承载力计算</b>	174
第一节	概述	174
第二节	轴心受拉构件正截面承载力计算	174
第三节	偏心受拉构件正截面承载力计算	176
第四节	偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算	180
	思考题	180
	习题	180
<b>第七章</b>	<b>钢筋混凝土受扭构件承载力计算</b>	181
第一节	概述	181
第二节	纯扭构件的开裂扭矩	181
第三节	纯扭构件的承载力计算	184
第四节	弯剪扭构件的承载力计算	190
第五节	受扭构件的配筋构造要求	193
	思考题	197
	习题	198
<b>第八章</b>	<b>钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性</b>	199
第一节	概述	199
第二节	混凝土构件裂缝宽度验算	201
第三节	受弯构件变形验算	210
第四节	混凝土构件的截面延性	217
第五节	混凝土结构的耐久性	221

思考题	227
习题	228
<b>第九章 预应力混凝土构件</b>	<b>230</b>
第一节 预应力混凝土的基本概念	230
第二节 施加预应力的方法、预应力混凝土的材料与张拉机具	232
第三节 张拉控制应力与预应力损失	238
第四节 预应力混凝土轴心受拉构件	245
第五节 预应力混凝土受弯构件	260
第六节 部分预应力混凝土和无粘结预应力混凝土简介	285
第七节 预应力混凝土构件的构造要求	288
思考题	290
习题	291
<b>附录 1 术语及符号</b>	<b>293</b>
<b>附录 2 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 规定的材料力学指标</b>	<b>297</b>
<b>附录 3 钢筋的计算截面面积及公称质量</b>	<b>301</b>
<b>附录 4 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 的有关规定</b>	<b>303</b>
<b>参考文献</b>	<b>306</b>

# 绪 论

## 一、混凝土结构的一般概念和特点

以混凝土材料为主,并根据需要配置钢筋、预应力钢筋、钢管、纤维等,共同受力的结构均可称为混凝土结构。混凝土结构包括有素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、钢管混凝土结构、配置各种纤维筋的混凝土结构等(见图 0-1)。

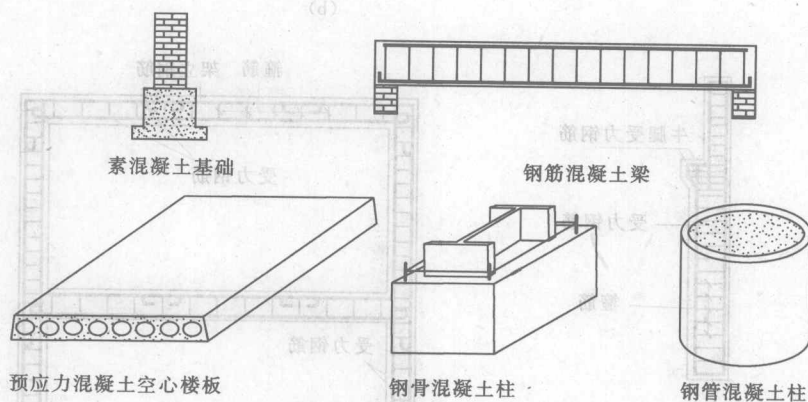


图 0-1 常见混凝土结构构件的形式

素混凝土结构是指不配置任何钢材的混凝土结构。

钢筋混凝土结构是指用圆钢筋作为配筋的普通混凝土结构。常见钢筋混凝土结构和构件配筋实例见图 0-2。

预应力混凝土结构是指在结构构件制作时,在其受拉部位上人为地预先施加压应力的混凝土结构。

钢管混凝土结构又称为型钢混凝土结构。它是指用型钢或用钢板焊成的钢骨架作为配筋的混凝土结构。

钢管混凝土结构是指在钢管内浇筑混凝土做成的结构。

素混凝土结构由于承载力低、性质脆,很少用来作为土木工程的承力结构。钢筋混凝土结构承载能力大、抗震性能好,但耗钢量较多,可在高层、大跨或抗震要求较高的工程中采用。钢管混凝土结构的构件连接较复杂,维护费用多。本书重点讲述钢筋混凝土结构的材料性能、设计原理、计算方法和构造措施。对于预应力混凝土结构,将在本书的第九章中介绍。最常用的的是由钢筋和混凝土两种材料组成共同受力的钢筋混凝土结构,将钢筋和混凝土结合在一起做成钢筋混凝土结构和构件,其原因可通过下面的试验看出。



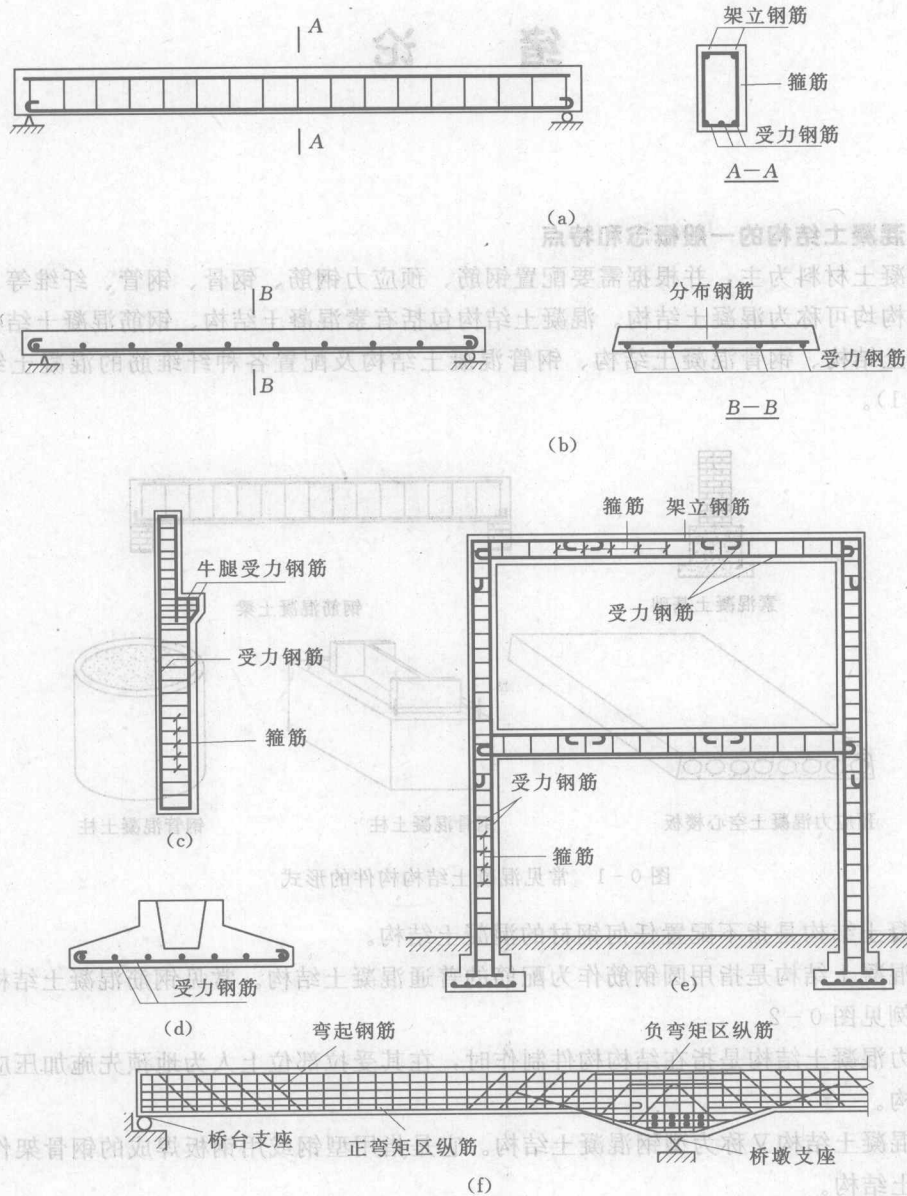


图 0-2 常见钢筋混凝土结构和构件配筋实例

(a) 钢筋混凝土筒支梁的配筋；(b) 钢筋混凝土筒支平板的配筋；(c) 装配式钢筋混凝土单层工业  
 厂房地柱的配筋；(d) 钢筋混凝土杯形基础的配筋；(e) 两层单跨钢筋混凝土  
 框架的配筋；(f) 钢筋混凝土连续梁桥的配筋

如图 0-3 所示为两根混凝土梁的对比实验情况，一根截面为  $150\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，跨长为  $2.5\text{m}$ ，混凝土强度为 C20 的素混凝土筒支梁，如图 0-3 (a) 所示，当跨中承受的集中力  $P_1$  为  $10.1\text{kN}$  时，就会因混凝土受拉而断裂，从而导致整个梁的破坏。但是，如果在这根梁的受拉区配置 2 根直径  $16\text{mm}$  的 HRB335 级钢筋，用钢筋代替开裂后的混凝土



承受拉力，则可以继续加载，直到钢筋达到屈服强度以后，梁才破坏，破坏荷载增加到  $P_2$  约为 55.7kN，如图 0-3 (b) 所示。

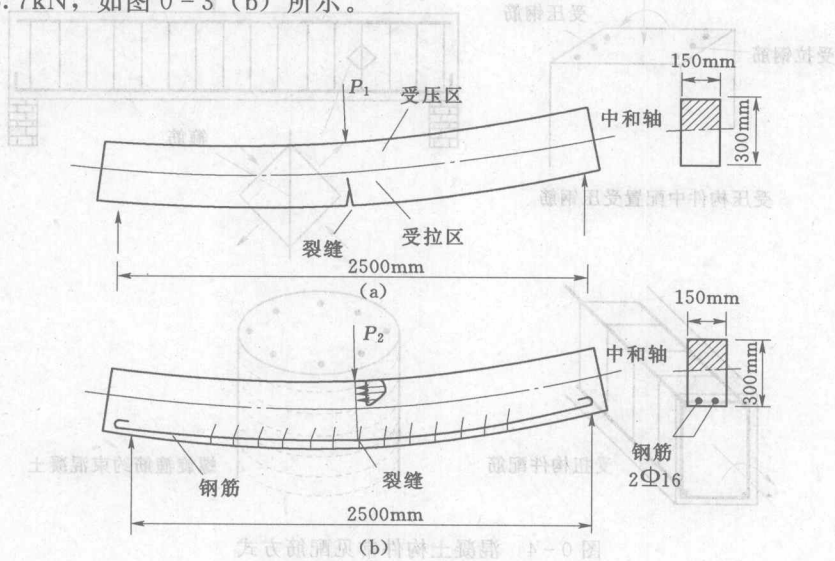


图 0-3 混凝土简支梁的破坏  
(a) 素混凝土简支梁；(b) 钢筋混凝土简支梁

上述实验结果说明，在混凝土结构中配置一定型式和数量的钢筋，可以收到下列效果：①结构的承载能力有很大提高；②结构的受力性能得到显著改善。分析其原因，在钢筋和混凝土两种材料中，钢筋的抗拉和抗压能力都很强，混凝土的抗压能力较强而抗拉能力很差，一般抗拉能力只有抗压能力的  $1/20 \sim 1/8$ ，混凝土承受拉力时很容易开裂，因此，素混凝土梁承载力较低，而用钢筋代替开裂后的混凝土承受拉力，则可以继续加载，直到钢筋达到屈服强度以后，梁才破坏，破坏荷载大为增加。这同时也表明素混凝土结构在应用中受到很大的限制。

一般来说，钢筋混凝土结构中，混凝土主要承担压力，钢筋主要在构件的受拉区承担拉力。在实际工程中，还有许多其他配筋方式，如在构件的受压区配置钢筋协助混凝土受压；在构件受剪区段、受扭区段、节点区等复杂应力区域，配置箍筋或纵横交错的钢筋；当构件受力很大时，可以直接配置钢骨；利用箍筋或钢管约束混凝土来提高混凝土的抗压强度等，如图 0-4 (a) 所示。

作为在土建工程中应用最广泛的钢筋混凝土结构具有许多优点，主要有：

(1) 材料利用合理。钢筋和混凝土的材料强度可以得到充分发挥，结构承载力与其刚度比例合适，基本无局部稳定问题，单位应力造价低，对于一般工程结构，经济指标优于钢结构。

(2) 可模性好。混凝土可根据设计需要浇筑成各种形状和尺寸，适用于各种形状复杂的结构，如空间薄壳、箱形结构等。近年来采用高性能混凝土可浇筑的清水混凝土，具有特殊的建筑效果。这一特点是砖石、钢、木等结构所不能代替的。

(3) 耐久性和耐火性较好，维护费用低。钢筋与混凝土具有良好的化学相容性，混

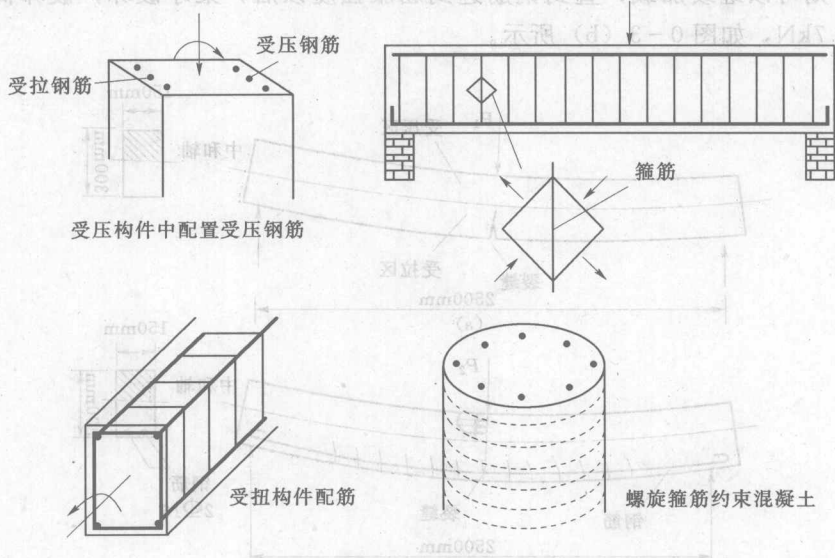


图 0-4 混凝土构件常见配筋方式

土属碱性性质，会在钢筋表面形成一层氧化膜，钢筋有混凝土的保护层，一般环境下不会产生锈蚀，而且混凝土的强度随时间的推移而增加。混凝土是不良导热体，使钢筋不致因发生火灾时升温过快而丧失强度，一般 30mm 厚混凝土保护层，可耐火约 2.5h；同时，在常温至 300℃ 范围，混凝土的抗压强度基本不降低。

(4) 现浇混凝土结构的整体性好，且通过合适的配筋，可获得较大的延性，适用于抗震、抗爆结构；同时防震性能和防辐射性能较好，适用于防护结构。

(5) 刚度大、阻尼大，有利于结构的变形控制。

(6) 易于就地取材。混凝土所用的大量砂、石，易于就地取材。近年来，利用工业废料来制造人工骨料，或利用粉煤灰作为水泥的外加成分来改善混凝土性能，既可废物利用，又可保护环境。

但是，钢筋混凝土结构也有一些缺点，主要有：

(1) 自重大。不适用于建造大跨、高层结构，因此需发展和研究轻质混凝土、高强混凝土和预应力混凝土。目前我国工程应用的高强混凝土可达 C100 级；轻质高强混凝土达 CL60 级，密度约为  $1800\text{kg}/\text{m}^3$ （普通混凝土的密度一般为  $2400\text{kg}/\text{m}^3$ ）。但对重力坝，高密度混凝土自重大则是优点。

(2) 抗裂性差。普通钢筋混凝土结构，在正常使用阶段往往是带裂缝工作的。一般情况下，因荷载作用产生的微小裂缝，不会影响混凝土结构的正常使用。但由于开裂，限制了普通钢筋混凝土用于大跨结构，也影响到高强钢筋的应用。而且近年来混凝土过多地使用各种外加剂，导致混凝土收缩过大，以及由于环境温度的影响，也很容易导致混凝土结构开裂，由此引起许多问题。此外，在露天、沿海、化学侵蚀等环境较差的情况下，裂缝的存在会影响混凝土结构的耐久性；对防渗、防漏要求较高的结构也不适用。采用预应力混凝土可较好地解决开裂问题。利用树脂涂层钢筋可防止在恶劣工作环境下因开裂而导



致钢筋的锈蚀。近年来还以非金属的纤维增强复合材料筋代替钢筋，用于腐蚀性很强的环境工程结构。

(3) 承载力有限。与钢材相比，混凝土的强度还是很低的，因此普通钢筋混凝土构件的承载力有限，用作承受重载结构和高层建筑底部结构时，往往会导致构件尺寸太大，占据较多的使用空间。发展高强混凝土、钢筋混凝土、钢管混凝土可较好地解决这一问题。

(4) 施工复杂，工序多（支模、绑钢筋、浇筑、养护、拆模），工期长，施工受季节、天气的影响较大。利用钢模、飞模、滑模等先进施工技术，采用泵送混凝土、早强混凝土、商品混凝土、高性能混凝土、免振自密实混凝土等，可大大提高施工效率。

(5) 混凝土结构一旦被破坏，其修复、加固、补强比较困难。但新型混凝土结构的加固技术不断发展，如采用粘贴碳纤维布加固混凝土结构的新技术，不仅快速简便，而且不增加原结构重量。

虽然钢筋和混凝土两种材料的物理力学性能很不相同，但二者的共同工作具有较好的基础，除混凝土对钢筋具有较好的保护作用外，还具有以下两个原因：

(1) 混凝土结硬后，能够与钢筋牢固地粘结在一起，相互传递内力。粘结力是这两种性质不同的材料能够共同工作的基础，保证在荷载作用下，钢筋和外围混凝土能够协调变形，共同受力。

(2) 钢筋和混凝土两种材料的温度线膨胀系数很接近（钢筋为  $1.2 \times 10^{-5}$ ，混凝土为  $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-5}$ ）。当温度变化时，二者间不会因各自伸缩，而产生较大的相对变形和温度应力，致使粘结力遭到破坏。

## 二、混凝土结构的发展简况与应用

混凝土结构是随着水泥和钢铁工业的发展而发展起来的，至今已有 150 年的历史。1824 年，英国约瑟夫·阿斯匹丁（Joseph Aspdin）发明了波特兰水泥并取得了专利。1850 年，法国蓝波特（L. Lambot）制成了铁丝网水泥砂浆的小船。1861 年法国约瑟夫·莫尼埃（Joseph Monier）获得了制造钢筋混凝土板、管道和拱桥等的专利，1872 年，在纽约建造了第一座钢筋混凝土房屋，混凝土结构开始实际工程中应用。

和砖石结构、钢结构相比，混凝土结构是一种较新的结构，其发展大体可分为三个阶段：

从 19 世纪 50 年代到 20 世纪 20 年代，一般认为是钢筋混凝土结构发展的第一阶段。这个期间出现了钢筋混凝土板、梁、柱、基础等简单的构件，所采用的混凝土和钢筋强度都比较低，钢筋混凝土的计算理论尚未建立，设计计算沿用材料力学中的容许应力法。

第二阶段是从 20 世纪 20 年代到 40 年代前后。随着混凝土和钢筋强度的不断提高，1928 年法国杰出的土木工程师弗雷西奈（E. Freyssnet）的贡献使预应力混凝土进入了使用阶段，使混凝土结构可以用来建造大跨度结构。在计算理论上，前苏联著名的混凝土结构专家格沃兹捷夫（A. A. FBOaeb）提出了考虑混凝土塑性性能的破损阶段设计法，奠定了现代钢筋混凝土结构的基本计算理论。

第三阶段是 20 世纪 40 年代到现在。随着高强混凝土和高强钢筋的出现，装配式钢筋混凝土结构、泵送商品混凝土等工业化生产方式的采用，许多大型结构，如超高层建筑、大跨度桥梁、特长隧道等不断兴建，计算理论过渡到极限状态设计法。近几十年来，钢筋





混凝土计算理论日趋完善,在钢筋混凝土的材料制造、施工方法等方面也有了很大的进步。混凝土结构的应用范围日益扩大,无论地上或地下建筑,乃至海洋工程构筑物,很多采用混凝土结构建造。目前,混凝土结构已经成为我国土木工程各个领域应用最广泛的结构。在工业民用建筑及交通运输工程中,用来建造厂房、多层与高层楼房、水池、水塔、桥梁、飞机跑道、电视塔;在水利水电、水运工程建筑中,钢筋混凝土用来建造水坝、水闸、船闸、水电站厂房、机墩、蜗壳、尾水管、码头、涵洞等等,现摘要举例说明。

在房屋工程中,多层住宅、办公楼大多采用砌体结构作为竖向承重构件,楼板和屋面板则几乎全部采用预制或现浇钢筋混凝土板;多层厂房和小高层房屋大多采用现浇钢筋混凝土梁板柱框架结构;单层工业厂房多是采用预制钢筋混凝土基础、柱、屋架或屋面梁以及大型屋面板;高层建筑采用钢筋混凝土体系更是获得很大发展,美国高层建筑与都市居住小区理事会于1986年公布的世界最高100幢高层建筑最低为207m,1991年公布的最低为218m,而1997年公布的则为227m。目前,采用钢筋混凝土结构体系建造的高度位于前列的高层建筑主要有:马来西亚石油双塔楼,88层,高452m;香港中环广场大厦,78层,高374m;广州中天广场大厦,80层,高322m,美国芝加哥双咨询大楼,64层,高303m;曼谷 Baiyoke 塔楼,高320m;朝鲜平壤柳京饭店,高300m;美国芝加哥311南威克旅游中心,高293m;美国夏洛特国家银行合作中心,高265m;美国芝加哥水塔广场大厦,高262m。我国上海的金茂大厦,88层,建筑高度421m,为正方形框筒结构,内筒混凝土墙厚850mm,外围为钢管混凝土柱和钢柱。上海浦东世界环球金融中心大厦,95层,高460m,内筒为钢筋混凝土结构,建成后将成为世界最高的建筑物之一。

在桥梁工程中,中小跨度桥梁绝大部分采用钢筋混凝土结构建造。拱桥方面,我国混凝土拱桥建设居世界领先地位。1990年建成的宜宾金沙江钢筋混凝土拱桥,跨度为240m,是中承式拱桥当时的世界纪录。这一纪录被1996年建成的广西邕宁邕江桥所突破,其跨度为312m,采用钢管混凝土作骨架浇成混凝土箱形截面,钢管不外露,为劲性混凝土结构。1997年建成的318国道上的四川万县长江大桥,也是采用钢管混凝土作骨架浇成的三室单箱截面上承式拱桥,跨长420m,为目前世界第一拱桥。刚架桥方面,1999年11月挪威建成 Stoma 和 Raft 两座海峡桥,跨度分别为301m、298m,分别列世界同类桥梁第一、二位。于1997年7月建成通车的我国虎门大桥由东引桥、主桥、中引桥、辅航道桥和西引桥组成,其中辅航道桥为两座单桥组成,都为单室单箱预应力混凝土连续刚构桥,行车道宽14.25m,跨度达到270m,位居同类桥梁第三位。斜拉桥方面,虽然采用钢悬索或钢制斜拉索,但其桥墩、塔桥和桥面仍都采用钢筋混凝土结构。如1993年1月建成通车的上海杨浦组合斜拉桥,采用混凝土面板与钢加劲大梁共同工作,主跨602m。1997年建成的香港青马大桥跨度1377m,桥体为悬索结构,支承悬索的两端塔架为高度203m的钢筋混凝土结构。1997年建成的江阴长江大桥,主跨1385m,位居世界第四。从上可见,我国斜拉桥建设也已进入国际先进行列。

在水利工程中,水利枢纽中的水电站、拦洪坝、引水渡槽、污水排灌管也大都采用钢筋混凝土结构。世界最高的重力坝为瑞士大狄克桑斯坝,高285m;我国大坝建设也已达到国际先进水平,长江三峡水利枢纽大坝为重力坝,高度190m,设计装机容量1860万kW,为世界最大的水利发电站。四川二滩双曲拱坝于1998年12月建成投产,坝高242m,装



机容量 330kW；黄河小浪底水利枢纽中小浪底大坝高 154m，主体工程中混凝土和钢筋混凝土用量达 269 万  $m^3$ 。南水北调工程是一项跨世纪的宏伟工程，沿线将建很多预应力混凝土渡槽、混凝土水闸。

在隧道工程中，新中国成立以来修建了 2500 多公里长的铁道隧道，其中成昆铁路线中就有隧道 427 座，总长 341km，占全线路长的近 1/3。修建公路隧道约 400 座，总长约 80km。混凝土结构还大量应用于北京、上海、天津、广州、南京等城市已建或在建的地铁、高架轻轨、高速磁悬浮等城市重要交通设施。还有一些特种结构（一般认为除房屋建筑、道路桥隧以及水工结构外的所有结构均属于特种结构），如电线杆、烟囱、水塔、筒仓、储水池、储罐、电视塔、核电站反应堆安全壳、近海采油平台等也多用混凝土结构建造。我国宁波北仑火力发电厂建有高度达 270m 的筒中筒烟囱；山西云岗建成两座预应力混凝土煤仓，容量 6 万 t；日本建成的地下液化天然气储罐容量已达 20 万  $m^3$ ；日本大阪正在建容量达 18 万  $m^3$  的地上预应力液化天然气储罐。世界最高电视塔加拿大多伦多电视塔，高 553.3m，为钢筋混凝土结构，采用滑模施工技术建造；上海东方明珠电视塔由三个钢筋混凝土筒体组成独特造型，高 456m，居世界第三位。

### 三、混凝土结构的最新进展

伴随着经济的快速增长，我国的混凝土结构发展迅猛，从新材料、新技术的研究开发和推广应用，到工程结构的建造，均取得了前所未有的巨大成就。现阶段混凝土结构的最新发展特征是：

高性能混凝土（HPC）和绿色高性能混凝土（GHPC）的兴起和应用。

进一步发展的工业化体系，如大模板现浇体系；高层建筑结构体系的发展，如框桁体系和外伸结构的采用。

计算机的发展和普及，在结构工程领域内引起深刻的变革。在设计中引入概率方法，专家系统的采用，计算机辅助设计和绘图（CAD，CAG）的程序化，包括结构动态分析图形的描绘，改进了设计方法，提高了设计质量，减轻了设计工作量，极大地提高了人的工作效率。优化设计的广泛应用，节约了建设投资。

振动台试验和拟动力试验以及风洞试验较普遍地开展；建筑和桥梁结构的主、被动抗震控制的实际应用；计算机模拟试验大大减少了试验工作量，节约了大量人力物力。

有限元的广泛应用，计算模式研究的开展，其他数值计算方法的创立和发展；结构机理包括破坏机理研究的加强；对复合应力的研究并结合实验结果提出各种强度理论，由此产生了“近代混凝土力学”这一学科分支，并将逐渐得到发展和完善。

工程结构的“移植”，如将桥梁中的斜拉结构应用于房屋建筑，及至创造新的结构形式，如创造出双拱架结构和桁式组合拱桥等。以及各学科间的相互渗透，如将有限元应用于混凝土的微观研究。

工程材料微观研究的开展与加强，为材料强度和性能的不断提高创造了条件，新材料、新工艺和施工新方法的研究和开发。

模糊数学在抗震设计中的应用。

混凝土结构寿命的研究。



现代力学(断裂力学、损伤力学、微观力学)在混凝土结构方面的应用。混凝土结构应用范围在多方面的拓宽,其尺度不断向高、长、大方向发展。以下从四个方面简述混凝土结构的最新进展。

1. 材料方面  
混凝土结构材料将继续向轻质、高强、高性能方向发展。

(1) 在可持续发展的思想指导下,21世纪将是高性能混凝土(HPC)和绿色高性能混凝土(GHPC)兴起和发展的时期。发展绿色高性能混凝土可充分利用各种工业废弃物,大力发展复合胶凝材料,最大限度地降低硅酸盐水泥的用量,使混凝土工程走可持续发展之路。

20世纪80年代末西方发达国家在总结混凝土技术发展的基础上提出了“高性能混凝土”的概念,美、英、法、日等国相继进行了大量研究。目前我国工程中普遍使用的混凝土等级为C20~C40,在一些高层建筑中也采用等级为C50~C80的混凝土,个别试点工程项目用到C80以上。《高强混凝土结构设计施工指南》将等级在C50以上(含C50)的混凝土划为高强度混凝土。高性能混凝土的概念相对于高强度混凝土更加深远,高性能混凝土即要求混凝土具有高耐久性、高工作性、高强度、低温升、高抗渗、抗震、抗爆、抗冲击以及高体积稳定性等,后来总结概括为高强度、高耐久性和高工作性。其配合比的重要特点是低水灰比和多组掺合剂。降低水灰比可减少混凝土中的孔隙,提高密实性和强度,并减少收缩及徐变。外加高效减水剂、粉煤灰、沸石粉、硅粉等掺合剂可以改善拌料工作度,降低泌水离析,改善混凝土的微观结构,增加混凝土抗酸碱腐蚀和防止碱骨料反应的作用。混凝土材料强度的提高和性能的改善为钢筋混凝土结构进一步向大跨化、高耸化发展创造了条件。

(2) 20世纪80年代国外开始采用碳纤维乱向掺入普通混凝土内形成纤维增强混凝土。纤维增强混凝土可在多方面达到优异的性能,大幅度提高混凝土的抗拉、抗剪、抗折强度和抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗震、抗爆性能。常见的纤维材料有:钢纤维、合成纤维、玻璃纤维和碳纤维等,其中钢纤维混凝土应用比较成熟。

钢纤维混凝土是将短的、不连续的钢纤维均匀乱向地掺入普通混凝土中制成的一种“特殊”混凝土,可形成无筋钢纤维混凝土结构或钢筋钢纤维混凝土结构。其施工方法可采用浇筑振捣,也可采用喷射方法。钢纤维的长度一般20~50mm,截面形式常用的有圆形、月牙形和矩形,截面直径或等效直径0.3~0.8mm,钢纤维的抗拉强度要求不低于380N/mm<sup>2</sup>,钢纤维掺入量通常为混凝土体积的0.5%~2%。钢纤维混凝土的破坏一般是钢纤维从基体混凝土中拔出而不是拉断,因此二者之间的粘结强度是影响钢纤维增强和阻裂效果的重要因素。钢纤维的工程应用很广,可用于预制桩的桩尖和桩顶部分、抗震框架节点、刚性防水屋面、地下人防工程、水工闸门的门槽和渡槽的受拉区、大坝防渗面板、混凝土拱桥受拉区段等。

合成纤维可以作为主要加筋材料,提高混凝土的抗拉、韧性等性能,用于各种水泥基板材;也可作为次要加筋材料,用于提高混凝土材料的抗裂性。目前应用较理想的合成纤维有尼龙单丝纤维、纤化聚丙烯纤维,其长度一般为20mm,掺加量一般为600~900g/m<sup>3</sup>,应具有较高的耐碱性及在水泥基体中的分散性与粘结性。合成纤维混凝土已经在我国上海







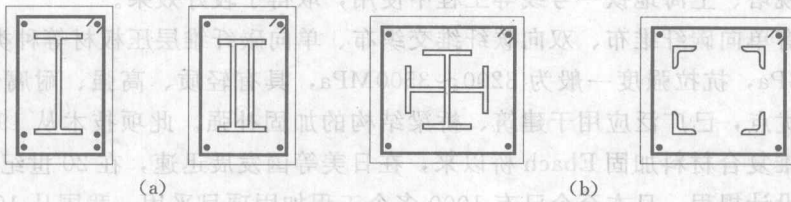


图 0-5 钢筋混凝土结构的两种形式

(a) 实腹式钢筋混凝土构件截面形式；(b) 空腹式钢筋混凝土构件截面形式

锚具和张拉设备，我国 20 世纪 80 年代中期在桥梁工程中采用过这一工艺。

(2) 为了提高结构的抗裂度，预应力混凝土结构得到了越来越多的应用。预应力技术的最新进展是在无粘结预应力技术的基础上发展起来的缓粘结技术、体外预应力筋以及横向张拉预应力筋技术。

缓粘结技术与无粘结预应力工艺类似，但采用缓凝砂浆包裹预应力钢筋，在张拉钢筋时砂浆不起粘结作用，待钢筋锚固后，砂浆缓慢凝结硬化，与预应力钢筋相粘结，无需灌浆。缓凝技术在钢筋张拉时是“无粘结”，但在砂浆硬化后又是“有粘结”，因而具有两者共同的优点。

体外张拉预应力钢筋的方法最早应用于结构的加固补强，最近已开始在新建工程中采用。它工艺简便，且可以大幅度减少因摩擦引起的预应力损失，便于更换和增加新索具，是一项值得关注的新技术，已在国内外桥梁工程中广泛采用，国内房屋和桥梁中也开始采用。

横向张拉预应力钢筋的工艺是首先将梁底预应力钢筋浇入梁中，在梁底预留明槽以暴露预应力钢筋的中段，在梁端设加宽的梁肋，以承受预应力筋的巨大作用力。当梁端混凝土达到一定强度后，将预应力筋垂直于梁底面进行张拉，使钢筋在纵向伸长，梁中混凝土受到预压应力，最后用钢销固定预应力筋的位置，明槽内填充混凝土。这种工艺不需要特殊的锚具，不需要在孔道内穿入钢筋，且张拉应力小，施工方便。

### 3. 施工技术方面

工程施工技术将进一步向加快施工速度、降低造价、保证工程质量和建筑工业化的方向发展，施工监测技术、延长混凝土结构使用寿命、结构维修加固技术等已成为新的研究热点。

在一般的工业与民用建筑中已广泛采用定型化、标准化的装配式结构。目前又从一般的标准设计发展到工业化建筑体系，趋向于只用少数几种类型的构件（如梁板合一构件，墙柱合一构件，单元房间组合件等）就能建造各类房屋。20 世纪 60 年代国外（主要在罗马尼亚）曾采用盒子式结构，即将一个房间制成四方墙壁和顶板的结构整体吊装，这样形成双墙，显得笨重，以后不再采用。70 年代丹麦采用的盒子结构，墙体厚度很薄，仅 50mm；美国 Anderson 体系，除四方墙外，楼板则根据需要为四面、三面或二面挑出以构成另一房间的楼板部分，避免了双墙。

中小型预制桥梁的自整个吊装，大型桥梁及大跨度房屋盖结构的整体吊装、高层建筑中的升板结构和泵送混凝土等技术已经得到了广泛的应用。