



普通高等教育“十二五”规划教材

混凝土结构设计原理

主 编 翟爱良 周建萍
副主编 饶光媛 周翠玲 李 昊
张 园 郭 巍 杨 帆



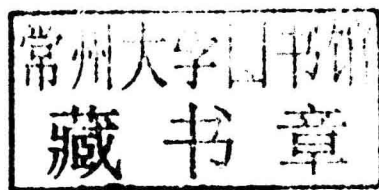
中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

混凝土结构设计原理

主 编 翟爱良 周建萍
副主编 饶光媛 周翠玲 李 昊
张 园 郭 巍 杨 帆



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以全国高等学校土木工程学科专业指导委员会审定通过的《混凝土结构》教学大纲和国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)作为主要编写依据。全书共九章,主要讲述钢筋混凝土材料性能、混凝土结构计算原理以及受弯、受剪、受扭、受压、受拉及预应力构件等各类混凝土基本构件的受力性能和分析计算。

本书可作为高等学校土木工程专业的教材,也可供土木工程行业从事混凝土结构设计、施工与管理的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理 / 翟爱良, 周建萍主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2012.10
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5170-0269-7

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第247199号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 混凝土结构设计原理
作 者	主 编 翟爱良 周建萍 副主编 饶光媛 周翠玲 李昊 张园 郭巍 杨帆
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 20.75印张 492千字
版 次	2012年10月第1版 2012年10月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	39.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本书根据全国高等学校土木工程学科专业指导委员会审定通过的《混凝土结构》教学大纲和最新国家标准——《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)编写。

作为土木工程专业的一门专业基础课程,本书主要讲述土木工程涉及领域内各类混凝土基本构件的受力性能和分析计算。全书共9章,包括钢筋混凝土材料的物理力学性能、钢筋混凝土结构计算方法、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、变形和耐久性以及预应力混凝土构件等。

本书内容按照21世纪土木工程专业本科学生的培养规格和要求,从全面提高学生专业素质和创新能力出发,密切结合《混凝土结构》课程教学改革成果,结合工程实际和混凝土结构学科的国内外最新研究应用进展,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,每章均附有思考题,除第一章和第二章外,其他各章都有一定数量的习题,以强化学生对基本理论和基本知识的应用能力。

全书由山东农业大学翟爱良和云南农业大学周建萍担任主编。编写人员及分工为:翟爱良(绪论、第五章第三节)周建萍(第二章、第七章);周翠玲(第五章第一节、第二节);杨帆(第一章、第六章);李昊(第三章);郭巍(第四章);张园(第八章);饶光媛(第九章)。

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

编者

2012年7月

目 录

前言

绪论	1
思考题	12
第一章 钢筋混凝土材料的物理和力学性能	14
第一节 混凝土的物理力学性能	14
第二节 钢筋的品种和力学性能	26
第三节 钢筋与混凝土的黏结性能	31
思考题	36
第二章 混凝土结构设计基本原理	37
第一节 结构设计的极限状态	37
第二节 概率极限状态设计方法	40
第三节 荷载的代表值	43
第四节 材料强度的标准值与设计值	44
第五节 实用设计表达式	46
第六节 结构方案、结构抗倒塌设计和既有建筑的结构设计原则	50
思考题	52
第三章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	54
第一节 受弯构件截面形式及配筋的构造要求	54
第二节 受弯构件正截面承载力的试验研究	60
第三节 受弯构件正截面承载力计算的基本理论	63
第四节 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	69
第五节 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	76
第六节 T形截面受弯构件正截面承载力计算	84
思考题	93
习题	93
第四章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	97
第一节 概述	97
第二节 受弯构件斜截面的受力特点和破坏形态	97

第三节	受弯构件斜截面受剪承载力计算	106
第四节	受弯构件斜截面受弯承载力	118
第五节	配筋的构造要求	123
思考题		133
习题		134
第五章	钢筋混凝土受压构件的承载力计算	136
第一节	受压构件的一般构造	136
第二节	轴心受压构件正截面承载力计算	139
第三节	偏心受压构件承载力计算	147
思考题		183
习题		184
第六章	钢筋混凝土受拉构件承载力计算	186
第一节	概述	186
第二节	轴心受拉构件正截面承载力计算	186
第三节	偏心受拉构件承载力计算	188
思考题		193
习题		194
第七章	钢筋混凝土受扭构件承载力计算	195
第一节	概述	195
第二节	开裂扭矩	196
第三节	纯扭构件承载力计算	198
第四节	弯剪扭构件的承载力计算	205
思考题		213
习题		213
第八章	钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性	214
第一节	概述	214
第二节	混凝土构件裂缝宽度验算	217
第三节	受弯构件变形验算	227
第四节	混凝土构件的截面延性	235
第五节	混凝土结构的耐久性	239
思考题		246
习题		246
第九章	预应力混凝土构件	248
第一节	预应力混凝土的基本概念	248
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	251
第三节	张拉控制应力与预应力损失	257

第四节 预应力混凝土轴心受拉构件	264
第五节 预应力混凝土受弯构件	278
第六节 预应力混凝土构件的构造要求	305
思考题	308
习题	309
附录 1 术语及符号	311
附录 2 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 规定的材料力学指标	315
附录 3 钢筋的计算截面面积及公称质量	319
附录 4 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 的有关规定	321
参考文献	324

绪 论

一、混凝土结构的一般概念和特点

在土木工程中，由建筑材料筑成，能承受荷载而起骨架作用的构架称为工程结构，简称结构。从材料种类分，可分为混凝土结构、钢结构、木结构、砌体结构以及组合结构等。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（图 0-1）。

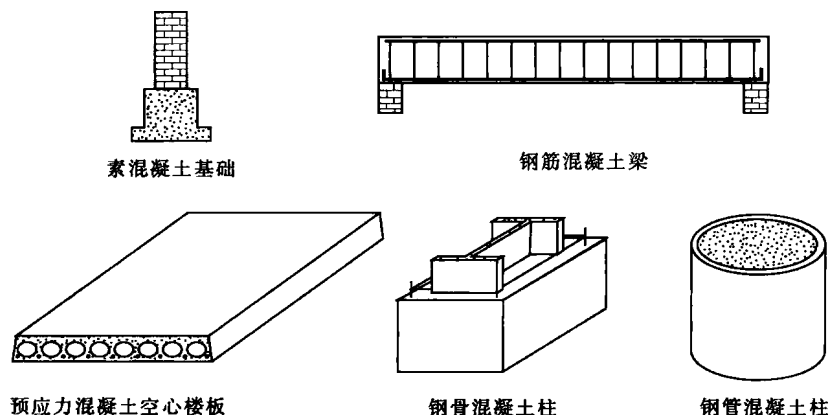


图 0-1 常见混凝土结构构件的形式

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。钢管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、设计原则、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。

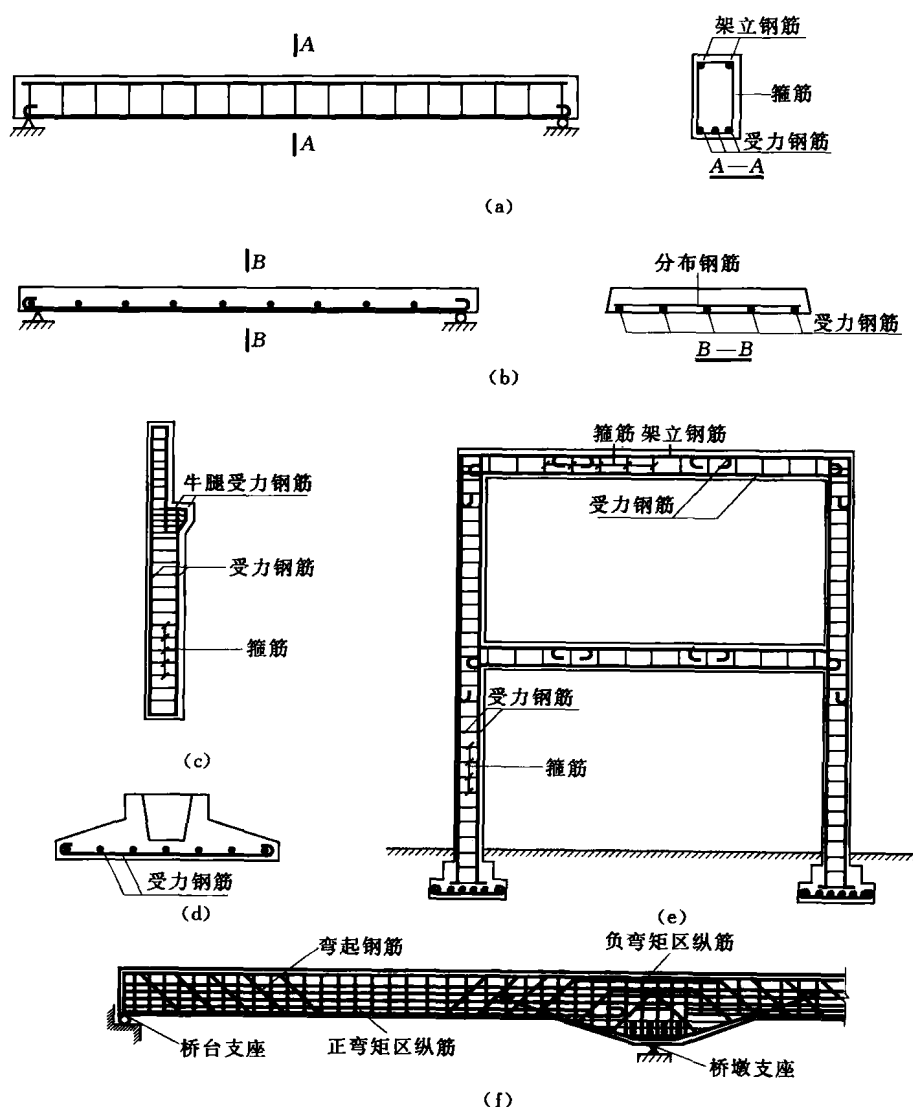


图 0-2 常见钢筋混凝土结构和构件配筋实例

- (a) 钢筋混凝土简支梁的配筋；(b) 钢筋混凝土简支平板的配筋；(c) 装配式钢筋混凝土
单层工业厂房边柱的配筋；(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

最常用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 0-3 所示为两根混凝土梁的对比实验情况。一根截面为 $200\text{mm} \times 300\text{mm}$ ，跨长为 4.0m ，混凝土强度为 C20 的素混凝土简支梁，如图 0-3 (a) 所示，当跨中承受的集中力 F 为 8.0kN 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 3 根直径 16mm 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，混凝土受压而破坏，破坏荷载增加到约为

36.0kN，如图 0-3 (b) 所示。

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，可以使结构的承载能力大幅度的提高，结构的受力性能得到显著的改善。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。当混凝土受拉区配置了适量的钢筋，一旦受拉区混凝土开裂，裂缝截面处的受拉混凝土虽然不能

继续承受拉力，但是此力可由受拉区钢筋来承受，因此钢筋混凝土梁不会像素混凝土梁那样发生脆性破坏，在受拉区混凝土开裂后还可以继续增加荷载直至钢筋应力达到屈服强度，梁才破坏，破坏荷载大为增加，梁的承载能力大大提高。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，在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，可以直接配置钢管；利用箍筋或钢管约束混凝土来提高混凝土的抗压强度等（图 0-4）。

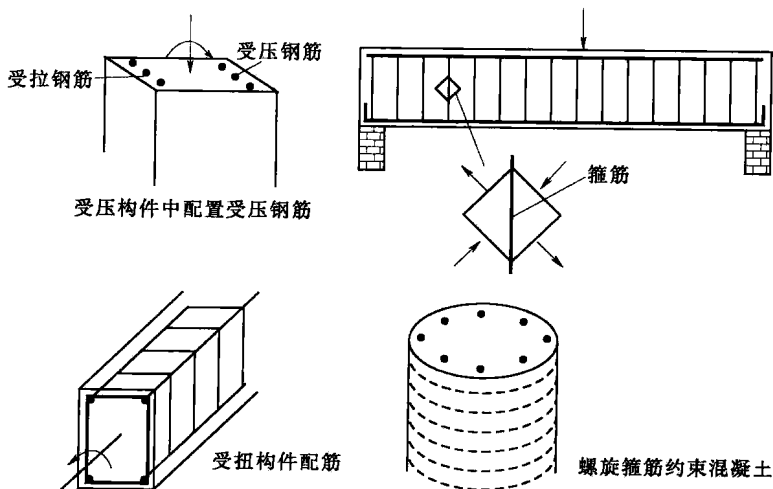


图 0-4 混凝土构件常见配筋方式

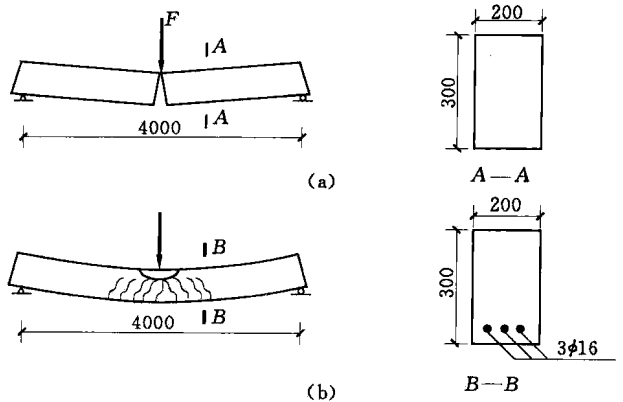


图 0-3 混凝土简支梁的破坏

(a) 素混凝土简支梁；(b) 钢筋混凝土简支梁

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。钢筋混凝土结构合理的利用了钢筋和混凝土两种不同材料的受力性能，使混凝土和钢筋的材料强度得到了充分的发挥，特别是现代预应力混凝土应用以后，在更大的范围内取代钢结构，降低了工程造价。结构的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的结构，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，混凝土属碱性性质，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；同时防振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) 结构自重大。混凝土和钢筋混凝土结构的重力密度一般为 23kN/m^3 和 25kN/m^3 ，由于钢筋混凝土结构截面尺寸大，所以对大跨度结构、高层抗震结构都是不利的。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 1800kg/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。混凝土抗拉强度很低，一般构件都有拉应力存在，配置钢筋以后虽然可以提高构件的承载力，但抗裂能力提高很少，因此对于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，也十分容易导致混凝土结构开裂。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、钢骨混凝土、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, 如最近研究开发的采用黏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。

钢筋和混凝土两种材料的物理力学性能很不相同, 能否共同工作是人们关心的问题, 实践证明这两种材料是能够有效结合在一起共同工作的, 两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, 能与钢筋牢固地黏结在一起, 相互传递内力。黏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 1.2×10^{-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, 致使黏结力遭到破坏。

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 160 多年的历史。1824 年, 英国约瑟夫·阿斯平丁 (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、钢木结构相比, 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实用阶段, 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，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，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的第一、第二位，我国于1997年7月建成通车的虎门大桥由东引桥、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，在建的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 。我国还将建造高度达290m的四川溪洛渡及其他高坝，已经开工的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 2500km 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 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

在改革开放 30 多年的时间里,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通地开展;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力研究。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与施工指南》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, 桥梁的跨度在 21 世纪已突破 500m, 正逼近 2000m, 大跨度空间结构跨度也将突破 200m, 印度正在设计拟在孟买建造 560m 高的钢筋混凝土电视塔, 我国拟在雅砻江拐弯处建一座高 325m 的混凝土拱式电站大坝。

(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的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^2 , 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被拔出而不是被拉断, 因此两者之间的黏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 $600\sim 900\text{g/m}^3$, 应具有较高的耐碱性及在水泥基体中的分散性与黏结性。合成纤维混凝土已经在我国上海东方明珠电视塔、上海地铁一号线等工程中使用, 取得了较好效果。

碳纤维有单向碳纤维布、双向碳纤维交织布、单向碳纤维层压板材等种类，拉伸模量一般为 230GPa，抗拉强度一般为 3200~3500MPa，具有轻质、高强、耐腐蚀、耐疲劳、施工便捷等优点，已广泛应用于建筑、桥梁结构的加固补强。此项技术从 1981 年瑞典最早采用碳纤维复合材料加固 Ebach 桥以来，在日美等国发展迅速，在 90 年代先后制订了加固设计规程，日本至今已有 1000 多个工程加固项目采用。我国从 1997 年开始研究并应用碳纤维加固混凝土结构，计算设计理论、材料及施工技术等方面均取得了很大进展，取得了良好的社会效果和经济效益，我国目前已经制订了《碳纤维布加固修复混凝土结构技术规程》。碳纤维也可以作预应力筋，应用于工程结构，日本、德国等国家用碳纤维作预应力筋建造了不少桥梁，1996 年在日本茨城用碳纤维作预应力筋建造了一座长度为 54.5m 的悬索桥。

(3) 轻集料混凝土得到研究和应用。轻集料混凝土是指密度小于 1800kN/m^3 的混凝土，其强度等级一般为 C15~C20，集料类型主要有人造轻集料、天然轻集料和工业废料轻集料等。这种混凝土顺应当前严峻的环保形势，具有很强的生命力。据报道，瑞典已经成功研制出密度小于水的超轻混凝土。

(4) 在钢筋工程技术方面，HRB400、RRB400 钢筋（相当于原标准的Ⅲ级钢筋）成为普通混凝土结构主导性受力钢筋，低松弛高强钢绞线将成为预应力结构的主导性受力钢筋，冷拉带肋钢筋得到更多的应用。此外，粗直径钢筋的连接技术得到较快发展，钢筋的连接将逐渐由搭接过渡到电渣压力焊、套筒挤压、锥螺纹连接、直螺纹连接等新的连接方式。与搭接连接相比，新连接方式连接可靠，节约钢筋。

2. 结构形式方面

混凝土结构形式将进一步向组合结构方向发展。

(1) 钢—混凝土组合结构稳步发展。为了充分发挥钢材的抗拉能力和混凝土的抗压能力，钢—混凝土组合结构应运而生。主要形式有：受弯构件采用混凝土板和型钢组合；受压构件采用钢管混凝土结构，以及钢骨混凝土、劲性混凝土结构。

钢骨混凝土结构在我国已经广泛采用，已建成的高层建筑有 30 多幢，如北京的香格里拉饭店、上海金茂大厦、上海浦东世界环球金融中心大厦等。钢骨混凝土结构有实腹式钢骨和空腹式钢骨两种形式（图 0-5、图 0-6），前者通常由钢板焊接拼成或用直接轧制而成的工字形、Ⅱ形、十字形截面，外包钢筋混凝土；后者是用轻型型钢拼成构架埋入混凝土中。抗震结构多采用实腹式钢骨混凝土结构。

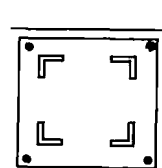
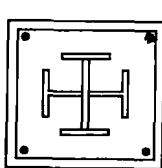
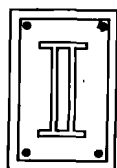
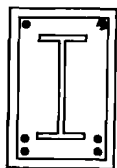


图 0-5 实腹式钢骨混凝土构件截面形式

图 0-6 空腹式钢骨混凝土
构件截面形式

钢骨混凝土结构的钢骨与外包钢筋混凝土共同承受荷载作用，外包混凝土可以防止钢构件的局部屈曲，提高构件的整体刚度，显著改善钢构件的平面扭转屈曲性能，还可以增

强结构的耐久性和耐火性。钢骨混凝土结构比钢结构节省钢材,增加刚度和阻尼,有利于控制结构的变形和振动,因此钢骨混凝土结构承载力大且延性好、耗能能力强,可显著改善结构的抗震性能。

预弯型钢预应力梁是钢—混凝土组合结构中一种较新的结构形式。这种结构采用工字钢在无应力状态下制成向上弯的构件,然后横向加载施压使其平直,再浇筑混凝土,待混凝土结硬后卸载,受预应力的工字钢将回弹使梁底受压,达到预应力效果。这种工艺无需锚具和张拉设备,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黏结预应力技术的基础上发展起来的缓黏结技术、体外预应力筋以及横向张拉预应力筋技术。

缓黏结技术与无黏结预应力工艺类似,但采用缓凝砂浆包裹预应力钢筋,在张拉钢筋时砂浆不起黏结作用,待钢筋锚固后,砂浆缓慢凝结硬化,与预应力钢筋相黏结,无需灌浆。缓凝技术在钢筋张拉时是“无黏结”,但在砂浆硬化后又是“有黏结”,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磨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,已在外国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;北欧还采用倒 L 形构件构成楼板和一方墙;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。

为节约木材及工程实际的需要,模板正向着非木材化、高品质、多功能方向发展。从材料上看,在小钢模的基础上开始研制使用中型钢模、钢框胶合板、竹模板甚至玻璃钢模