

高校土木工程学科
专业指导委员会规划推荐教材

混凝土及砌体结构

(上册)

哈尔滨工业大学 大连理工大学 合编
北京建筑工程学院 华北水利水电学院
东南大学 主审



中国建筑工业出版社

CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材

混凝土及砌体结构

上 册

哈尔滨工业大学	大连理工大学	合编
北京建筑工程学院	华北水利水电学院	
哈尔滨工业大学	王振东 主编	
东南大学	丁大钧 主审	

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土及砌体结构. 上册/王振东主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2002

高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材

ISBN 7-112-04785-4

I. 混... II. 王... III. ①混凝土结构-高等学校-教材 ②砌块结构-高等学校-教材 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 056685 号

本书介绍了混凝土和砌体结构的基本计算理论和设计方法, 分上、下两册。上册内容 10 章: 绪论、材性、设计方法、受弯构件正截面、受弯及偏心受力构件斜截面、受扭构件、受压构件正截面、受拉构件正截面、裂缝及变形、平面楼盖。下册内容 3 章: 预应力混凝土构件的计算、单层厂房结构、砌体结构。

本书可作为高校土木工程专业教材, 也可供土建设计、施工技术人员学习新修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 和《砌体结构设计规范》(GB 50003—2002) 时参考。

高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材

混凝土及砌体结构

上册

哈尔滨工业大学 大连理工大学 合编
北京建筑工程学院 华北水利水电学院
哈尔滨工业大学 王振东 主编
东南大学 丁大钧 主审

*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 21½ 字数: 433 千字

2002 年 9 月第一版 2002 年 9 月第一次印刷

印数: 1—7000 册 定价: 33.80 元

ISBN 7-112-04785-4

TU·4274 (10131)

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 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

本书为适应国家教育事业发展的需要，系根据全国高等学校土木工程专业普遍执行的“混凝土结构教学大纲”的要求编写而成，初稿于1996年由国家建设部审批为高等学校推荐教材，2002年由全国高校土木工程学科专业指导委员会审定作为规划推荐教材。

此次出版的内容是在所编写初稿的基础上，根据专家评审和广大读者的意见，并按国内最新修订的《建筑结构荷载规范》(GB 50009)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50072)和《砌体结构设计规范》(GB 50003)，进行全面整理编写而成，使教材内容更加完善，并反映了新的科技成果。

本书编写的主要特点：符合教学大纲的要求，同时为了减轻学生学习的负担，贯彻少而精的原则，在各章节中，尽量精炼内容，力求概念清楚，文字通顺，便利教学。书中带有“*”号的章节，可供学生自学参考。

参加本书上册编写的单位和人员：

哈尔滨工业大学：王振东（教授）、张景吉（教授）；邹超英（教授）、王凤来（博士）；大连理工大学：赵国藩（院士）；北京建筑工程学院：施岚青（教授）；华北水利水电学院：李树瑶（教授）。

本书上册编写的分工：赵国藩（绪论），王振东（第一章、第三章、第五章），施岚青、王振东、王凤来（第二章），施岚青、王振东（第四章、第七章），施岚青、王振东、邹超英（第六章），李树瑶（第八章），张景吉（第九章）。

本书编写过程中，直接受到大连理工大学赵国藩院士的指导，同时还受到天津市第二预应力公司经理朱龙、冶金建筑科学研究院高级工程师束继华等专家热情的指导和帮助；哈尔滨工业大学土木工程学院王凤来博士、何政博士参加部分插图的制作和书稿的整理工作，我们谨向以上的专家表示衷心的感谢。

本书由哈尔滨工业大学王振东主编，东南大学丁大钧主审。由于水平所限，书中有不妥或错误之处，恳请读者指正。

编者

2002年8月

目 录

绪论	(1)
§ 0.1 概述	(1)
§ 0.2 混凝土结构的发展简况	(3)
§ 0.3 学习本课程的目的及其特点	(10)
参考文献	(10)
第1章 材料的力学性能	(12)
§ 1.1 钢筋	(12)
§ 1.2 混凝土	(20)
§ 1.3 钢筋和混凝土之间的粘结(握裹)力	(36)
参考文献	(39)
第2章 混凝土结构的设计方法	(41)
§ 2.1 结构设计的要求	(41)
§ 2.2 结构的作用、作用效应和结构抗力	(43)
§ 2.3 结构按概率极限状态设计	(48)
§ 2.4 按承载能力极限状态计算	(51)
§ 2.5 按正常使用极限状态计算	(54)
§ 2.6 混凝土结构的耐久性	(56)
§ 2.7 结构设计方法的概述*	(60)
§ 2.8 数理统计中的一些基本知识*	(62)
§ 2.9 混凝土强度标准值指标*	(66)
参考文献	(67)
第3章 受弯构件正截面承载力	(68)
§ 3.1 概述	(68)
§ 3.2 受弯构件一般构造要求	(68)
§ 3.3 受弯构件正截面的试验研究	(73)
§ 3.4 正截面受弯承载力计算一般规定	(76)
§ 3.5 单筋矩形截面梁的受弯承载力计算	(80)
§ 3.6 双筋矩形截面梁的受弯承载力计算	(85)
§ 3.7 T形截面梁的受弯承载力计算	(90)
§ 3.8 正截面受弯承载力计算的几个问题*	(96)
参考文献	(99)

第 4 章 受弯构件斜截面承载力	(100)
§ 4.1 概述	(100)
§ 4.2 无腹筋梁的斜截面受剪承载力	(101)
§ 4.3 有腹筋梁的斜截面受剪承载力	(107)
§ 4.4 连续梁斜截面受剪承载力	(116)
§ 4.5 斜截面受弯承载力	(117)
§ 4.6 钢筋的构造要求	(126)
§ 4.7 偏心受力构件受剪承载力*	(132)
参考文献.....	(135)
第 5 章 受扭构件扭曲截面承载力	(136)
§ 5.1 概述	(136)
§ 5.2 试验研究分析	(136)
§ 5.3 矩形截面纯扭构件的承载力	(137)
§ 5.4 矩形截面弯剪扭构件的承载力	(140)
§ 5.5 T 形和工字形截面弯剪扭构件的承载力	(143)
§ 5.6 受扭构件的构造要求	(145)
§ 5.7 框架边梁协调扭转的设计	(149)
§ 5.8 受扭构件计算的几个问题*	(150)
参考文献.....	(155)
第 6 章 受压构件正截面承载力	(156)
§ 6.1 概述	(156)
§ 6.2 受压构件的构造要求	(157)
§ 6.3 轴心受压构件正截面的承载力计算	(159)
§ 6.4 偏心受压构件正截面的承载力计算	(165)
§ 6.5 双向偏心受压构件正截面的承载力计算	(198)
§ 6.6 偏心受压构件考虑水平荷载二阶效应时内力分析的概念* ...	(202)
参考文献.....	(204)
第 7 章 受拉构件正截面承载力	(205)
§ 7.1 概述	(205)
§ 7.2 大偏心受拉构件正截面的承载力计算	(205)
§ 7.3 小偏心受拉构件正截面的承载力计算	(207)
参考文献.....	(210)
第 8 章 钢筋混凝土构件裂缝及变形的验算	(211)
§ 8.1 概述	(211)
§ 8.2 裂缝宽度的验算	(213)
§ 8.3 变形的验算	(226)

参考文献	(235)
第9章 钢筋混凝土平面楼盖	(236)
§ 9.1 概述	(236)
§ 9.2 整体式单向板肋梁楼盖	(237)
§ 9.3 整体式双向板肋梁楼盖	(273)
§ 9.4 无梁楼盖	(292)
§ 9.5 装配式铺板楼盖	(300)
§ 9.6 楼梯	(307)
参考文献	(316)
附录	(317)

绪 论

§ 0.1 概 述

混凝土是一种抗压能力比较高的材料，但是它的抗拉能力却很低，这就使得混凝土结构的应用受到很大限制。例如，试验表明，一根截面为 $200\text{mm} \times 300\text{mm}$ 、跨度为 2.5m 、用 C20^[注] 混凝土做成的素混凝土简支梁，只承受约 12.5kN 作用在跨中的集中力，就因混凝土受拉而断裂为两半（图 0.1a）。但是，如果在混凝土构件的受拉区配置一定数量的钢筋，例如在上述这根混凝土梁中配置 2 根直径 20mm 的 HRB335 级钢筋，做成钢筋混凝土构件（图 0.1b），混凝土开裂后，由钢筋代替混凝土承受拉力，则构件的承载力就会大大提高。试验表明，该梁在破坏时能承受约 76kN 的集中力。这就说明，与素混凝土梁比较，同样截面形状和尺寸的钢筋混凝土梁可承受大得多的外荷载。钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种材料组成的共同受力结构，除以受压为主的构件外，通常是以混凝土承担压力、钢筋承担拉力。因此，钢筋混凝土结构能比较充分地利用混凝土和钢筋这两种材料的力学性能。

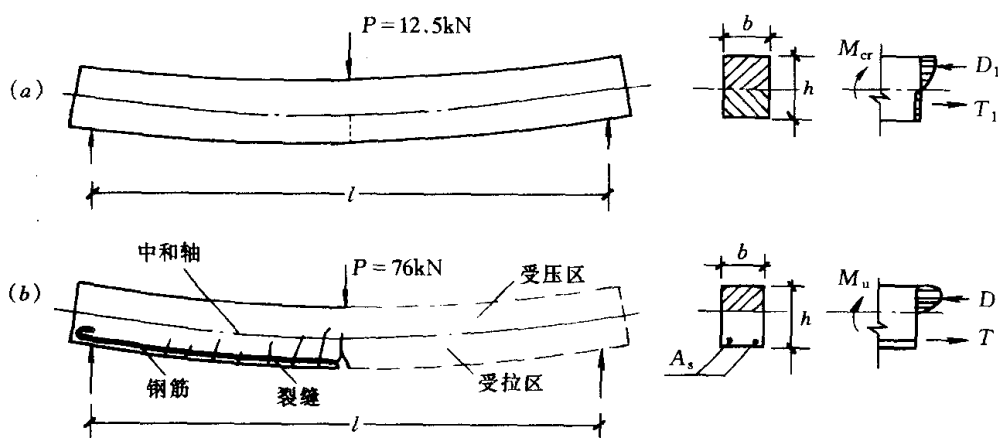


图 0-1 混凝土及钢筋混凝土简支梁的承载力

钢筋和混凝土这两种性能不同的材料能结合在一起受力，主要是由于它们之间有良好的粘结力，能牢固地粘结成整体。当构件承受外荷载时，钢筋和相邻的

[注] C20 表示混凝土强度等级，其中 C 表示混凝土，20 表示其立方体抗压强度标准值为 20N/mm^2 ，具体见 § 1.2 节中 1.2.1。

混凝土具有相同变形,两者共同工作不产生相对滑动。此外,钢筋与混凝土的线膨胀系数又较接近(钢为 1.2×10^{-5} ,混凝土为 $1.0 \sim 1.5 \times 10^{-5}$),当温度变化时,这两种材料不致产生相对的温度变形而破坏它们之间的结合。

钢筋混凝土除了较合理地利用钢筋和混凝土两种材料的性能外,还有下列优点:

(1) 耐久性好 处于良好环境的钢筋混凝土结构,混凝土的强度随时间不断增长,且钢筋受混凝土保护而不易锈蚀,所以钢筋混凝土结构的耐久性好,不像钢结构那样需要定期维修。

(2) 耐火性好 由传热性差的混凝土作钢筋的保护层,在遭受火灾时比钢、木结构的耐火性强。

(3) 整体性好 现浇整体式钢筋混凝土结构,整体性好,因而有利于抗震及防爆。

(4) 刚性好 钢筋混凝土结构的刚性大,在使用荷载下仅产生较小的变形,故有效地用于对变形要求较严格的各种建筑物。

(5) 可模性好 钢筋混凝土可根据设计需要,浇制成各种形状和尺寸的结构,特别适宜于建造外形复杂的大体积结构及空间薄壁结构。这一特点是砖石、钢、木等结构所没有的。

(6) 就地取材 钢筋混凝土中所用的砂、石材料,一般可以就地、就近取材,因而材料运输费用少,可以显著降低建筑造价。相对来说它的能源消耗也比钢结构和砖砌体结构少。

(7) 节约钢材 钢筋混凝土结构合理地利用钢筋及混凝土各自的优良性能,在某些情况下,能代替钢结构,节约钢材,降低造价。

但是,钢筋混凝土也有一些缺点:

(1) 自重比钢结构大,不利于建造大跨度结构及超高层建筑。

(2) 施工比钢结构复杂,建造期一般较长,不宜在冬季和雨天施工,必须采取相应的施工措施才能保证质量。

(3) 一般情况下浇筑混凝土要用模板,现浇时还要用脚手架(支架),因而需要一定数量的施工用木材或钢材和其他材料。

(4) 补强维修工作比较困难。

钢筋混凝土结构可作如下分类:

(1) 按结构的受力状态和结构外形可分为杆件系统和非杆件系统两大类。杆件系统中又有受弯构件、受压构件、受拉构件、受扭构件等。非杆件系统可以是空间薄壁结构,也可以是外形复杂的大体积结构。

(2) 按结构的制造方法可分为整体式、装配式及装配整体式三种。整体式结构是在现场先架立模板、绑扎钢筋,然后现场浇捣混凝土而成的结构。它的整体性比较好,刚度也比较大,但生产较难工业化,施工期长,模板用料较多。装配

式结构则是在工厂(或预制工厂)预先制备各种构件,然后运往工地装配而成。采用装配式结构可使建筑事业工业化(设计标准化、制造工业化、安装机械化);制造不受季节限制,能加快施工进度;利用工厂有利条件,提高构件质量;模板可重复使用,还可免去脚手架,节约木料或钢材。目前装配式结构在建筑工程中已普遍采用。但装配式结构的接头构造较为复杂,整体性较差,对抗震不利,装配时还需要有一定的起重安装设备。装配整体式结构是一部分为预制的装配式构件,另一部为现浇的混凝土。预制装配部分通常可作为现浇部分的模板和支架。它比整体式结构有较高的工业化程度,又比装配式结构有较好的整体性。

(3)按结构的初始应力状态可分为普通钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。预应力混凝土结构是在结构承受荷载以前,预先在混凝土中施加压力,造成人为的压应力状态,预加的压应力可全部或部分地抵消荷载产生的拉应力。预应力混凝土结构的主要优点是抗裂性能好,能充分利用高强度材料,可以用来建造大跨度的承重结构。

钢筋混凝土结构在工程上的应用是极为广泛的,在工业与民用建筑、桥梁、道路工程、地下工程、水利工程、核电站、港口、航道工程、海洋工程以及水压机、机床、船舶等都广泛使用这种组合材料。

用钢筋混凝土建造的国外著名工程有:马来西亚吉隆坡 88 层 450m 高的石油双塔楼,朝鲜平壤市 105 层 319.8m 高的柳京饭店,加拿大和前苏联分别建成高度为 549m 及 533m 的预应力混凝土电视塔。大跨度的预应力混凝土桥有跨度 530m 的挪威特隆赫姆 Skarnsundet 预应力混凝土斜拉桥(1991 年),跨度 390m 的克罗地亚的亚克尔克 II 号拱桥(1980 年)等。还有英国北海石油开采平台 24 个预应力混凝土贮油罐的海下深度达 216m,油罐直径 28m,底板毛面积为 16000m^2 (1989 年)。

我国建国以来修建的大型混凝土结构主要有:广州 65 层 200m 高的广东国际大厦(1990 年),广州 321.9m 高的中天广场大厦(1997 年),香港 374m 高的中心广场大厦,上海建成高度为 468m,具有独特的空间框架型式的上海电视塔。大跨度的桥梁有:跨度 444m 的重庆预应力混凝土斜拉长江二桥,跨度 420m 的四川万县混凝土拱桥。在水坝建设方面有:甘肃刘家峡 147m 高的重力坝,青海龙羊峡 172m 高的拱形重力坝,装机容量为 $2.715 \times 10^6 \text{kW}$ 的葛洲坝水电站,即将建成的装机容量为 $3.0 \times 10^7 \text{kW}$ 的四川二滩 240m 高的双曲拱坝(1998 年第一期工程开始发电),还有正在建设举世闻名的三峡水利枢纽工程,建成后其装机容量达 $1.8 \times 10^8 \text{kW}$,超过了目前世界最大的巴西和巴拉圭共有的伊泰普水电站装机容量的 40%以上。上述这些混凝土工程,都是具有世界先进水平的结构工程。

§ 0.2 混凝土结构的发展简况

混凝土结构的应用虽然只有 150 年左右的历史,但它比砖石、钢木结构具有

更多的优点,目前我国每年混凝土用量约 9 亿 m^3 ,钢筋用量约 2000 万 t,经测算,我国每年仅混凝土结构需耗资 2000 亿元以上^[0-1],在生产上用量之大,耗资之巨,居世界前列。可以预见,混凝土将是我国今后相当长时期内一种重要的工程结构材料,混凝土的发展可以从以下几个方面简要介绍如下。

一、材料

(一) 混凝土:其发展的主要方向是高强、轻质、耐久、抗震(爆)。

1. 高性能混凝土

所谓高性能混凝土是指混凝土具有高强度、高耐久性、高流动性等多方面优越性能的混凝土,它是近年来混凝土材料发展的一个重要方面,从强度而言,抗压强度大于 C50 的混凝土属于高强混凝土,提高混凝土的强度是发展高层建筑、高耸结构、大跨度结构的重要措施。采用高强混凝土可以减小截面尺寸,减轻自重,获得较大的经济效益,同时具有良好的耐久性。目前国际上混凝土已达到很高的强度,如罗马尼亚已制成 C170 的混凝土,美国已制成 C200 的混凝土,我国已制成 C100 的混凝土。预计到 21 世纪以后,特种混凝土的抗压强度可达 $400\text{N}/\text{mm}^2$,相当于现在所用的 HRB400 级钢筋的抗压屈服强度。高强混凝土的主要缺点是延性差。

在我国为提高混凝土强度所采用的主要措施:①采用高效减水剂以降低水灰比是获得高强度混凝土的主要技术方法;②采用优质水泥,如采用 525、625 及 725 号的硫铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥;③采用优质骨料;④利用优质掺合料,如采用优质的磨细粉煤灰、硅灰、天然沸石矿粉或超细矿渣等。

2. 轻集(骨)料混凝土(Light Aggregate Concrete)

利用天然轻集料(如浮石、凝灰岩等)、工业废料轻集料(如炉渣、粉煤灰、煤矸石等)及其轻砂,人造轻集料(页岩陶粒、粘土陶粒、膨胀珍珠岩等)制成的轻集料混凝土,具有自重较小(可减轻自重 10~30%),相对强度高以及保温、抗冻性能好等优点。一般常用的轻集料混凝土的强度等级为 C15~C20,高强轻集料混凝土可达 C100,自重为 $17\sim 18\text{kN}/\text{m}^3$ 。自二十世纪六十年代以来,轻质高强混凝土是建造高层、大跨结构的主要材料。国外用于工程结构的轻集料混凝土为 C30~C60,自重为 $10\sim 14\text{kN}/\text{m}^3$,用于保温而不承重的轻集料混凝土一般为 C5~C20,自重为 $9\sim 14\text{kN}/\text{m}^3$ 。目前,我国生产的人造轻集料的松散自重为 $5\sim 8\text{kN}/\text{m}^3$,可配制成级别为 C7.5~C30,自重为 $12\sim 18\text{kN}/\text{m}^3$ 的轻集料混凝土;同时,又生产出超轻陶粒,松散自重为 $3\sim 5\text{kN}/\text{m}^3$,达到了国际先进水平。我国发展轻集料混凝土的重要途径是积极利用工业废渣废料,降低混凝土生产成本,变废为用,减少城市或厂区的污染,减少堆积废料占用的土地。另一个途径是大力开采和利用天然轻集料,我国吉林、黑龙江、内蒙古、山西等地均有丰富的天然轻集料。

3. 改良混凝土(Modified Concrete),包括:

纤维增强混凝土^[0-5] 为了改善混凝土抗拉性能和延性差的缺点,20 世纪 60

年代以后,掺加纤维以改善混凝土性能的研究和应用发展得相当迅速,目前研究较多的有掺钢纤维、耐碱玻璃纤维、聚丙烯纤维或尼龙合成纤维、植物纤维等。

钢纤维混凝土具有抗拉、抗弯、抗剪、耐磨、抗疲劳、延性及韧性好的性能,工程应用相当广泛,例如用于构件的三维复杂受力部位、抗震框架节点区、刚性防水屋面、地下防水工程、混凝土拱桥拱体受拉区、桥梁桥面、公路路面、机场道面、水工建筑中的高速水流冲刷及腐蚀部位,喷射钢纤维混凝土用于隧洞衬砌工程以及结构加固工程等处,均取得了良好的效果。目前国内已用钢丝切断法、薄板剪切法、钢锭(厚板)切削法、熔钢抽丝法等几种主要方法进行钢纤维的生产。

在施工技术上,钢纤维混凝土体积率一般为 $0.6\% \sim 2.0\%$,体积率再增加容易结团成球,影响混凝土质量,但是国内外正在研究一种体积率为 $5\% \sim 20\%$,最高达 27% ,简称为SIFCON的砂浆渗钢纤维混凝土,施工时是先将钢纤维松散填入在模具内,然后浇筑水泥浆或砂浆,硬化成型,其特点是抗压强度大幅度地提高可达 $100 \sim 200 \text{ N/mm}^2$,其抗拉、抗弯、抗剪以及延性、韧性等性能也比普通体积率的钢纤维混凝土有更大的提高。另一种名为SIMCON的施工方法与SIFCON基本相同,只是用钢纤维网(Mat)制成的产品预先填置在模具内,然后渗浇水泥浆,其钢纤维体积率一般为 $4\% \sim 6\%$,比前一方法用较低钢纤维体积率而达到相同的强度和韧性,取得节约材料的效果。虽然以上两种材料力学性能优良,但由于钢纤维用量大,一次性投资高,施工工艺特殊,因此只是在必要时对于某些特殊的结构或构件的局部,如火箭发射台等处采用。

钢丝网水泥 是在砂浆中铺设钢丝网及骨架钢筋作为薄壁结构,具有良好的抗裂能力和变形能力,在国内外造船、水利、建筑工程中应用较为广泛。我国对钢丝网水泥船的制造,在世界上是具有先进水平的。

我国用玻璃纤维增强的水泥制品,采用耐碱玻璃纤维和低碱水泥相配合的方法,可以大幅度提高混凝土抗拉强度,提高纤维抗碱化能力,构件预期寿命可在50年以上,已用于非承重和半承重的构件,并正在研究用于承重构件的问题。对玻璃纤维和塑料纤维混凝土在耐火方面,国外资料认为当温度低于 90°C 时是没有问题的,否则,温度过高对耐火性能就有影响,在这方面今后还需进一步的研究。

树脂混凝土 是树脂和混凝土复合而成的新型材料,其强度可达 100 N/mm^2 以上。常用的树脂有聚酯树脂和环氧树脂。树脂混凝土强度高、成型性好,耐腐蚀性强,多用于冶金、化工部门有腐蚀介质作用的结构及容器(如酸洗槽)。

此外,膨胀混凝土、聚合物混凝土等也得到应用。

4. 按施工方法不同配制的混凝土

碾压混凝土 是国内外发展较快的一种新型材料,用于大体积混凝土结构(如水工大坝)、工业厂房地面、公路路面及机场道面等。其浇筑机具与普通混凝土不同,平整使用推土机,振实用碾压机,层间处理用刷毛机,施工的机械化程

度和施工效率高,与普通混凝土相比,可缩短浇筑工期 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$,并可大大减少用水量和水泥用量。

碾压混凝土的层间抗剪性能是修筑混凝土高坝的关键,国内正开展这方面的研究工作。

其他混凝土 如泵送混凝土、流态混凝土应用得比较广泛,还有水下混凝土,将水泥砂浆用压力灌入粗骨料空隙中形成的压浆混凝土,喷射混凝土等也得到应用。

(二) 配筋

混凝土结构的配筋材料,最近在国际上研究较多的是树脂粘结的纤维筋(FRP),常用的有树脂粘结的碳纤维、玻璃纤维及芳纶(Aramid)纤维。国外研究指出,以上这些纤维制成的筋材强度都很高,只是玻璃纤维筋的抗碱化性能较差。

为了减少裂缝宽度和构件的变形,我国一些地区研究采用焊成梯格形的双钢筋,它主要用在板式构件或跨度不大的小梁及直径不大的筒仓、水泥罐等处。

为了节约钢材用量,国内用光圆的HPB235级钢筋,冷轧成带肋的直径小于母材直径的冷轧带肋钢筋,另一种也是用HPB235级钢筋冷轧扭转成型的冷轧变形钢筋或冷轧扭钢筋。这两种冷轧钢筋的抗拉强度比母材HPB235级钢筋大大提高,与混凝土粘结强度也提高,从而节约材料用量,获得经济效益,它主要用于板式构件的受力钢筋或梁、柱的箍筋或作预应力筋。为了扩大这种钢筋用于梁、柱的受力钢筋可采用双筋或三筋的并筋,但需适当增大其锚固长度。

在海洋环境或有腐蚀性介质的环境中,如冬季撒盐的桥面,为了防止钢筋锈蚀,可用不锈钢制造的钢筋,但价格昂贵,另一个途径是用环氧树脂涂敷钢筋表面,防止钢筋生锈,这一方法在日本、美国应用较多。

二、结构

钢—混凝土组合结构是近年来值得注意的发展方向之一,如钢板混凝土用于地下结构、混凝土结构加固,压型钢板—混凝土板用于楼板,型钢与混凝土组合而成的组合梁用于楼盖或桥梁,外包钢混凝土柱用于电厂主厂房等。在钢管内浇筑混凝土,在纵向压力作用下,使管内混凝土处于三向受压状态,而管内的混凝土又抑制管壁的局部失稳,因而使构件的承载力和变形能力大大地提高,而且钢管又是混凝土的模板,施工速度较快。这种结构近年来已在国内逐步应用。

在钢—混凝土组合梁中,将工字型钢腹板按折线形切开,改焊成高度更大的蜂窝形梁,既提高了抗弯能力,又便于管道通过有洞的腹板,在电厂结构中已经应用^[0-11]。

近年来在比利时、日本以及我国研究应用一种预弯型钢的预应力梁^[0-12]。即将预制的带有拱度的工字型钢梁,在加载状态下,在下翼缘浇筑混凝土,待达到一

定强度后卸载使下翼缘的混凝土预压,然后运至现场铺设预制梁板,再浇筑上部混凝土成为装配整体式构件,在使用荷载下,下翼缘产生的外加拉应力可与预加的压应力抵消,类似于预应力混凝土迭合结构,虽然钢材用量稍多,但截面尺寸和自重均可减小,施工时无需锚具和张拉设备,国外已建成跨度达 60m 的公路桥,国内在辽宁、武汉、哈尔滨等地的桥梁工程中已有应用。

预应力混凝土结构近年来发展也较迅速,其中引人重视的是无粘结部分预应力混凝土结构^{[0-13][0-14][0-15]}。无粘结筋是由单根或多根高强钢丝、钢绞线或钢筋,沿全长涂抹防腐油脂并用聚乙烯热塑管包裹而成。张拉时无粘结筋与周围混凝土产生纵向相对滑动。无粘结筋象普通钢筋一样敷设,然后浇筑混凝土,待混凝土达到规定的强度后进行张拉和锚固,省去了传统后张预应力混凝土预埋管道、穿索、压浆工艺,节省施工设备,缩短工期,节约造价,可得到综合的经济效益,我国目前已在房屋建筑和公路桥梁中应用。

一种体外张拉的预应力索已在桥梁工程的修建、补强加固中应用,其特点是:与体内无粘结预应力筋一样大幅度减小预应力值的摩擦损失,简化截面形状和减小截面或壁厚尺寸,便于再次张拉、锚固、更换或增添新索,提高构件的承载力,我国汕头海湾大桥的索桥预应力混凝土加劲梁即采用了体外索。

国内最近在上海成都路高架桥工程采用一种“缓粘结”预应力混凝土张拉工艺,与无粘结预应力筋类似,但预应力筋周围是用缓凝砂浆包裹,在钢筋张拉时砂浆不起粘结作用可以自由张拉,待钢筋锚固后砂浆缓慢凝结硬化,与预应力筋相粘结。这种施工工艺,在张拉时是“无粘结”,在砂浆凝结后又是“有粘结”的,具有进一步研究的意义。

三、计算理论

钢筋混凝土宏观上是两种材料的组合体,从微观上看,混凝土又是水泥浆、砂、石、孔隙等组合体,其力学性能相当复杂,分析钢筋混凝土结构的问题,要比分析以匀质材料制造的结构(如钢结构)困难复杂,其结构计算理论的发展,同时又与力学、数学、物理学等基础科学的发展密切相关,主要有:

1. 钢筋混凝土有限元分析方法^{[0-16][0-17][0-18]}

有限元分析的概念是人为地把弹性体划分成有限个单元(如取相邻两个节点之间的梁、柱或二力杆等),由有限个节点相互连接而成为离散结构物,计算时通过对单元的分析,建立节点与节点位移关系的平衡方程式,并进一步进行整体分析,由节点平衡方程式集成结构的平衡方程组,最后通过解结构的线性代数平衡方程组,计算出各单元的内力及支承反力。由于有限元法可用计算机进行分析,确实使许多过去望而生畏的工程力学难题得到迅速而又可靠的解答。因此,其应用得到迅速的发展。

钢筋混凝土有限元是研究混凝土随着荷载的增加,由弹性状态过渡到塑性状态,最后达到丧失承载能力极限状态全过程中内力和变形发展的有效的弹塑性分

析法,这种方法可以给出结构内力和变形的全过程,包括裂缝的形成和扩展,结构破坏过程及破坏形态,显示出结构的薄弱部位,给出结构极限承载能力等。

2. 钢筋混凝土结构的极限分析^[0-17]

对于板、壳、连续梁、框架结构的极限承载力,采用极限分析法直接求解,是一个发展的方向,并已有较多的成果,但需保证正常使用(限制裂缝和变形)和薄壁结构及细长压杆的稳定性,以及防止脆性的剪切破坏和钢筋锚固的失效。

3. 混凝土断裂力学

在计算理论中,另一个值得注意的发展方向是混凝土断裂力学在水工大坝中的应用,1995年在瑞士苏黎世举行的国际学术会议,对混凝土断裂的材料模型、复合型断裂、损伤模型、动态断裂、应用及设计规范等多项专题,进行了讨论。

1990年欧洲混凝土结构模式规范(CEB-FIP),给出了与最大骨料粒径 $d_{\max}$ 及混凝土强度等级有关的断裂能 G_F 的估算值以及 G_F 与温度和含水量的关系,这些规定虽然还不够完善,但为混凝土断裂力学的工程应用提供了基础。

4. 混凝土的收缩与徐变

混凝土收缩与徐变的研究一直是混凝土计算理论中的一个重要方面,对水工混凝土及预应力混凝土结构的计算理论影响甚大,我国水利水电科学研究院多年来进行了系统的研究,出版了专著“混凝土的收缩”及“混凝土的徐变”,结合我国工程实际情况,提出了估算收缩的方法,介绍了六种徐变计算理论,并以试验数据为依据进行了评述,还介绍了减小干缩和温度收缩的措施,介绍了结构徐变分析和数值分析方法等。

1990年欧洲混凝土模式规范(CEB-FIP)也对混凝土收缩及徐变提出了有关的计算公式。

5. 工程结构可靠度^{[0-22][0-23][0-24]}

工程结构,包括混凝土结构,在设计施工、使用过程中,事必具有种种影响结构安全、适用、耐久的不确定性,这些不确定性大致可分为:随机性、模糊性、知识的不完善性。

事物的随机性,即事件发生条件充分与否,从而使事件出现与否表现出不确定性。处理和研究随机性的数学方法是概率论、随机过程和数学方法等。国内外对这种随机的不确定性对结构可靠性的影响作了大量研究,在国际标准ISO2394以及一些国家的规范,包括我国各种专业的工程结构设计规范,引用以概率论为基础的可靠性设计原则,在工程实用中得到不断的发展。

事物的模糊性,即事物本身的概念是模糊的,也就是说一个集合到底包括那些事物是不明确的,例如工程结构中的“正常使用”与“不正常使用”、“耐久”与“不耐久”、“安全”与“危险”。

大连理工大学引用模糊数学研究钢筋混凝土结构正常使用极限状态的可靠度,提出了当量随机化计算方法,以及同时考虑模糊性和随机性影响的结构可靠

度统一数学模型等。哈尔滨建筑大学在模糊数学用于地震烈度综合评定、抗震可靠性分析及优化设计等方面作了系统深入的研究^[0-23]。

知识的不完整性，即事物的系统是相互联系、相互作用构成具有特定功能的整体。虽然有些客观事物本身是属于确定性事物，但由于主观原因（例如知识水平不足）而对该事物认识不清，或是客观原因（例如难于取得待建桥梁未来荷载的统计信息），使决策者在使用这一信息时必须考虑它的不确定性等。目前对这种不完备的信息，还没有成熟的数学方法。

四、结构耐久性

混凝土结构耐久性研究是一个重要的问题，我国沿海及近海地区的混凝土结构，由于混凝土腐蚀，特别是钢筋的锈蚀而造成结构的早期损坏，已成为工程中的重要问题。提高混凝土耐久性的主要措施有：采用高炉矿渣水泥、优质陶粒骨料、高效减水引气剂、优质掺合料（如硅灰），选用低碱水泥、注意选择骨料，防止碱-集料反应（掺合料对防止碱-集料反应的效果顺次为：硅粉、粉煤灰、矿粉）；保证施工质量或采用防腐涂层（环氧树脂等）。钢筋腐蚀会使构件产生顺筋裂缝、保护层剥落。防止钢筋锈蚀的主要措施是合理的保护层厚度，振捣密实的混凝土，良好的养护和使用环境。

结构的耐久性问题可分为两大类型：

(1) 待建结构耐久性设计

耐久性设计涉及到结构暴露环境、结构选材、设计、施工、养护、检查、管理、维修等多方面的条件，是一个极为复杂的问题。国家正在开展这方面的研究工作，预期近年内对于混凝土结构耐久性设计将有重大的进展。

(2) 已建结构的鉴定^[0-26]

已建混凝土结构，经过长期使用或突然的灾害（地震、火灾），引起功能退化，这种结构功能的评估鉴定与待建时期的设计有很大的区别，需要根据当时当地“木已成舟”的现场条件，对已建结构功能进行鉴定，以评估结构的安全性和耐久性，提出处理方案。对需要加固结构，如建筑结构，已由中国工程建设标准化协会颁布了“混凝土结构加固技术规范”（CECS25:90），提出了加大截面法、外包钢法、预应力法、改变结构传力途径法等加固方法。

五、试验技术

由于混凝土结构的材料组成相当复杂，要检验理论计算是否符合结构的实际受力情况，或者是观测结构受力后的损伤情况，需要研究近代试验技术（如声发射、云纹法、激光散斑法等）以及模型试验技术等，这是混凝土学科中的一个重要方面。

§ 0.3 学习本课程的目的及其特点

混凝土结构是土木、建筑、水利工程中最基本的结构形式。本课程也是工业与民用建筑专业中极为重要的课程。学习本课程的主要目的是：掌握混凝土结构构件设计计算的基本理论和构造知识，为今后能顺利地从事结构设计工作打下牢固的基础。

在某种意义上来说，本课程是研究钢筋混凝土这一具体材料的力学理论课程。因为研究的对象不是弹性材料，它与研究弹性体的“材料力学”完全不同。在学习时应注意它们之间的异同点。混凝土的力学特性及强度理论非常复杂，人们对此认识得还不深，因此，目前钢筋混凝土结构的计算公式通常是在理论分析和大量试验基础上建立起来的。我们必须重视这种通过试验建立理论的方法，注意每一理论的适用范围和条件，在实际工程设计中正确运用这些理论与公式。

本课程同时又是一门结构设计课程，有很强的实践性。要搞好工程结构设计，除了要有扎实的基础理论以外，还须综合考虑材料、施工、经济、构造细节等各方面的因素。通过参加实践工作，逐步掌握对各种错综复杂因素的综合分析能力，这是非常重要的。此外，为了培养从事设计工作的能力，对数字计算、整理编写设计书、绘制施工图纸等基本技能有严格的要求。

参 考 文 献

- [0-1] 李明顺. 坚持科研促使混凝土结构设计规范水平跻身世界先进行列. 工程建设标准化, 1997: (1): 13~16
- [0-2] 冯乃谦. 高性能混凝土. 陕西科学出版社, 1998
- [0-3] 赵国藩, 张德娟, 黄承逵. 钢管混凝土增强高强混凝土柱的抗震性能研究. 大连理工大学学报, 1996: (6): 759~766
- [0-4] 陈本沛. 混凝土结构理论和应用研究的现状与发展. 大连: 大连理工大学出版社, 1994
- [0-5] 赵国藩, 黄承逵主编. 纤维混凝土的研究与应用. 大连: 大连理工大学出版社, 1992
- [0-6] 王忠诚, 刘汉中. 搞好交通工程建设为主体工程施工服务. 中国三峡建设, 1996: (9): 5~7
- [0-7] 陈福厚. 三峡工程对外交通专用公路的施工技术. 中国三峡建设, 1996: (9): 8~11
- [0-8] 姜福田. 碾压混凝土. 北京: 中国铁道出版社, 1991
- [0-9] 蔡绍怀. 钢管混凝土结构的计算与应用. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989
- [0-10] 钟善桐. 钢管混凝土结构. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1994
- [0-11] 徐德新等. 蜂窝形组合梁在徐州彭城电厂中的应用. 哈尔滨建筑大学学报, 1995: (5): 212~216
- [0-12] 竺存宏, 李广远. 预弯复合梁的设计与施工. 北京: 人民交通出版社, 1993
- [0-13] 杜拱辰. 部分预应力混凝土. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990