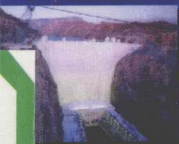
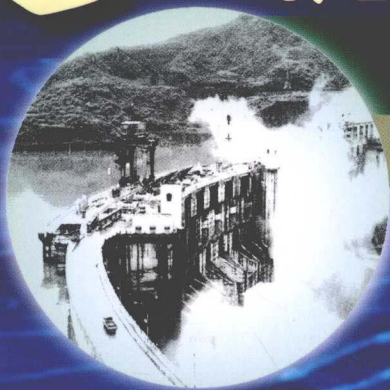


# 水工混凝土结构

(第二版)

卢亦焱 李传才 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校水利类教材

# 水工混凝土结构

(第二版)

■ 卢亦焱 李传才 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

水工混凝土结构/卢亦焱,李传才编著. —2版. —武汉:武汉大学出版社,  
2011.3

高等学校水利类教材

ISBN 978-7-307-08472-8

I. 水… II. ①卢… ②李… III. 水工结构:混凝土结构—高等学校—  
教材 IV. TV331

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第005459号

责任编辑:李汉保

责任校对:黄添生

版式设计:支 笛

---

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:湖北金海印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:32.5 字数:785千字

版次:2001年10月第1版 2011年3月第2版

2011年3月第2版第1次印刷

ISBN 978-7-307-08472-8/TV·13

定价:44.00元

---

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

## 内 容 简 介

本书是按照国家教育部高等学校水利学科专业规范核心课程《水工钢筋混凝土结构》教学大纲和水利水电工程最新的国家标准和规范编写的教材。主要内容有:混凝土结构材料的力学性能,混凝土结构的计算原则,各种混凝土受力构件的承载力计算及变形和裂缝控制验算,预应力混凝土结构的计算,梁板结构、水电站厂房刚架结构、水工非杆件结构的设计,水利系统《水工混凝土结构设计规范》(SL191—2008)简介。全书共14章,各章附有适量的例题、习题和思考题。编写内容在满足教学大纲要求的基础上,还尽量反映最新的科技成果和进展。

本书以讲述混凝土结构基本理论和水工混凝土结构设计方法为主,具体内容按水利水电工程《水工混凝土结构设计规范》(DL/T5057—2009)和《水工混凝土结构设计规范》(SL191—2008)中的规定编写。

本书主要作为高等学校水利学科各专业本科学生的教材,也可以作为从事水利水电工程设计、施工和科研工作的工程技术人员以及大学教师的参考书。

## 再版前言

本书第一版于2001年10月由武汉大学出版社出版。第一版是依据当时国家教育部高等学校水利水电类专业教学指导委员会建筑材料和建筑结构教学组《水工钢筋混凝土结构》课程教学大纲和当时正在实行的水利和电力行业标准《水工混凝土结构设计规范》(DL/T5057—1996)和《水工混凝土结构设计规范》(SL191—1996)编写的水利水电工程类本科生的必修课教材。出版后受到广大读者的欢迎。最近,新的水利和电力行业标准《水工混凝土结构设计规范》(DL/T5057—2009)和《水工混凝土结构设计规范》(SL191—2008)已颁布实行。为了更好地反映水工混凝土结构学科的科研和教学的新成果、新进展,并适应设计规范变更的新情况,使新培养的学生能直接地按新规范的规定从事水利水电工程的设计、施工和管理工作,我们在第一版的基础上编写了本书第二版。

本书是按照国家教育部高等学校水利学科专业规范核心课程“水工钢筋混凝土结构”教学大纲和水利水电工程最新的国家标准和规范编写的。主要内容有:混凝土结构材料的力学性能,混凝土结构的计算原则,各种混凝土受力构件的承载力计算及变形和裂缝控制验算,预应力混凝土结构的计算,梁板结构、水电站厂房刚架结构和水工非杆件结构的设计,水利系统《水工混凝土结构设计规范》(SL191—2008)简介。全书共14章。编写内容在满足相关教学大纲要求的基础上,还尽可能地反映近10年来水工混凝土结构学科的研究成果和最新进展。

我国水利水电行业管理体制的不同,用于水利水电工程的《水工混凝土结构设计规范》存在两个版本。上述1996年的两个版本《水工混凝土结构设计规范》(DL/T5057—1996)和《水工混凝土结构设计规范》(SL191—1996)是完全相同的,但现行的两个版本,即电力系统的《水工混凝土结构设计规范》(DL/T5057—2009)和水利系统的《水工混凝土结构设计规范》(SL191—2008)却不完全相同,主要是实用设计表达式以及由此衍生的一系列构件的设计计算公式的不同。前者在表达式中用了五个分项系数,后者则在表达式中采用了一个安全系数 $K$ 。尽管上述两个规范的设计表达式其本质是相同的,均是属于“以概率理论为基础的极限状态法”,但由于这种表达式的不同及其他一些局部的差异却给本核心课程教材的编写以及课堂的教学造成了很大的困难。为此,本教材的第1章~第13章全部按《水工混凝土结构设计规范》(DL/T5057—2009)编写,仅在第14章专门介绍《水工混凝土结构设计规范》(SL191—2008)的主要内容,并指出这两个规范的异同点。这样可以更方便地进行课堂教学。学生在走向工作岗位后,若要按《水工混凝土结构设计规范》(SL191—2008)从事工程设计,则只需参考第14章即可方便地理解该规范的内容,顺利地从事工程设计。

武汉大学土木建筑工程学院是《水工混凝土结构设计规范》(DL/T5057—1996)、《水工混凝土结构设计规范》(SL191—1996)、《水工混凝土结构设计规范》(DL/T5057—2009)和

《水工混凝土结构设计规范》(SL191—2008)的主要起草单位之一。参加本教材编写的侯建国、李传才、何英明、安旭文等学者是这些规范的主要起草人,也是多个规范专题研究项目的负责人。参加编写的所有人员均具有丰富的教学经验,这为本教材的编写创造了更为有利的条件。

本书第二版与第一版比较主要进行了如下修改:按《水工混凝土结构设计规范》(DL/T5057—2009)对第一版的内容进行了全面的修改;第一版中第3章轴心受力构件的内容分解后并入了第二版的第6章受压构件和第7章受拉构件;对第12章、第13章的内容进行了较大的删节,在第13章中增加了预应力闸墩的内容;新增了第14章《水工混凝土结构设计规范》(SL191—2008)的简介。

编写本书时,在一些基本概念和基础理论方面力求讲得透彻,通俗易懂;力求文字简练,深入浅出;并注意掌握以教学为主,少而精的原则,注意与其他课程的有机衔接;为了方便教学,本书各章还附有适量的例题、习题和思考题。

本书第一版由武汉大学土木建筑工程学院李传才主编,参加编写的有李传才、侯建国、何英明、卢亦焱、李大庆。编写分工为:绪论、第八章第五节、第十二章由李传才编写;第二章、第五章、第八章的第一~四节由侯建国编写;第一章、第三章由李大庆编写;第四章由李大庆、李传才编写;第六章、第七章由卢亦焱编写;第十章由卢亦焱、李传才编写;第九章、第十一章由何英明编写。侯建国对第三、四、十一、十二章进行了审校,何英明对第一、二、六、七、八、十章进行了审校。全书由李传才修改,统稿。

本书由卢亦焱、李传才主编,参加编写的有卢亦焱、李传才、侯建国、何英明、李大庆、安旭文、李杉。具体的编写分工为:内容简介、前言、第13章由李传才编写(其中第13章中的§13.4由武汉市城市建设投资开发集团有限公司的陈跃庆和李传才编写,大型弧形闸门设计实例由长江水利委员会设计院的万学军编写);第1章绪论由卢亦焱、李传才编写;第2章、第4章由李大庆编写;第3章、第9章由侯建国编写;第5章、第14章由安旭文编写;第6章、第8章由卢亦焱编写;第7章由李杉编写;第11章由卢亦焱、李杉编写;第10章、第12章由何英明编写;全书由卢亦焱、李传才修改和统稿。

本书在编写过程中,得到了武汉大学出版社的大力支持,编写中参考并引用了许多作者的文献。在此表示感谢!

武汉大学土木建筑工程学院彭公予、俞富耕、贺采旭、钱国梁、何少溪、许维华、陈澄清等前辈及其他同行,他们长期从事“水工钢筋混凝土结构”课程建设与教学,积累了丰富的教学经验,为本书的编写提供了许多宝贵的源泉和财富。借此机会向他们表示深深的敬意和感谢!

对于书中存在的缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

作者

2010年12月



# 目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 混凝土结构的基本概念	1
§ 1.2 混凝土结构的主要优点和缺点	2
§ 1.3 混凝土结构的应用和发展概况	4
§ 1.4 混凝土结构设计规范的发展	8
§ 1.5 水工混凝土结构课程的性质、内容、特点及学习方法	9
第 2 章 混凝土结构材料的力学性能	11
§ 2.1 钢筋品种及力学性能	11
§ 2.2 混凝土的力学性能	17
§ 2.3 钢筋与混凝土的粘结性能	33
思考题与计算题 2	37
第 3 章 混凝土结构的基本设计原则	39
§ 3.1 混凝土结构设计理论的发展和结构可靠度的有关概念	39
§ 3.2 荷载的代表值与荷载分项系数	47
§ 3.3 材料强度设计指标的取值	52
§ 3.4 概率极限状态设计法分项系数设计表达式	56
思考题与计算题 3	62
第 4 章 受弯构件正截面承载力计算	64
§ 4.1 受弯构件正截面受力的全过程及破坏特征	65
§ 4.2 正截面受弯承载力的计算假定和破坏界限条件	70
§ 4.3 单筋矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算	72
§ 4.4 双筋矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算	82
§ 4.5 T 形截面受弯构件正截面受弯承载力计算	91
§ 4.6 受弯构件的构造要求	101
§ 4.7 受弯构件的截面延性	104
思考题与计算题 4	107
第 5 章 受弯构件斜截面承载力计算	113
§ 5.1 斜截面的破坏形态与受剪机理	113

§ 5.2	影响斜截面受剪承载力的主要因素 .....	118
§ 5.3	斜截面受剪承载力计算 .....	121
§ 5.4	斜截面受弯承载力 .....	134
§ 5.5	受弯构件的配筋构造要求 .....	143
思考题与计算题 5 .....		152
<b>第 6 章 受压构件承载力计算</b> .....		
§ 6.1	轴心受压构件的承载力计算 .....	156
§ 6.2	螺旋式箍筋轴心受压柱的承载力计算 .....	166
§ 6.3	偏心受压构件正截面破坏特征 .....	168
§ 6.4	偏心受压构件的纵向弯曲 .....	171
§ 6.5	偏心受压构件正截面承载力计算 .....	174
§ 6.6	双向偏心受压构件正截面承载力计算 .....	190
§ 6.7	偏心受压构件斜截面承载力计算 .....	192
思考题与计算题 6 .....		194
<b>第 7 章 受拉构件承载力计算</b> .....		
§ 7.1	轴心受拉构件的承载力计算 .....	196
§ 7.2	偏心受拉构件正截面承载力计算 .....	198
§ 7.3	偏心受拉构件斜截面承载力计算 .....	202
思考题与计算题 7 .....		203
<b>第 8 章 受扭构件承载力计算</b> .....		
§ 8.1	概述 .....	205
§ 8.2	纯扭构件的开裂扭矩及承载力计算 .....	206
§ 8.3	弯剪扭构件承载力计算 .....	215
§ 8.4	受扭箍筋和纵筋的构造要求 .....	224
思考题与计算题 8 .....		225
<b>第 9 章 钢筋混凝土结构正常使用极限状态的验算</b> .....		
§ 9.1	概述 .....	226
§ 9.2	水工混凝土结构耐久性的设计规定 .....	228
§ 9.3	受弯构件变形验算 .....	232
§ 9.4	钢筋混凝土构件抗裂验算 .....	240
§ 9.5	钢筋混凝土构件裂缝开展宽度的验算 .....	246
思考题与计算题 9 .....		261
<b>第 10 章 预应力混凝土构件计算</b> .....		
§ 10.1	概述 .....	264
§ 10.2	预应力施工方法和预应力混凝土的材料 .....	267



§ 10.3 张拉控制应力和预应力损失	273
§ 10.4 预应力混凝土轴心受拉构件的计算	280
§ 10.5 预应力混凝土受弯构件计算	295
§ 10.6 预应力混凝土构件的构造要求	319
§ 10.7 部分预应力混凝土及无粘结预应力混凝土的概念	322
思考题与计算题 10	326
<b>第 11 章 钢筋混凝土梁板结构</b>	<b>329</b>
§ 11.1 概述	329
§ 11.2 单向板梁板结构按弹性方法的计算	332
§ 11.3 单向板梁板结构按塑性方法的计算	340
§ 11.4 单向板梁板结构的截面设计和构造要求	346
§ 11.5 双向板梁板结构的设计	351
§ 11.6 钢筋混凝土梁板结构设计实例	356
思考题与计算题 11	370
<b>第 12 章 水电站厂房及刚架结构</b>	<b>372</b>
§ 12.1 水电站厂房结构布置	372
§ 12.2 水电站厂房楼板的计算与构造	375
§ 12.3 水电站厂房刚架结构的计算与构造	380
§ 12.4 立柱独立牛腿的计算与构造	393
§ 12.5 柱下独立基础	398
思考题与计算题 12	406
<b>第 13 章 水工非杆件结构</b>	<b>408</b>
§ 13.1 水工非杆件结构的设计原则	408
§ 13.2 深受弯构件的计算	413
§ 13.3 混凝土坝内廊道及孔口结构	418
§ 13.4 蜗壳和尾水管结构	423
§ 13.5 水工弧形闸门支承结构	430
§ 13.6 钢筋混凝土有限元法在水工非杆件结构中的应用	443
<b>第 14 章 《水工混凝土结构设计规范》(SL 191—2008)简介</b>	<b>452</b>
§ 14.1 规范 SL 191—2008 的基本设计规定	452
§ 14.2 钢筋混凝土材料的力学性能	456
§ 14.3 受弯构件正截面承载力计算	458
§ 14.4 受弯构件斜截面承载力计算	463
§ 14.5 受压构件承载力计算	465
§ 14.6 受拉构件承载力计算	469

§ 14.7 受扭构件承载力计算·····	472
§ 14.8 钢筋混凝土结构正常使用极限状态的验算·····	474
附录 1 材料的强度和弹性模量·····	477
附录 2 钢筋的计算截面面积及理论质量·····	481
附录 3 一般构造规定·····	484
附录 4 正常使用验算的有关限值·····	486
附录 5 等跨等截面连续梁在常用荷载作用下的内力系数表·····	489
附录 6 双向板的内力和挠度系数表·····	499
参考文献·····	504

# 第1章 绪 论

## § 1.1 混凝土结构的基本概念

混凝土结构是土木建筑工程中按材料来区分的一种结构,其材料组成是混凝土和钢筋等增强材料,混凝土结构主要包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。事实上,混凝土结构的范围还可以更广泛一些。19世纪中叶以后,人们开始在素混凝土中配置抗拉强度高的钢筋来获得加强效果。如果用“加强”的概念来定义“钢筋混凝土结构”(reinforced concrete structure),则钢纤维混凝土结构、钢管混凝土结构、钢—混凝土组合结构、钢骨混凝土结构、纤维增强聚合物混凝土结构等,均可以属于钢筋混凝土结构的范畴。

在现代土木建筑工程结构中,混凝土结构比比皆是。但是,对混凝土结构的认识不能仅停留在“混凝土结构是由水泥、砂、石和水组成的人工石”,也不能只停留在“混凝土中埋置了钢筋就成了钢筋混凝土结构”的简单概念上,而应从本质上即力学概念上去认识、了解混凝土结构的基本工作原理。

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种物理力学性能不相同的材料所组成。混凝土的抗压强度高、抗拉强度低,其抗拉强度仅为抗压强度的 $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{8}$ ,混凝土是一种非均质、非弹性、非线性的建筑材料。同时,混凝土破坏时具有明显的脆性性质,破坏前没有征兆。因此,素混凝土结构通常用于以受压为主的基础、柱墩和一些非承重结构。与混凝土材料相比较,钢筋的抗拉强度和抗压强度均较高,破坏时具有较好的延性。为了提高构件的承载力和使用范围,将钢筋和混凝土按照合理的方式结合在一起协同工作,使钢筋主要承受拉力,混凝土承受压力,充分发挥两种材料各自的特长,则可以大大提高结构的承载能力,改善结构的受力特性。

如图 1-1(a) 所示的简支素混凝土梁,在跨中集中荷载  $P_1$  作用下,当梁跨中截面受拉边缘产生的拉应力达到混凝土的抗拉极限强度时,混凝土产生裂缝并很快贯通截面致使混凝土梁破坏。因此混凝土梁的开裂荷载  $P_1$  即为其破坏荷载。这种素混凝土梁的承载力很低,而且梁跨中截面受压边缘的压应力还远未达到混凝土抗压强度,破坏时呈脆性断裂,无明显征兆。图 1-1(b) 为一根截面尺寸、跨度、混凝土材料与图 1-1(a) 完全相同的钢筋混凝土梁,但在梁受拉区配置了适量的钢筋。尽管当荷载约达到  $P_1$  时,梁的受拉区仍会开裂,但开裂后原由混凝土承担的拉力转而是由钢筋承担,荷载仍可以继续增加。直到钢筋达到受拉屈服,继而梁跨中截面受压边缘的压应力也达到混凝土抗压强度时,钢筋混凝土梁才破坏,破坏荷载为  $P_2$ 。相关试验证明,钢筋混凝土梁的承载力比素混凝土梁的承载力显著提高。钢筋混凝土梁中混凝土的抗压强度和钢筋的抗拉强度均可得到充分发挥;其承载力可以提高数倍,甚至十多倍,并且破坏具有明显的征兆。

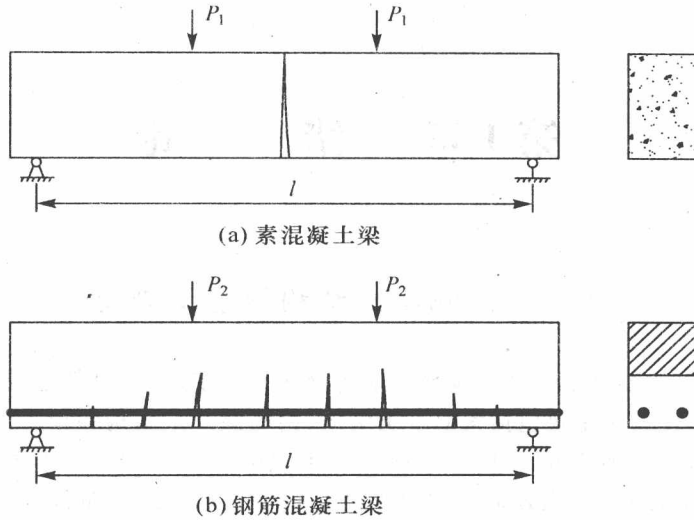


图 1-1 钢筋混凝土梁的工作原理

不了解钢筋混凝土工作原理的非专业人员,常常以为埋置了钢筋的梁,就一定能提高其承载力,其实不然。试想,如果把钢筋埋在梁上方受压区,则梁的承载力几乎不能提高,仍发生如同素混凝土梁那样的“一裂即穿”的脆性破坏,钢筋则白白浪费。

除了钢筋的布置位置要正确外,承载力得以提高的另一重要条件是钢筋和混凝土之间必须保证共同工作。由于钢筋和混凝土之间的良好粘结,使两者有机地结合为整体,而且这种整体还不致由于温度变化而破坏(钢筋和混凝土的线膨胀系数相近,钢材为  $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,混凝土为  $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),同时钢筋周围有足够的混凝土包裹,使钢筋不易生锈,从而保证粘结力的耐久性,所以两者的共同工作是可以得到保证的。

由上述可知,正确理解钢筋混凝土结构的工作原理,主要有以下几点:

- (1) 钢筋混凝土由混凝土和钢筋两种材料组成,这两种材料的力学特性是不相同的;
- (2) 两种材料必须各在其所,才能各司其职,各显其能。即钢筋主要置于构件的受拉区,混凝土则承受压力,从而充分发挥各自的力学特性,提高构件的承载能力;
- (3) 必须保证两种材料的共同工作。

理解了这种工作原理,也就不难理解钢筋混凝土的英文名称“reinforced concrete”(缩写为 RC)的科学性,并且也就不难理解为什么前面提及的各种混凝土乃至 20 世纪 50 年代我国曾使用过的竹筋混凝土结构均可以归属于“钢筋混凝土结构”的范畴,均可以广义地称为“钢筋混凝土结构”。

## § 1.2 混凝土结构的主要优点和缺点

### 1.2.1 混凝土结构的优点

- (1) 易于就地取材。混凝土结构中用量最多的砂、石材料均可以就地取材。我国水泥的

产地分布很广,水利水电工程均建于江河湖畔,更容易就地取材。还可以有效利用工业废料诸如矿渣、粉煤灰等制成人工骨料或者水泥的外加掺料。

(2) 材料利用合理。钢筋的抗拉强度和混凝土的抗压强度可以得到充分发挥,结构承载力与其刚度比例合适,基本不存在局部稳定问题。

(3) 整体性好。水工混凝土结构绝大多数为现浇结构,现浇混凝土结构具有良好的整体性,有利于防震、防水、防冲击、防爆炸。通过合适的配筋,还可以获得较好的延性。现浇混凝土结构刚度大,阻尼大,有利于结构的变形控制。

(4) 可模性好。混凝土可以按设计要求浇筑成各种不同尺寸和形状的结构,能适用于各种复杂的结构,可以满足现代建筑师提出的各种建筑形体要求,如拱、曲面、塔体和薄壳等。也可以满足水利水电工程中一些形体复杂的结构,如水电站厂房中的蜗壳、尾水管结构,船闸闸首、输水管道的进口等结构。

(5) 耐久性好。混凝土材料在一般环境下具有很好的耐久性,且混凝土的强度随着时间的增长还有所提高。当钢筋外的混凝土保护层厚度选择合理时,混凝土一般能保护钢筋,使钢筋不易发生锈蚀,所以在一般环境下,混凝土结构具有较好的耐久性。对于沿海及近海等侵蚀环境下的钢筋混凝土结构,通过合理的设计和采用一些特殊的防护措施,也可以满足工程需要。

(6) 耐火性好。混凝土属非可燃性材料,且热传导性差,钢筋又埋在混凝土内部,在火灾发生时钢材不至于短时间内软化而导致结构整体破坏。因此,混凝土结构比木结构以及钢结构的耐火性要好。

### 1.2.2 混凝土结构的缺点

(1) 自重大。在同样承载力的条件下,混凝土结构所需要的材料自重比钢结构大,使截面抗力要花费相当大的部分用于抵抗其自身的重量,这给建造大跨度结构和超高层结构造成了困难。

(2) 抗裂性差。普通钢筋混凝土结构在正常使用的情况下往往出现裂缝。这一缺点对水工混凝土结构尤为不利。裂缝的存在降低了混凝土抗渗、抗冻的能力。当水和有害气体侵入后又会引起钢筋生锈,影响结构构件的正常使用和耐久性。一些水工混凝土结构的裂缝还会引起水的渗漏,影响正常使用。民用建筑和公共建筑的裂缝还会造成使用者心理上的不安全感。

(3) 承载力有限。与钢材相比较,普通混凝土抗压强度较低,因此,普通钢筋混凝土结构的承载力有限,用做承重结构和高层建筑底部结构时,不可避免地会导致构件尺寸过大,减小有效使用空间。因此对于一些超高层的结构,采用混凝土结构有其局限性,而更多地选择钢结构。

(4) 施工复杂。混凝土结构施工需经过制模、立模、搅拌、浇筑、振捣、养护、凝固等多个工序,施工工期较长,施工技术复杂,施工要求严格。一旦出现质量事故,结构即拆除报废,不像钢结构和砌体结构,部分材料尚可重复利用。混凝土结构的施工还受气候和环境条件的限制。大型水利水电工程还要求较大的砂、石料场和混凝土搅拌场。水工大体积混凝土构件还要有温控措施,否则会因温度应力大而引起质量事故。即使是装配式结构,预制构件在现场装配时也非易事,需填缝、找平,接头构造也较复杂并浇二期混凝土。预应力混凝土结构的设

计和施工则更为复杂,要求具有更高水平的专门施工队伍。

### 1.2.3 辩证地对待混凝土结构的优缺点

对混凝土结构的优点和缺点应辩证地对待。在水利水电工程建设中,混凝土重力大就成了重力坝的优点。混凝土耐久性好也仅是相对的,混凝土结构如同人的生命一样,也有衰老的过程。20世纪70年代,英国、美国等一些发达国家发现,20世纪50年代以后修建的混凝土基础建设,尤其是桥面板这类工作环境较为恶劣的结构,过早出现了病害、开裂,甚至严重损坏。我国在20世纪70年代后修建的大量混凝土结构工程,尤其是中小型的水利工程、桥梁工程等,也有相当部分过早地发生了不同程度的病害、甚至严重损害。这使后来的修复、补强加固工作耗费了大量的人力和物力。

如前所述的混凝土结构的缺点,目前也随着结构工程技术的进步而逐步得到了克服和改善。例如,采用轻质高强混凝土可以减少结构的自重;采用预应力技术既可以减少截面尺寸,又能在一定程度上减少混凝土开裂问题,从而使混凝土结构也可以用于大跨度结构和高层高耸结构;纤维混凝土以及水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)可以提高抗裂性;商品混凝土、泵送混凝土、滑模施工以及各种混凝土添加剂等施工技术的推广应用,都使混凝土结构工程的施工质量和施工进度大大提高。因此上述提及的混凝土缺点也不是一成不变的。

结构工程的建造是选择混凝土结构,还是选择钢结构或其他结构,要按具体的条件来决定。在水利水电工程建设中,由于其工程结构的特殊功能要求,混凝土结构的应用最为广泛,但一些小型的挡水工程中也采用砌体结构。随着我国钢产量的增长以及钢材市场的变化,建设工程中钢结构的应用越来越广泛,特别是工业厂房(如火力发电厂)、超高层和高耸建筑物等常常选择钢结构。

## § 1.3 混凝土结构的应用和发展概况

自从混凝土材料诞生以来,其卓越的建筑性能使其迅速发展,成为有史以来应用最广、最成功的建筑材料,使得混凝土结构成为近现代最为基本的建筑结构。混凝土结构在土木工程中的应用主要有以下几个方面:

- (1) 建筑工程中的多层房屋、高层房屋、公共建筑、工业厂房、仓库,烟囱、筒仓、冷却塔、电视塔等特种结构;
- (2) 水利水电工程中的挡水建筑物、泄水建筑物、水电站厂房、输水隧洞、压力管道、调压塔、机墩、蜗壳、尾水管、船闸、水闸、渡槽、涵洞、挡土墙等;
- (3) 港口和海洋工程中的码头、船坞、采油平台等;
- (4) 市政工程中的水池、水塔、立交桥、高架桥、地铁等;
- (5) 交通工程中的公路、铁路、桥梁、隧道、车站等。

混凝土结构的发展,至今也不过170多年的历史,土木建筑工程最早应用的是木结构和砌体结构,后来出现钢结构,混凝土结构则是后起之秀。混凝土结构的产生最早可以追溯到19世纪20年代。1824年英国学者J. Aspdin发明了波特兰水泥,这是由于用波特兰水泥做成的人工石呈青灰色,与英国波特兰岛上的岩石相似而得名。根据其成分,我国现在通称为

硅酸盐水泥。水泥的出现使土木建筑工程技术的发展进入了一个新的时期。但钢筋混凝土结构是在水泥发明十多年后才形成的。1850年法国学者 J. L. Lambot 做出了第一只钢筋混凝土小船(这种配有钢筋网的水泥船 20 世纪 60~70 年代在我国南方水乡曾大量制造使用),4 年后英国学者 W. B. Wilkinson 做出了第一个钢筋混凝土楼板并取得了专利。1861 年,巴黎的花匠 J. Monier 做出了钢筋混凝土花盆,并于 1867 年获得专利。Monier 此后又制造了钢筋混凝土梁、板、管等混凝土构件,他的发明通常被称为“蒙氏系列”。在早期混凝土结构的发展中(1824—1920 年),欧洲对钢筋混凝土结构的研究较为活跃,但由于当时钢筋混凝土的施工和设计方法被视为商业机密,欧洲各国的研究者公开发表混凝土结构的研究成果却不多。从 1920 年至 1950 年,混凝土结构得到了快速的发展,混凝土结构设计理论也不断完善。为了克服钢筋混凝土结构在使用荷载下出现裂缝的缺点,1928 年法国学者 E. Freyssinet 发明了用高强钢丝作为预应力钢筋的预应力混凝土结构,发明了专用的锚具系统,并在桥梁和其他结构中得到应用,使预应力混凝土技术获得了实际意义的成功。预应力混凝土技术成功应用不仅克服了使用荷载下混凝土结构出现裂缝的缺点,而且拓宽了混凝土结构在大跨度方面的应用。20 世纪 40 年代中期以后,预应力混凝土技术得到了快速发展,1950 年成立了国际预应力混凝土协会,进一步促进了预应力混凝土技术的应用发展。我国预应力混凝土结构技术发展于 20 世纪 50 年代,最初在预应力混凝土轨枕中应用。目前,预应力混凝土结构已在建筑、桥梁、地下结构和特种结构中得到广泛应用。在水利水电工程中,大推力弧门闸墩、大型渡槽、大型船闸,近几十年越来越多的采用预应力混凝土结构。特别是大型水电站的弧门、闸墩,如长江葛洲坝、安康、水口以及世界上最大的长江三峡电站均采用预应力闸墩的结构形式,取得了极大的技术经济效果。

随着社会的发展,为了满足建设的需要,各国研究者和技术人员对混凝土材料性能、设计理论和施工技术等方面进行了大量的研究工作,并建造了大批高层建筑、大跨度桥梁和跨海隧道等工程,极大地推动了混凝土结构技术的进步。

### 1.3.1 混凝土结构材料的应用和发展

#### 1. 混凝土材料

混凝土材料的应用和发展主要表现在混凝土强度的不断提高、混凝土性能的不断改善、轻质混凝土和智能混凝土的应用等方面。

早期的混凝土强度比较低,到 20 世纪 60 年代,美国混凝土平均抗压强度约为 28MPa。随着高效减水剂的应用,混凝土的抗压强度大幅度提高。20 世纪 70 年代末,日本建筑工地可以配制抗压强度约为 80MPa 的高强混凝土。在 20 世纪 90 年代,美国、加拿大等国的建筑工地均能实现 60~100MPa 的高强混凝土。在实验室中可以配制更高强度等级的高强混凝土,混凝土抗压强度最高可以达到 300MPa。我国在 20 世纪 50 年代初所采用的混凝土抗压强度仅为 15~20MPa,随着我国经济的发展和科技的进步,混凝土抗压强度不断提高。在 20 世纪 90 年代初,我国在一些工程中也采用了强度在 60MPa 以上的高强度混凝土。目前,我国在结构工程中采用抗压强度为 60MPa 以上的高强混凝土已相当普遍。

为了改善混凝土抗拉性能差、延性差等缺点,提高混凝土抗裂、抗冲击、抗疲劳等性能,在混凝土中掺入纤维来改善混凝土性能的研究发展较为迅速。纤维的种类有钢纤维、合成纤维、玻璃纤维和碳纤维等。其中钢纤维混凝土的技术最为成熟,目前已应用于机场跑道、公路



路面、桥面等实际工程<sup>[1],[2]</sup>。美国、日本、欧洲和我国等国家和地区都相继编制了钢纤维混凝土结构设计规范和规程。近年来,水泥基复合材料(ECC)的成功研制极大地改善了混凝土材料的抗裂性能,水泥基复合材料的极限拉应变可以达到3%以上,在日本、美国等国家已初步应用于桥面板、大坝和渡槽等工程。

数十年来,由天然集料(浮石、凝灰石等)、工业废料(炉渣、粉煤灰等)、人造轻集料(粘土陶粒、膨胀珍珠岩等)制作成的轻质混凝土得到了广泛的应用和发展。轻质混凝土的容重小,国外轻质混凝土容重一般在 $14 \sim 18 \text{ kN/m}^3$ ,抗压强度一般为 $30 \sim 60 \text{ MPa}$ 。国内轻质混凝土容重一般在 $12 \sim 18 \text{ kN/m}^3$ ,抗压强度一般为 $20 \sim 40 \text{ MPa}$ 。轻质混凝土还具有优良的保温和抗冻性能。同时,天然集料和工业废料制作的轻质混凝土具有节约能源、减少堆积废料占用地以及保护环境等优点。在力学性能方面,由于轻质混凝土弹性模量低于同等级强度的普通混凝土,吸收能量快,能有效减小地震作用力。轻质混凝土已在许多实际工程中得到应用,如美国休士顿52层的贝壳广场大厦全部是由轻质混凝土建造。

混凝土智能材料也越来越受到各国学者的高度重视,在混凝土中添加智能修复材料和智能传感材料,可以使混凝土具有损伤修复、损伤愈合和损伤预警功能。具有损伤预警功能的智能混凝土已在实际工程中试用。再生骨料混凝土是解决城市改造拆除的建筑废料、减少环境污染、变废为宝的途径之一。将拆除建筑物的废料(主要是混凝土)加工成新混凝土的粗骨料或者细骨料,可以全部替代或者部分替代天然的砂石骨料。

另外,由于工程的需要,一些特殊性能的混凝土也不断应用于实际工程,如膨胀混凝土、自密实混凝土、聚合物混凝土、耐腐蚀混凝土和水中不分散混凝土等。

随着低碳经济发展战略的实施,对混凝土材料提出了更大的挑战。由于作为混凝土主要组成材料水泥的生产过程消耗了大量的能源和资源,这就迫切需要发展耐久性好、高节能、高环保的高性能混凝土。目前,高性能混凝土被认为是适应低碳经济发展战略的新材料和新技术。

## 2. 配筋材料

随着冶金科学技术的发展,钢筋的强度不断提高。我国目前用于普通混凝土结构的钢筋强度已达到 $500 \text{ MPa}$ ,预应力构件中采用的钢绞线强度达到 $1960 \text{ MPa}$ 。钢筋锈蚀是结构中最主要的一个病害,为了提高钢筋的防锈能力,带有环氧树脂涂层的钢筋和钢绞线已经用于沿海以及近海地区的一些混凝土结构工程中。

近年来,采用纤维增强聚合物(简称FRP)筋代替混凝土结构中的钢筋是一种新的思路。FRP筋是由纤维和聚合物复合而成,常用的FRP筋有碳纤维增强聚合物筋、玻璃纤维增强聚合物筋和芳纶纤维增强聚合物筋。FRP筋具有强度高、质量轻、耐腐蚀、抗疲劳性能高等优点;其缺点是不像钢筋那样具有屈服点,而且无延性,所以目前关于这方面的工程应用还比较少。美国及其他一些国家、地区已制定了FRP筋的设计规程,这对其推广应用具有重要的意义。我国学者目前也正开展FRP筋混凝土结构方面的研究,已经取得了一些重要的成果。

### 1.3.2 混凝土结构形式的发展

早期混凝土结构中的基本受力构件主要以钢筋混凝土结构构件(梁、板、柱和墙等)为主。随着预应力技术的发展,预应力混凝土结构逐步在桥梁、空间结构中得到广泛应用,并在

大跨度、高抗裂性能等方面显示出优越性。为了适应重载、延性等需要,钢—混凝土组合结构得到迅速的发展和应用。如钢板—混凝土组合结构用于地下结构、压型钢板—混凝土板用于楼板结构,型钢—混凝土组合梁用于桥梁结构,型钢—混凝土重载柱用于超高层建筑等。在钢管内填充混凝土形成的钢管混凝土结构,由于钢管能有效地约束核心受压混凝土的侧向变形,使得核心混凝土处于三向受压状态,从而提高混凝土的抗压强度、极限应变、承载力和延性等;同时钢管可以兼做模板,加快施工速度,节约建设成本。这些新型组合结构具有充分利用材料、延性好、施工简便等特点,极大地拓宽了钢筋混凝土结构的应用范围。

FRP 混凝土结构是近年来出现的一种新型组合结构,主要包括 FRP 管混凝土柱、FRP-混凝土组合桥面板等。由于 FRP 耐腐蚀、强度高等优点,使得这种结构在沿海及近海工程、桥梁结构中具有广阔的应用前景<sup>[3]</sup>。

### 1.3.3 混凝土结构理论的发展

混凝土结构理论是由试验研究、理论分析和工程应用三个方面相互关联、共同发展的结果。由试验揭示机理、发现规律,为理论分析提供依据;由理论分析解释试验现象,为工程应用建立设计方法;通过工程实践积累经验,修正理论方法、完善理论体系和设计方法,同时发现新的问题。所以,混凝土结构设计中的—些计算公式往往带有由试验所得的参数和直接由试验结果建立的经验公式,并有许多构造要求。

早期的混凝土构件的设计主要是古典的弹性理论及其允许应力法,这种方法采用比钢筋的屈服强度和混凝土的抗压强度的实测值低很多的应力作为允许应力,而截面的内力和应力按材料力学计算。这种设计理论与实际情况有很大出入,其安全可靠也无法准确揭示。

20 世纪 40 年代,前苏联提出了一种新的计算方法,即破坏阶段法。这一方法考虑了材料的塑性以及截面开裂后引起的应力重分布。截面破坏时的承载力由钢筋屈服强度的平均值和混凝土抗压强度的平均值来确定。荷载作用下的内力仍按材料力学和结构力学计算。结构的安全由单一的安全系数  $K$  来保证。 $K$  取值比较大,而且带有很大的经验性。

20 世纪 50 年代,前苏联还提出了按极限状态法设计。这一方法明确提出了极限状态的概念,认为达到极限状态时,结构即失去抵抗外力的能力,并失去正常使用的功能。截面的内力虽然按弹性理论计算,但荷载包含了统计分析的内容,材料强度通过统计分析取分位值。结构的可靠性由若干个计算系数来保证,而不是一个单一的安全系数。这一方法概念明确,考虑问题比较全面,理论上也比较完善,到 20 世纪 70 年代已被各国普遍采用。

极限状态法从 20 世纪 50 年代至今已走过了几个不同的发展阶段,开始时是多系数表达的极限状态法,后来有我国多系数分析单一安全系数表示的极限状态法。这些方法虽然在一部分荷载和材料强度的取值方面应用了概率理论,考虑了它们的变异性,但是设计表达式中的设计参数或安全系数都是主要由经验确定的,并看成不变的定值,结构的可靠性以安全系数来衡量,属于“定值设计法”。而对于可靠性的概率均未给出量值,这是当时的极限状态法的局限性。20 世纪 70 年代后,随着结构可靠度理论的发展,极限状态又进入了新的“近似概率法”阶段,这一方法以概率理论为基础,用失效概率或可靠概率来度量结构的可靠性,并把可靠概率(即可靠度)隐含在若干个分项系数之中,从而使计算理论更加完善。

近年来,混凝土结构耐久性设计引起了工程界的高度重视,各国学者开展了大量的研