

普通高等院校

精品课程规划教材
优质精品资源共享教材

浙江省省级精品课程

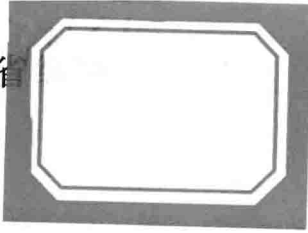
混凝土结构原理

HUNNINGTU JIEGOU YUANLI

金伟良 主编

中国建材工业出版社

浙江省省



混凝土结构原理

金伟良 主编

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构原理/金伟良主编. —北京: 中国建材
工业出版社, 2014. 7
ISBN 978-7-5160-0816-4

I. ①混… II. ①金… III. ①混凝土结构 IV.
①TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 092014 号

内 容 简 介

本教材根据全国高等学校建筑科学专业指导委员会审定的教学大纲要求编写, 该书课程为浙江省省级精品课程, 内容包括: 钢筋混凝土结构组成材料的力学性能, 结构设计的基本方法, 受弯、受剪、受压、受拉、受扭及组合受力构件的截面设计原理和基本构造要求, 裂缝和宽度验算方法, 以及预应力混凝土的基本原理。除了传统的教学内容, 教材中也加入了行业先进技术成果, 如与混凝土结构相结合的新材料、混凝土结构耐久性等方面的知识。

本书按照现行新的国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012) 等进行编写, 可供土木建筑工程类专业本科生使用, 也可作为相关专业的工程技术人员的参考资料。

本教材有配套课件, 读者可登陆网站 <http://jpkc.zju.edu.cn/k/192/wlkc/jxkj.html> 免费浏览。

混凝土结构原理

金伟良 主编

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 18.75

字 数: 464 千字

版 次: 2014 年 7 月第 1 版

印 次: 2014 年 7 月第 1 次

定 价: 52.80 元

本社网址: www.jcbs.com.cn 微信公众号: zgjcgycbs

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前 言

本教材根据全国高等学校土木工程专业指导委员会审定的教学大纲要求编写，内容包括：钢筋混凝土结构组成材料的力学性能，结构设计的基本方法，受弯、受剪、受压、受拉、受扭及组合受力构件的截面设计原理和基本构造要求，裂缝和宽度验算方法，以及预应力混凝土结构的基本原理。除了传统的教学内容，教材中也加入了土木工程行业先进技术成果，如与混凝土结构相结合的新材料、混凝土结构耐久性等方面的知识内容。

本书按照我国新颁布的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)、《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—2008)、《混凝土结构耐久性设计规范》(GB/T 50476—2008)等有关设计规范内容编写，同时，注重混凝土结构的基本概念、基本理论和基本方法的传授，有助于学生在走上工作岗位以后能够适应实际工程的设计、施工和管理的工作。本书也可作为工程技术人员的参考资料。

参加本书编写的人员有：金伟良、岳增国（第1~3章），陈驹（第4章），王海龙（第5~6章），段安（第7~8章），赵羽习（第9~11章），全书由金伟良教授主编，赵羽习教授主校。书中不妥与错误之处，恳请读者批评指正。

编者
2014年6月



中国建材工业出版社

China Building Materials Press

我们提供

图书出版、图书广告宣传、企业/个人定向出版、设计业务、企业内刊等外包、代选代购图书、团体用书、会议、培训，其他深度合作等优质高效服务。

编辑部

010-88386119

图书广告

010-68361706

出版咨询

010-68343948

图书销售

010-88386906

设计业务

010-68343948

邮箱：jccbs-zbs@163.com

网址：www.jccbs.com.cn

发展出版传媒 服务经济建设

传播科技进步 满足社会需求

(版权专有，盗版必究。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。举报电话：010-68343948)

目 录

第1章 绪论	1
1.1 混凝土结构的概念	1
1.2 混凝土结构的组成原理	1
1.3 混凝土结构的特点	2
1.4 混凝土结构的分类	3
1.5 混凝土结构的发展沿革	4
1.5.1 混凝土结构发展简况	4
1.5.2 混凝土结构的应用与发展	5
1.6 课程主要内容和主要目的	10
1.7 课程学习的注意事项	10
第2章 混凝土结构材料及其协同工作性能	12
2.1 混凝土的强度	12
2.1.1 混凝土的抗压强度	12
2.1.2 混凝土的抗拉强度	16
2.1.3 混凝土复合受力时的强度	17
2.2 混凝土的变形	19
2.2.1 混凝土在一次短期单轴加压时的变形性能	20
2.2.2 混凝土的变形模量	22
2.2.3 混凝土受拉时的变形性能	24
2.2.4 混凝土在单轴重复荷载作用下的变形性能（疲劳变形）	24
2.2.5 混凝土的徐变	25
2.2.6 混凝土的非受力变形	26
2.3 钢筋	27
2.3.1 钢筋的成分与种类	27
2.3.2 钢筋的力学性能	29
2.3.3 钢筋的冷加工	32
2.3.4 钢筋的疲劳	33
2.4 钢筋与混凝土的粘结	34
2.4.1 粘结的意义	34
2.4.2 两类粘结应力	35
2.4.3 粘结机理	37
2.4.4 粘结强度及其影响因素	37
2.4.5 粘结应力—滑移关系	38

2.5	钢筋的锚固	39
2.6	纤维复合材料	40
2.6.1	纤维的种类和特点	40
2.6.2	纤维增强复合材料 FRP	45
2.6.3	钢纤维混凝土	47
	习题	49
第3章	结构设计的基本方法	51
3.1	结构的功能要求和极限状态	51
3.1.1	设计基准期和设计使用年限	51
3.1.2	结构的功能要求	52
3.1.3	结构的极限状态	52
3.1.4	结构的功能函数和极限状态方程	54
3.2	结构上的作用、效应与结构抗力	54
3.2.1	结构上的作用及作用效应	54
3.2.2	荷载的分类	55
3.2.3	荷载的代表值	55
3.2.4	荷载分项系数和设计值	58
3.2.5	结构的抗力	59
3.3	结构可靠度的基本概念	63
3.3.1	结构的可靠度	63
3.3.2	失效概率和可靠指标	64
3.4	极限状态实用设计表达式	68
3.4.1	承载能力极限状态设计表达式	69
3.4.2	正常使用极限状态验算表达式	71
	习题	74
第4章	受弯构件的抗弯承载力计算	75
4.1	引言	75
4.2	混凝土梁在弯矩作用下的试验研究	75
4.3	基本假定	78
4.4	等效矩形应力图形	78
4.5	平衡截面	78
4.6	单筋截面梁的分析	79
4.6.1	设计公式	79
4.6.2	截面设计	80
4.6.3	极限弯矩 M_u 的计算	81
4.7	双筋截面梁的分析	81
4.7.1	设计公式	82
4.7.2	截面设计	83
4.7.3	双筋矩形截面的极限弯矩 M_u	84

4.8 T形截面和I形截面梁的分析	85
4.8.1 设计公式	86
4.8.2 T形截面的设计	87
4.8.3 T形截面的极限承载力	88
4.9 截面的构造要求	89
4.9.1 混凝土保护层厚度	89
4.9.2 纵筋	90
习题	90
第5章 受弯构件的抗剪承载力计算	91
5.1 梁沿斜截面受剪的破坏形态	91
5.1.1 匀质弹性体受剪的截面应力状态	91
5.1.2 剪跨比 λ	92
5.1.3 两类斜裂缝	93
5.1.4 三种破坏形态	94
5.2 斜裂缝出现后梁斜截面的受剪性能	95
5.2.1 开裂状态无腹筋梁的受剪性能	96
5.2.2 有腹筋梁腹筋的作用	97
5.2.3 简支梁斜截面受剪机理	97
5.3 影响斜截面受剪承载力的主要因素	98
5.3.1 剪跨比	98
5.3.2 箍筋配筋率与箍筋强度	99
5.3.3 混凝土强度	99
5.3.4 纵筋配筋率	100
5.3.5 加荷方式	100
5.4 受弯构件斜截面受剪承载力计算	101
5.4.1 斜截面受剪承载力的计算	101
5.4.2 受剪承载力计算公式的适用范围	106
5.4.3 斜截面受剪的截面设计与复核	107
5.5 保证斜截面受弯承载力的构造措施	112
5.5.1 抵抗弯矩图	112
5.5.2 保证斜截面受弯承载力的构造措施	115
5.6 梁中钢筋的构造要求	117
5.6.1 箍筋构造要求	117
5.6.2 弯起钢筋的构造要求	118
5.6.3 纵筋在支座处的锚固	119
5.7 偏心受力构件斜截面受剪承载力的计算	120
5.7.1 偏心受压构件斜截面受剪承载力的计算	120
5.7.2 偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算	122
习题	123

第 6 章 受扭构件的抗扭承载力计算	125
6.1 纯扭构件的受力性能	126
6.1.1 素混凝土纯扭构件的受力性能	126
6.1.2 混凝土纯扭构件的受力性能	126
6.2 纯扭构件的扭曲截面承载力	129
6.2.1 开裂荷载的计算	129
6.2.2 混凝土纯扭构件承载力的计算	131
6.2.3 《设计规范》采用的受扭承载力计算方法	133
6.2.4 T形和工字形截面纯扭构件承载力计算	137
6.2.5 箱形截面纯扭构件承载力计算	140
6.2.6 压(拉)扭构件	141
6.2.7 剪扭构件	141
6.2.8 弯扭构件	142
6.3 复合受扭构件扭曲承载力的计算	143
6.3.1 压(拉)扭构件	143
6.3.2 剪扭构件	143
6.3.3 弯扭构件	146
6.3.4 弯剪扭构件	147
6.3.5 压弯剪扭构件受扭承载力	148
6.3.6 拉弯剪扭构件受扭承载力	149
6.4 受扭构件截面设计	149
6.5 构造要求	154
6.5.1 受扭纵向钢筋	154
6.5.2 受扭箍筋	154
习题.....	155
第 7 章 受拉构件的抗拉承载力计算	156
7.1 轴心受拉构件的正截面承载力计算	156
7.1.1 轴心受拉构件受力特点	156
7.1.2 正截面受拉承载力计算	156
7.2 偏心受拉构件的正截面承载力计算	156
7.2.1 偏心受拉构件的分类	157
7.2.2 矩形截面偏心受拉构件正截面承载力计算	157
习题.....	161
第 8 章 受压构件的抗压承载力计算	162
8.1 轴心受压构件的正截面承载力计算	162
8.1.1 普通箍筋柱	163
8.1.2 螺旋箍筋柱	167
8.2 偏心受压构件的正截面承载力计算	171
8.2.1 偏心受压柱的破坏形态及其特征	171

8.2.2	偏心受压构件计算的基本原则	174
8.2.3	正截面受压承载力计算	177
8.3	受压构件的构造要求	196
	习题	198
第9章	混凝土构件适用性验算	200
9.1	变形的计算原理	200
9.1.1	变形控制的目的是要求	200
9.1.2	截面弯曲刚度的概念及定义	200
9.1.3	混凝土受弯构件的短期刚度 B_s	201
9.1.4	混凝土受弯构件刚度 B 的计算	207
9.1.5	受弯构件的挠度计算	208
9.2	裂缝宽度的计算原理	210
9.2.1	产生裂缝的原因及控制	210
9.2.2	裂缝控制等级	211
9.2.3	裂缝宽度的计算理论	213
9.2.4	混凝土构件的裂缝宽度验算	214
9.3	结构舒适度控制的要求	225
	习题	225
第10章	预应力混凝土构件设计原理	226
10.1	预应力混凝土结构的基本原理	226
10.1.1	预应力混凝土的基本概念	226
10.1.2	预加应力的方法	228
10.1.3	预应力混凝土分类	230
10.2	预应力混凝土材料及锚夹具	231
10.2.1	预应力混凝土材料	231
10.2.2	预应力结构的锚夹具	232
10.3	张拉控制应力和预应力损失	233
10.3.1	张拉控制应力 σ_{con}	233
10.3.2	预应力损失值 σ_l	234
10.4	预应力混凝土轴心受拉构件的计算	240
10.4.1	承载能力的计算	241
10.4.2	抗裂度计算	241
10.4.3	裂缝宽度的验算	242
10.4.4	施工阶段验算	242
10.5	预应力混凝土受弯构件	249
10.5.1	应力分析	249
10.5.2	正截面受弯承载力计算	250
10.5.3	使用阶段正截面抗裂度、裂缝宽度及变形验算	252
10.5.4	斜截面承载力计算	254

10.5.5	斜截面抗裂度验算	256
10.5.6	施工阶段的验算	256
10.6	预应力引起的等效荷载	261
10.6.1	曲线预应力筋的等效荷载	261
10.6.2	折线预应力筋的等效荷载	263
10.6.3	常用预应力筋线形及等效荷载	263
10.7	荷载平衡法	263
10.7.1	荷载平衡法的原理	263
10.7.2	荷载平衡法设计步骤	264
	习题	265
第11章	混凝土结构耐久性	266
11.1	混凝土材料耐久性	266
11.1.1	混凝土碳化	266
11.1.2	氯离子对混凝土结构的侵蚀	268
11.1.3	混凝土的冻害	269
11.1.4	混凝土的碱-集料反应	270
11.2	钢筋的锈蚀	271
11.2.1	钢筋锈蚀机理	271
11.2.2	钢筋腐蚀过程	272
11.2.3	锈蚀钢筋力学性能模型	272
11.3	混凝土结构构件耐久性	273
11.3.1	锈蚀钢筋与混凝土的粘结退化规律	273
11.3.2	锈蚀钢筋混凝土构件正截面抗弯承载力计算模型	274
11.3.3	锈蚀钢筋混凝土构件抗剪承载力计算模型	274
11.3.4	锈蚀钢筋混凝土构件抗压承载力计算模型	274
11.4	混凝土结构耐久性设计	275
11.4.1	基本规定	275
11.4.2	环境作用类别与作用等级	275
11.4.3	材料要求	276
11.4.4	其他要求	277
	附表	278
	参考文献	288

第 1 章 绪 论

1.1 混凝土结构的概念

将水泥基胶凝材料、集料（砂、砾石、碎石）和水按适当的比例拌合在一起，硬结后可获得坚固的材料，称为混凝土。以混凝土材料为主建成的结构称为混凝土结构（concrete structure），包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。素混凝土结构（pure concrete structure）指无配筋或不配置受力钢筋的混凝土建成的结构，由于该结构的抗弯、抗拉性能较差，所以在工程中很少使用；钢筋混凝土结构（reinforced concrete structure）指配置受力钢筋和混凝土共同组成的结构；预应力混凝土结构（pre-stressed concrete structure）指由受力的预应力钢筋通过张拉或其他方法对混凝土产生预加应力的混凝土结构。

混凝土结构可以由多种受力构件组合而成，主要的受力构件有楼板及屋面板、梁、柱、墙、基础等，其中，板、梁是水平受力构件，柱、墙是竖向受力构件。混凝土结构中的水平受力构件主要是将活荷载和恒载通过板、梁直接或间接传递到竖向支承结构（柱、墙），通常为受弯构件；而竖向受力构件主要是支承屋面和楼面体系，并向基础传递荷载，通常为受压构件；基础则是将上部结构的所有重量传递到地基（土层）的承重混凝土构件，其形式多样，有条形基础、独立基础、桩基础、筏板基础和箱形基础等。

1.2 混凝土结构的组成原理

混凝土结构通常是指由钢筋和混凝土两种材料组成共同受力的结构，而这两种材料的性能有着很大的不同，其中，混凝土是一种抗压能力较强而抗拉能力很弱的建筑材料，普通混凝土的抗拉强度约为抗压强度的 $1/17 \sim 1/8$ ，高强混凝土约为 $1/24 \sim 1/20$ ，而钢筋则具有较高的抗拉强度。

混凝土结构构件应该充分利用混凝土和钢筋两种材料的力学性能特点，将两者结合在一起形成整体，在各种荷载作用下，两者材料发挥各自的特长，使得混凝土主要承担压力，钢筋则主要承受拉力，利用钢筋具有较高的抗拉强度去弥补混凝土抗拉强度的不足。钢筋在混凝土中布置形式主要有两种：纵筋、箍筋。

在实际工程中，混凝土结构构件要承担荷载产生的弯矩、剪力、压力、拉力、扭矩等作用。从受力特性分析，可归纳为四种常用的基本构件：1) 受弯构件：截面内力以弯矩和剪力为主；2) 受压构件：截面内力以压力为主，或兼有弯矩及剪力作用；3) 受拉构件：截面内力以拉力为主，或兼有弯矩及剪力作用；4) 受扭构件：截面内力有扭矩作用，或兼有弯矩及剪力作用。

在荷载作用下，在大多数混凝土结构构件截面上不可避免地会产生拉应力，如果完全由

素混凝土承载，其承载能力将非常有限。在很小的弯矩作用下，素混凝土梁就会发生脆性断裂。为此，需要在素混凝土构件的受拉区域配置纵向钢筋，以提高构件的承载能力。

在受弯构件的受剪区，由于存在剪应力，截面上的主拉应力容易使构件产生斜裂缝而导致破坏，此时可以通过箍筋来提高构件的承载能力。箍筋不仅有提高构件抗剪承载能力的作用，还有约束混凝土提高混凝土变形性能的作用。

实际工程中，不仅要求结构构件有较高的承载能力，而且还要求构件在破坏前有明显的征兆，这就是结构设计时要同时考虑承载能力和变形能力两方面的问题。因而，凡在结构构件中可能出现拉应力的位置就都应配置钢筋，以防构件开裂，提高构件的承载力、适用性和耐久性。如果在混凝土梁受拉区域的边缘设置钢筋，在混凝土发生开裂后，梁就不会发生脆性断裂，钢筋可以继续承担受拉区的拉力，继续承担增加的荷载；而当荷载增加到使钢筋受拉发生屈服时，即使荷载没有继续增加，但梁仍可以继续变形。随着荷载的继续增加，受压区的混凝土的应力和变形会继续增大，梁会因为受压区边缘混凝土压碎而破坏。与素混凝土梁相比，钢筋混凝土梁破坏的荷载会大大增加，而破坏前构件有明显的裂缝和变形，呈现显著的失效征兆。这一类破坏形式属于延性破坏。

钢筋和混凝土这两种材料的物理性质不同，但能够结合在一起共同工作，其主要原因是：

(1) 混凝土与钢筋之间具有良好的粘结力，能够牢固地粘结成一个整体。在荷载作用下，两者能协调变形，共同受力，不会产生相对滑动。

(2) 钢筋和混凝土的温度线膨胀系数很接近，钢筋约为 1.2×10^{-5} ，混凝土大致在 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}$ ，故当温度变化时，两者间不会因产生较大的相对温度变形而破坏它们之间的粘结。

(3) 钢筋受到混凝土的保护不易生锈，具有很好的耐久性。

1.3 混凝土结构的特点

混凝土结构在建筑和土木工程中得到最为广泛的应用，主要有如下优点：

(1) 承载力高。混凝土结构合理地利用了钢筋和混凝土两种材料各自的特性，相互取长补短，发挥各自优势，使之结合在一起形成强度较高、刚度较大的结构。

(2) 耐久性好。在混凝土结构中，混凝土的强度随时间的增加而增长，抗风化能力强，且钢筋受混凝土的保护而不易锈蚀，其耐久性好。处于侵蚀性气体或受海水浸泡的混凝土结构，经过合理的设计及采取特殊的措施，一般也可以满足工程需求。

(3) 耐火性好。混凝土是热传导的钝体，导热性差。钢筋又受到混凝土包裹，受到保护，火灾时不致因钢筋很快达到软化温度而导致结构的整体破坏。

(4) 整体性好。混凝土结构，尤其是现浇结构具有很好的整体性，其抵抗地震、振动以及爆炸冲击波的性能都比较好。

(5) 就地取材。混凝土所用的原材料砂和石，一般均较易于就地取材。在工业废料（例如矿渣、粉煤灰等）比较多的地方，还可以将工业废料制成人造集料用于混凝土结构中，降低工程造价。

(6) 可模性好。混凝土可根据需要浇制成各种形状和尺寸的结构，便于建筑造型的实

现和建筑设备、工程开孔、留洞的需要，特别适宜建造外形复杂的大体积结构及空间薄壁结构。这一特点也是砖、石、钢、木等工程结构所不具有的。

虽然混凝土结构具有上述的优点，但在工程应用过程中尚存在一些缺点：

(1) 自重大。混凝土结构不适宜建造大跨度结构及超高层建筑结构。

(2) 抗裂性能差。由于混凝土抗拉强度较低，所以其构件在使用阶段往往会出现裂缝。

(3) 施工的季节性。在严寒地区冬季施工，混凝土浇筑后可能会被冻坏，此时应采用预制装配式结构，也可在混凝土中添加化学拌合剂来加速凝结、增加热量、防止冻结，还可以采用保温措施。在酷热地区或雨季施工，可采用防护措施，控制水灰比，加强保养，或采用预制装配式结构。

(4) 费工、费模板。现场施工工期长而建造的整体式钢筋混凝土结构比较费工；同时又需大量模板和支撑，且混凝土需要在模板内进行一段时间的养护。

另外，混凝土结构的隔热、隔声性能也不够理想。随着混凝土材料和结构的不断发展以及预应力结构的推广应用，这些缺点正在不断得到改进和克服。

一般来说，混凝土结构的优越性是主要的、明显的。钢筋与混凝土目前是我国建筑工程中应用最广泛的建筑材料，在房屋建筑、地下结构、水工、港口、海工、桥梁、道路和特种结构等工程中都得到了广泛的应用。

1.4 混凝土结构的分类

混凝土结构的分类标准有很多。一般可以按照结构所用材料、结构受力体系、结构功能、结构使用环境等进行分类。各种结构都有其一定的适用范围，应根据工程结构功能、材料性能、不同结构形式的特点和使用要求以及施工和环境条件等进行合理的选用。

按结构所用的材料分类，可分为素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构、纤维混凝土结构和其他形式的加筋混凝土结构。不同的结构材料，例如钢、混凝土、砌体等在同一结构体系中混合使用，就形成了混合结构，如屋盖和楼盖采用混凝土结构，墙体采用砌体，基础采用砖石砌体或钢筋混凝土，就形成了砖混结构。这些结构材料也可以在同一构件中混合使用，形成组合构件，如屋架上弦采用钢筋混凝土构件，下弦采用钢拉杆，就形成了钢-混凝土组合屋架，又如在钢筋混凝土柱中配置型钢则形成了钢-混凝土组合结构。

按照结构的受力体系分类，混凝土结构的类型主要有框架结构、剪力墙结构、筒体结构、塔式结构、桅式结构、悬索结构、悬吊结构、壳体结构、板柱结构、墙板结构、折板结构等。框架结构的主要竖向受力体系是由梁和柱组成；剪力墙结构的主要竖向受力体系则是由钢筋混凝土墙组成；筒体结构是在高层建筑中，利用电梯井、楼梯间或管道井等四周封闭的墙形成的内筒，也可以利用外墙或密排的柱作为外筒，或两者共同作用形成筒中筒结构，框架、剪力墙和筒体也可以组合形成框架剪力墙结构、框架筒体结构等结构体系。对不同受力体系的工程结构，采用何种结构材料十分重要，关键在于充分发挥材料的特性，既有好的功能，又有较好的经济效益。

按结构的使用功能分类，混凝土结构可分为建筑结构，如住宅、公共建筑、工业建筑等；特种结构，如烟囪、水池、水塔、筒仓、贮藏罐、挡土墙等；桥梁结构，如公路铁路桥、立交桥、人行天桥等；地下结构，如隧道、涵洞、人防工事、地下建筑等。

按结构的使用环境分类，可分为正常环境混凝土结构、海工混凝土结构、水工混凝土结构、腐蚀混凝土结构等。

1.5 混凝土结构的发展沿革

混凝土结构是指用配有钢筋增强的混凝土制成的结构。其诞生于 19 世纪中期，发展应用历史有 150 年左右。钢筋混凝土结构在土木工程中的应用范围极广，各种工程结构大多采用钢筋混凝土建造，包括房屋建筑工程、桥梁工程、特种结构与高耸结构、水利和其他工程。随着建造技术的发展，人们开始设计各种大规模的混凝土工程结构，对于这些结构的设计，要作精确的分析和计算。因此，理论力学、材料力学和结构力学等力学知识被用于混凝土结构的分析与设计。混凝土结构的分析理论和设计方法相结合，逐渐成为一个新的工程结构体系，即混凝土结构学。混凝土结构学主要研究在外荷载作用下的混凝土结构的响应（如结构的应力、应变和位移等的规律）和抵御外部作用的混凝土结构体系（如结构形式、配筋布置和裂缝控制等）。

1.5.1 混凝土结构发展简况

混凝土结构从 19 世纪中期开始采用，至今已有 150 多年，虽然与传统的砖、石结构相比历史很短，但因其诸多优势而迅速发展。混凝土结构的发展大致可分为以下几个阶段：

第一阶段（诞生期）：1824 年，阿斯普丁（J. Aspdin）发明了波特兰水泥；1850 年法国人郎波（Lambot）制作了第一艘钢筋混凝土小船；1854 年英国人威尔金森（W. B. Wilkinson）获得了一种钢筋混凝土楼板的发明专利权；1861 年，法国人蒙涅（J. Monier）利用水泥制作花盆，并在其中配置钢筋网以提高其强度，并于 1867 年获得了专利权，此后他又制作了钢筋混凝土板、管和拱等结构。至此，钢筋混凝土结构正式诞生。

第二阶段（萌芽期）：从混凝土结构出现至 19 世纪末 20 世纪初，仅 50 多年时间，由于工业发展，促使水泥、钢材的质量不断改进，混凝土结构应用范围逐渐扩大，出现了混凝土梁、板、柱、拱和基础一系列结构构件。1872 年，美国人沃德（W. E. Ward）在纽约建造了第一座钢筋混凝土房屋。1906 年特奈（C. A. P. Turner）发明了无梁楼板。此阶段混凝土和钢筋的强度都较低，混凝土结构计算理论尚未建立，设计计算采用容许应力法进行。

第三阶段（成长期）：从 20 世纪初至 20 世纪 50 年代，混凝土结构进入快速发展时期，在生产、理论、试验、施工等诸多方面都取得了长足的进步，混凝土结构的应用更加广泛，出现了新的结构类型。1925 年，德国用钢筋混凝土建造了薄壳结构。1928 年法国工程师弗列西涅利用高强钢丝和混凝土制成了预应力混凝土构件，开创了预应力混凝土的应用时代。在此阶段，混凝土结构的设计理论及标准也有了很大突破：1938 年前苏联学者提出了破损阶段设计理论，结构设计以构件最终破坏时的截面承载力为依据，制定了混凝土结构的设计标准及技术规范。

第四阶段（成熟期）：从 20 世纪 50 年代至今，混凝土结构有了更快的发展。在设计理论、生产、施工技术等方面逐步完善。前苏联学者又在破损阶段设计理论的基础上提出了更为合理的极限状态设计理论，并在荷载和材料强度中引入概率方法和统计分析，至 20 世纪 70 年代，极限设计理论已被很多国家采用。同时，随着材料的强度不断提高和混凝土的性

能不断改善，钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构的应用范围不断拓宽，并向大跨度和高层建筑等领域发展。

1.5.2 混凝土结构的应用与发展

混凝土结构材料、结构体系、计算理论和全寿命管理的研究进展推动了混凝土结构的不断发展与完善。下面将材料、结构体系、基本理论和全寿命管理这四方面作一个简要介绍。

1. 材料

混凝土结构在材料方面不断取得进展，主要是向着高强、高性能（耐久）、轻质、节能环保等方向发展。

首先，混凝土结构中使用的混凝土、钢筋的强度越来越高。目前，我国工程中应用的混凝土强度等级都有适当提高，C15 级的低强度混凝土仅限用于素混凝土结构，各种配筋混凝土结构的混凝土强度等级也普遍提高。常用的混凝土强度等级为 C20 ~ C40，预应力混凝土强度等级为 C40 ~ C60，应用的高强混凝土已达到 C100 级。我国混凝土结构中使用的普通钢筋与过去相比也有了提高，将 400MPa、500MPa 级高强热轧带肋钢筋作为纵向受力的主导钢筋，限制并逐步淘汰 335MPa 级热轧带肋钢筋的应用，提升钢筋的强度等级。增加了高强度、延性好、低松弛、粗直径和耐腐蚀的钢绞线和钢丝在我国预应力混凝土结构中的应用，淘汰了锚固性能很差的刻痕钢丝。

目前，我国建筑工程实际应用的混凝土强度等级和钢筋的强度等级均低于发达国家。我国结构安全度总体上还低于国际水平，但材料用量并不少，其原因在于国际上较高的安全度是依赖较高强度的材料实现的。目前，发达国家已大多采用强度为 40 ~ 60N/mm² 的混凝土，预应力结构中混凝土强度已达到 60 ~ 100N/mm²，目前已经研制出的高强混凝土已达 200N/mm²。

高性能混凝土是混凝土发展的另一个重要方向。我国目前正处在高速发展时期，已建和待建大型钢筋混凝土结构数量巨大，如大型水利枢纽工程、跨海跨江的大型桥梁、高等级公路、大中型飞机场等，这些都要求混凝土具有良好的耐久性，确保重点工程的安全性和持久性。高性能混凝土正是根据混凝土结构耐久性要求而设计的混凝土，其制作的主要技术途径是通过采用优质的化学外加剂和矿物外加剂，提高混凝土强度，显著改善和提高混凝土的施工性能、耐久性能和工作性能。高性能混凝土能更好地满足结构功能要求和施工工艺要求，能最大限度地延长混凝土结构的使用年限，降低工程造价。具体来说，高性能混凝土具有高强度、高耐久性、高流动性及高抗渗透性、良好的工作性能以及较高的体积稳定性等优点，是今后混凝土材料发展的重要方向。高性能混凝土因其优越性与效益，使其用途不断扩大，在许多工程中得到推广应用。例如，北京八达岭高速公路山羊洼 1 号大桥采用了免振捣高性能补偿收缩混凝土；长春市西郊污水治理厂工程采用抗冻性高性能混凝土；杭州湾跨海大桥采用了高性能海工混凝土，等等。高性能混凝土的应用解决了以前普通混凝土所不能克服的工程技术难点，提高了建筑的安全性和耐久性。进入 20 世纪 90 年代以后，高性能混凝土的研究开发与推广应用快速发展，世界各国均予以高度重视。高性能混凝土因其优异的综合性能必将逐步取代过去的普通混凝土，21 世纪将成为高性能混凝土的时代。

为改善混凝土结构自重大的缺点，世界各国已经大力研究发展了各种轻质混凝土（由胶结料、多孔粗集料、多孔或密实的细集料与水拌制而成），其干容重一般不大于 18kN/m³，

如陶粒混凝土、浮石混凝土、火山渣混凝土、膨胀矿渣混凝土等。轻质混凝土可在预制和现浇的建筑结构中采用，例如可制成预制大型壁板、屋面板、折板以及现浇的薄壳、大跨、高层结构，但在应用中应当考虑到其特殊性能（如弹性模量低、收缩、徐变大等）。国外轻质混凝土用于承重结构的强度等级为 C30 ~ C60，其容重一般为 $14 \sim 18 \text{ kN/m}^3$ 。国内常用的强度等级为 C20、C30，也可配制 C40 或更高的强度，其容重一般为 $12 \sim 18 \text{ kN/m}^3$ 。由轻质混凝土制成的结构在自重方面较普通混凝土可减少 20% ~ 30%，因而结构的地震作用也会减小，因此，在地震区采用轻质混凝土结构可有效地减小地震作用，节约材料和造价。

纤维混凝土使得混凝土的性质获得飞跃的发展，把混凝土的抗拉、抗压强度比从 1/10 提高到 1/2，并且具有早强、体积稳定（收缩、徐变小）的特点，目前使用该材料可以建造 600 ~ 900m 高的建筑，跨度达 500 ~ 600m 的桥梁，以及海上浮动城市、海底城市、地下城市等。

同时，环保节能已经成为全球的主题。在混凝土结构领域，人们已经开始关注混凝土结构的全寿命周期发展，利用混凝土建筑垃圾等回收加工成再生集料，可以制成绿色环保的再生集料混凝土。

2. 结构体系

混凝土结构最初仅在最简单的结构物如拱、板等中使用，但随着水泥和钢铁工业的发展，混凝土和钢材的质量不断改进、强度不断提高，为进一步扩大混凝土结构的应用范围创造了条件，发展并形成了许多类型的结构形式与体系，如框架结构、剪力墙结构、筒体结构、塔式结构、桅式结构、悬索结构、悬吊结构、壳体结构、板柱结构、墙板结构、折板结构等。特别是自 20 世纪 70 年代以来，很多国家已把高强度钢筋和高强度混凝土用于大跨、重型、高层结构中，在减轻自重、节约钢材上取得了良好的效果，出现了大批超高层、高耸、大跨度、大空间的钢筋混凝土建筑。

在超高层建筑方面，高度超过 100m 的钢筋混凝土超高层建筑已不计其数，21 世纪以来，亚洲与中国已逐渐成为世界超高层建筑最多的地区。至 2012 年，世界十大超高层建筑排名依次是：哈利法塔（迪拜，828m）、广州塔（中国，610m）、台北 101（中国，508m）、上海环球金融中心（中国，492m、101 层）、吉隆坡国家石油双塔（马来西亚，452m）、南京紫峰大厦（中国，450m）、芝加哥西尔斯大厦（美国，442m）、上海金茂大厦（中国，421m）、香港国际金融中心 2 期（中国，415m）、广州中信广场（中国，391m）。其中，9 座在亚洲，7 座在中国大陆及港台。目前中国在建的超高层建筑有：上海中心（约 632m）、深圳平安金融中心（约 668m）等。

上海中心（Shanghai tower）依靠 3 个相互连接的系统保持直立。第一个系统是 $27 \text{ m} \times 27 \text{ m}$ 的钢筋混凝土芯柱，提供垂直支撑力。第二个是钢材料“超级柱”构成的一个环，围绕钢筋混凝土芯柱，通过钢承力支架与之相连。这些钢柱负责支撑大楼，抵御侧力。最后一个系统是每 14 层采用一个 2 层高的带状桁架，环抱整座大楼。



图 1-1 哈利法塔