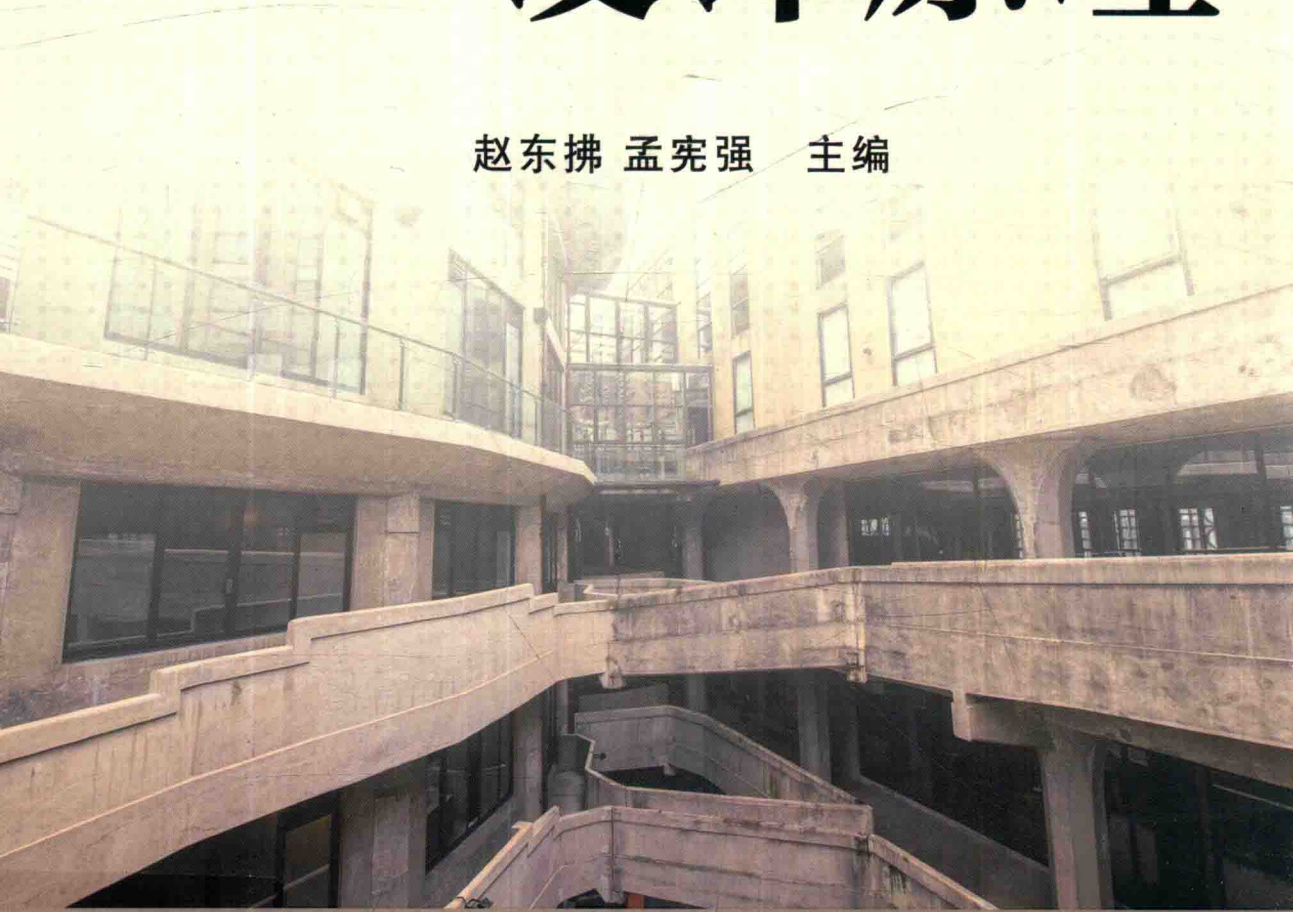


普通高等教育规划教材

混凝土结构—— 设计原理

赵东拂 孟宪强 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育规划教材

混凝土结构设计原理

主 编 赵东拂 孟宪强
副主编 王 萱 庞 平
参 编 庄 鹏



机械工业出版社

本书依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》、GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》、GB 50153—2008《工程结构可靠性设计统一标准》以及《高等学校土木工程本科指导性专业规范》编写，内容紧密围绕混凝土结构的形态、平衡与协调这三个方面，主要介绍基本理论和基本构件，精选例题、思考题与习题，以使本书能更好地适应当前“混凝土结构设计原理”课程教学发展的需要。

本书共 10 章，主要内容包括：绪论，混凝土结构材料的物理力学性能，混凝土结构设计方法，受弯构件正截面承载力，受弯构件斜截面承载力，受扭构件承载力，受压构件承载力，受拉构件承载力，钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性，预应力混凝土结构构件等。

本书可作为高等院校土木工程专业的专业基础课教材，也可供从事混凝土结构设计、施工与管理等从业人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构设计原理/赵东拂, 孟宪强主编. —北京: 机械工业出版社, 2015. 11

ISBN 978-7-111-51324-7

I. ①混… II. ①赵… ②孟… 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 (2015) 第 202796 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 林 辉 责任编辑: 林 辉 崔立秋

版式设计: 赵颖喆 责任校对: 樊钟英

封面设计: 马精明 责任印制: 乔 宇

保定市中华美凯印刷有限公司印刷

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13.25 印张 · 326 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-51324-7

定价: 30.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

前 言

“混凝土结构设计原理”是土木工程专业的主干专业基础课程之一，也是专业平台课。本书的编写旨在贯彻土木工程专业指导委员会制定的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》和培养“卓越工程师”的指导思想。“混凝土结构设计原理”课程不同于“结构力学”等先修课程，结构力学课程具有严谨的逻辑推导，也不同于《混凝土结构设计规范》的条文说明，该课程是学生由基础课的学习向专业课程学习过渡的一门必修课程。这导致已经习惯的基础课程学习方法并不完全适用于本课程，这也给许多初学者带来一定的困扰。结构工程有其自身的理论体系和基本规律，本书在培养学生创新意识和综合能力的同时，侧重引导学生从形态、平衡及协调三个基本要素及其辩证关系入手，学习和理解混凝土结构乃至结构工程学，以建立他们的工程概念，提高他们的工程实践能力，为后续专业课程的学习打下良好的理论基础。

本书依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》、GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》、GB 50153—2008《工程结构可靠性设计统一标准》等规范编写，展现了我国混凝土结构在土木工程领域的新成果。本书主要内容包括：绪论，混凝土结构材料的物理力学性能，混凝土结构设计方法，受弯构件正截面承载力，受弯构件斜截面承载力，受扭构件承载力，受压构件承载力，受拉构件承载力，钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性，预应力混凝土结构构件等。每章均配有来自工程实践的典型例题，并配有思考题与习题。本书既可供普通高等院校土木工程专业教学使用，也可供专业技术人员参考学习。

本书由赵东拂、孟宪强主编，王莹、庞平副主编，全书由赵东拂统稿。全书共分为 10 章。其中，第 1、3 章，第 2、4、5、6、7 章的思考题与习题，附录及符号说明由北京建筑大学赵东拂编写；第 2 章及第 8 章由北华大学孟宪强编写；第 4、5、6 章由北京建筑大学庄鹏编写；第 7 章及第 9 章由山东农业大学王莹编写；第 10 章由吉林建筑大学庞平编写。硕士研究生刘梅、张晓琳、高海静、孟颖、孙菲等协助完成本书的部分编辑和整理工作。

本书采用双色印刷以突显重要内容，希望能够对学生熟悉课本、认知知识起到引导作用，期望学生能够对概念做到“深刻理解”或“熟悉掌握”。

由于编者水平有限，疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评指正！

编 者

符号说明

1. 材料性能

E_c ——混凝土的弹性模量；

E_s ——钢筋的弹性模量；

f_{ck} 、 f_c ——混凝土轴心抗压强度标准值、设计值；

f_{tk} 、 f_t ——混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值；

f_{yk} 、 f_{pyk} ——普通钢筋、预应力筋屈服强度标准值；

f_{stk} 、 f_{ptk} ——普通钢筋、预应力筋极限强度标准值；

f_y 、 f'_y ——普通钢筋抗拉、抗压强度设计值；

f_{yv} ——横向钢筋的抗拉强度设计值；

f_{py} 、 f'_{py} ——预应力筋抗拉、抗压强度设计值；

δ_{gt} ——钢筋最大力下的总伸长率，或均匀伸长率；

C30——立方体抗压强度标准值为 30N/mm^2 的混凝土强度等级；

HRB500——强度等级为 500MPa 的普通热轧带肋钢筋；

HRBF400——强度等级为 400MPa 的细晶粒热轧带肋钢筋；

RRB400——强度等级为 400MPa 的余热处理带肋钢筋；

HPB300——强度等级为 300MPa 的热轧光圆钢筋；

HRB400E——强度等级为 400MPa 且有较高抗震性能与普通热轧带肋钢筋。

2. 作用和作用效应

N ——轴向力设计值；

N_k 、 N_q ——按荷载标准组合、准永久组合计算的轴向力值；

N_{u0} ——构件的截面轴心受压或轴心受拉承载力设计值；

N_{p0} ——预应力构件混凝土法向预应力等于零时的预加力；

M ——弯矩设计值；

M_k 、 M_q ——按荷载标准组合、准永久组合计算的弯矩值；

M_u ——构件的正截面受弯承载力设计值；

M_{cr} ——受弯构件的正截面开裂弯矩值；

T ——扭矩设计值；

V ——剪力设计值；

F_l ——局部荷载设计值或集中反力设计值；

σ_s 、 σ_p ——正截面承载力计算中纵向钢筋、预应力筋的应力；

σ_{pe} ——预应力筋的有效预应力；

σ_l 、 σ'_l ——受拉区、受压区预应力筋在相应阶段的预应力损失值；

τ ——混凝土的剪应力；

w_{max} ——按荷载准永久组合或标准组合，并考虑长期作用影响的计算最大裂缝宽度。

3. 几何参数

- b ——矩形截面宽度, T形、I形截面的腹板宽度;
 c ——混凝土保护层厚度;
 h ——截面高度;
 h_0 ——截面有效高度;
 d ——钢筋的公称直径(简称直径)或圆形截面的直径;
 d_e ——等效直径;
 l_0 ——计算跨度或计算长度;
 l_{ab} 、 l_a ——纵向受拉钢筋的基本锚固长度、锚固长度;
 s ——沿构件轴线方向上横向钢筋的间距、螺旋筋的间距或箍筋的间距;
 x ——混凝土受压区高度;
 A ——构件截面面积;
 $A_s(A_p)$ 、 $A'_s(A'_p)$ ——受拉区、受压区纵向普通钢筋(预应力筋)的截面面积;
 A_l ——混凝土局部受压面积;
 A_{cor} ——箍筋、螺旋筋或钢筋网所围成的混凝土核心截面面积;
 B ——受弯构件的截面刚度;
 I ——截面惯性矩;
 W ——截面受拉边缘的弹性抵抗矩;
 W_t ——截面受扭塑性抵抗矩。

4. 计算系数及其他

- α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值;
 γ ——混凝土构件的截面抵抗矩塑性影响系数;
 η_{ns} ——偏心受压构件考虑二阶效应影响的轴向力偏心距增大系数;
 C_m ——偏心距调节系数;
 λ ——计算截面的剪跨比, 即 $M/(Vh_0)$;
 ρ ——纵向受力钢筋的配筋率;
 ρ_v ——间接钢筋或箍筋的体积配筋率;
 ϕ ——表示钢筋直径的符号, $\phi 20$ 表示直径为 20mm 的钢筋。

目 录

前言	
符号说明	
第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土结构的一般概念	1
1.2 混凝土结构的发展	2
1.3 本课程的特点和学习方法	6
思考题与习题	11
第 2 章 混凝土结构材料的物理力学性能	12
2.1 钢筋	12
2.2 混凝土	17
2.3 钢筋与混凝土的相互作用——黏结	31
思考题与习题	36
第 3 章 混凝土结构设计方法	37
3.1 我国采用的混凝土结构设计方法	37
3.2 极限状态	37
3.3 结构的可靠度	38
3.4 极限状态设计表达式	40
思考题与习题	44
第 4 章 受弯构件正截面承载力	46
4.1 受弯构件的截面形式及计算内容	46
4.2 受弯构件基本构造要求	46
4.3 受弯构件正截面受力性能	49
4.4 受弯构件正截面承载力计算 基本规定	51
4.5 单筋矩形截面受弯构件正截面 承载力	55
4.6 双筋矩形截面受弯构件正截面 承载力	59
4.7 T 形截面受弯构件正截面承载力	63
思考题与习题	68
第 5 章 受弯构件斜截面承载力	70
5.1 概述	70
5.2 受弯构件受剪性能的试验研究	70
5.3 斜截面受剪机理及影响受剪承载力的 主要因素	73
5.4 斜截面受剪承载力计算公式及 适用范围	75
5.5 斜截面受剪承载力设计计算	77
思考题与习题	82
第 6 章 受扭构件承载力	84
6.1 概述	84
6.2 纯扭构件承载力计算	87
6.3 剪扭构件承载力计算	89
6.4 弯扭构件承载力计算	90
6.5 弯剪扭构件承载力计算	91
6.6 受扭构件的构造要求	92
思考题与习题	93
第 7 章 受压构件承载力	94
7.1 受压构件类型及一般构造要求	94
7.2 轴心受压构件承载力计算	97
7.3 偏心受压构件的受力性能分析	106
7.4 矩形截面偏心受压构件正截面承载力 计算的基本公式	111
7.5 不对称配筋矩形截面偏心受压构件 承载力计算方法	113
7.6 对称配筋矩形截面偏心受压构件 承载力计算方法	123
7.7 对称配筋 I 形截面偏心受压构件 承载力计算	127
7.8 双向偏心受压构件正截面承载力 计算	133
7.9 偏心受压构件斜截面受剪承载力 计算	136
思考题与习题	137
第 8 章 受拉构件承载力	139
8.1 轴心受拉构件	139
8.2 偏心受拉构件正截面承载力	140
8.3 偏心受拉构件斜截面受剪承载力	144
思考题与习题	144
第 9 章 钢筋混凝土构件的裂缝、变形和 耐久性	146
9.1 概述	146
9.2 裂缝宽度验算	148
9.3 受弯构件的挠度验算	156

9.4 混凝土结构的耐久性	163	应力分析	177
思考题与习题	166	10.6 预应力混凝土轴心受拉构件计算	184
第10章 预应力混凝土结构构件	168	10.7 预应力混凝土受弯构件各阶段应力 分析	191
10.1 概述	168	思考题与习题	197
10.2 预应力的施加方法	169	附录	198
10.3 预应力混凝土对材料的要求	171	参考文献	204
10.4 张拉控制应力与预应力损失	172		
10.5 预应力混凝土轴心受拉构件各阶段的			

第 1 章 绪 论

1.1 混凝土结构的一般概念

结构,广义上是指土木工程的建筑物、构筑物及其相关组成部分的实体,狭义上是指各种工程实体的承重骨架。混凝土结构是指以混凝土为主要建筑材料制成的结构,包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和各种其他形式的加筋混凝土结构等。素混凝土结构是指无筋或不配置受力钢筋的混凝土结构,常用于路面和一些非承重结构;钢筋混凝土结构是指配置受力普通钢筋、钢筋网或钢筋骨架的混凝土结构;预应力混凝土结构是指配置受力的预应力筋,通过张拉或其他方法建立预加应力的混凝土结构。

1.1.1 钢筋混凝土结构的一般概念

钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土组成的结构。混凝土抗压强度高,抗拉强度低(混凝土的抗拉强度一般仅为抗压强度的 1/10 左右)。钢筋的抗压和抗拉能力都很强。为了充分发挥材料的性能,将钢筋和混凝土两种材料结合在一起共同工作,使钢筋主要承受拉力,混凝土主要承受压力,则能使两种材料各尽其能,组成良好的结构构件。

1.1.2 钢筋与混凝土共同工作的原因

钢筋与混凝土是两种不同的材料,它们能有效地结合在一起共同工作,其主要原因有:

- 1) 混凝土和钢筋之间有良好的黏结性能,两者能可靠地结合在一起,共同受力,共同变形。
- 2) 混凝土和钢筋两种材料的温度线膨胀系数很接近,混凝土的线膨胀系数为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,钢筋的线膨胀系数为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,因此避免了温度变化产生较大的温度应力破坏二者之间的黏结力。
- 3) 混凝土包裹在钢筋的外部,使钢筋免于腐蚀或高温软化。

1.1.3 钢筋混凝土构件的分类

钢筋混凝土结构由一系列受力类型不同的构件组成。这些构件称为基本构件,主要包括:板、梁、柱、墙和基础等。基本构件按其受力特点的不同可以分为:

- 1) 受弯构件,如各种单独的梁、板以及由梁组成的楼盖、屋盖等。
- 2) 受压构件,如柱、剪力墙等。
- 3) 受拉构件,如屋架的拉杆、水池的池壁等。
- 4) 受扭构件,如带有悬挑雨篷的过梁、框架的边梁等。

1.1.4 预应力混凝土结构的一般概念

预应力混凝土结构是指结构在承受外荷载以前,预先采用人为的方法,在结构内部形成

一种应力状态,使结构在使用阶段产生拉应力的区域先受到压应力,这项压应力将抵消一部分或全部使用阶段荷载产生的拉应力,从而推迟裂缝的出现,限制裂缝的展开,提高结构的刚度。预应力混凝土结构的实质是采用预先加压的手段间接提高混凝土的抗拉强度,即极限拉应力,从本质上改善混凝土容易开裂的特性,这是工程结构设计的一个飞跃发展。

1.1.5 混凝土结构的优缺点

混凝土结构能在各种不同的工程中得以广泛应用,除了充分利用混凝土和钢筋的性能外,还具有下列优点:

1) 耐久性好。混凝土结构中混凝土的强度随着时间的增长而增长。在一般环境下,钢筋可以受到混凝土的保护不发生锈蚀;在恶劣环境中,经过合理的设计并采取特殊的构造措施,一般能满足工程需要。

2) 耐火性好。混凝土是不良导热体,当发生火灾时,由于有混凝土作为保护层,混凝土内的钢筋不会像钢结构的受力构件那样很快升温达到软化温度而丧失承载能力。混凝土结构的耐火性能优于钢木结构。

3) 可模性好。混凝土结构可以根据需要浇筑成各种形状和尺寸的构件,如空间结构、箱形结构、曲线形的梁等。

4) 整体性好。现场整浇的混凝土结构各构件之间连接牢固,具有良好的整体性,对抗震、抗爆有利。

5) 可就地取材。在混凝土结构中,用量最多的砂、石等材料属于地方材料,可就地供应。还可以将工业废料制成人造集料,将粉煤灰作为水泥或混凝土的外加成分,变废为宝,保护环境。

6) 节约钢材。和钢结构相比,混凝土结构中用混凝土代替钢筋受压,合理发挥了材料的性能,节约了钢材。

但是混凝土结构也有一些缺点,如自身重力较大,这对大跨度结构、高层建筑结构以及抗震不利,也给运输和施工吊装带来困难。另外,钢筋混凝土结构抗裂性较差,受拉和受弯等构件在正常使用时往往带裂缝工作,对一些不允许出现裂缝或对裂缝宽度有严格限制的结构,要满足这些要求就需要提高工程造价。此外,钢筋混凝土结构的隔热隔声性能也较差。随着科学技术的发展,这些缺点会逐渐被克服。

1.2 混凝土结构的发展

1.2.1 混凝土结构的发展阶段

与砌体结构、钢结构、木结构相比,混凝土结构的历史不长,但自19世纪中叶开始使用后,由于混凝土和钢筋材料性能的不断改进,结构理论、施工技术的不断进步,使得钢筋混凝土结构得到迅速发展。目前,混凝土结构已经广泛应用于工业和民用建筑、桥梁、隧道、矿井以及水利、海港等土木工程领域。建筑用混凝土的发展史可以追溯到古希腊、罗马时代,甚至可能在更早的古代文明中就已经使用了混凝土及其胶结材料。但直到1824年波特兰水泥(硅酸盐水泥)的发明才为混凝土的大量使用开创了新纪元,至今仅有190多年

的历史。它的发展大致经历了四个不同的阶段。

第一阶段为钢筋混凝土小构件的应用,设计计算依据为弹性理论方法。这一阶段所采用的钢筋和混凝土的强度都比较低,主要用来建造中小型楼板、梁、拱和基础等构件。例如,1872年美国沃德(E. W. Ward)建造了第一幢钢筋混凝土构件的房屋,1906年特纳(C. A. P. Turner)研制了第一个无梁平板。从此钢筋混凝土小构件进入工程实用阶段。

第二阶段为钢筋混凝土结构与预应力混凝土结构的大量应用,设计计算依据为材料的破损阶段方法。1922年,英国人狄森(Dyson)提出了受弯构件按破损阶段的计算方法。1928年法国工程师弗莱西奈(E. Freyssinet)发明了预应力混凝土。其后钢筋混凝土与预应力混凝土在分析、设计与施工等方面得到了迅速发展,出现了许多独特的建筑物,如美国波士顿市(Boston)的Kresge大会堂,英国的1951节日穹顶,美国芝加哥市(Chicago)的Marina摩天大楼等建筑物。1950年前苏联根据极限平衡理论制定了“塑性内力重分布计算规程”。1955年颁布了极限状态设计法,从而结束了按破损阶段的设计计算方法。

第三阶段为工业化生产预制构件与机械化施工,结构体系应用范围扩大,设计计算按极限状态方法。由于第二次世界大战后许多大城市百废待兴,重建任务繁重。工程中大量应用预制构件和机械化施工以加快建造速度。继前苏联提出的极限状态设计法之后,1970年英国、联邦德国、加拿大、波兰相继采用了此方法,并在欧洲混凝土委员会与国际预应力混凝土协会(CEB-FIP)第六届国际会议上提出了混凝土结构设计施工建议,形成了设计思想上的国际化统一准则。

第四阶段是由于近代钢筋混凝土力学这一新的学科分支逐渐形成,以统计教学为基础的结构可靠性理论已逐渐进入工程实用阶段。计算机技术的迅速发展使复杂的数学运算成为可能。设计计算依据概率极限状态设计法。该阶段可概括为计算理论趋于完善,材料强度不断提高,施工机械化程度越来越高,建筑物向大跨高层发展。

我国的钢筋混凝土结构发展比较曲折,新中国成立前几乎是空白,20世纪60年代边学习前苏联的经验边完善提高,70年代自己动手搞科研、编规范。近四十年来,作为反映我国混凝土结构学科技术水平的《混凝土结构设计规范》,随着我国工程建设经验的积累、科研工作的成果及世界范围内技术的进步而不断改进。我国不断制订和修订相关规范、标准,这在一定程度上反映了我国土木工程领域中混凝土结构的新进展,满足了我国在相关工程领域可持续发展的需求。我国在钢筋混凝土基本理论与计算方法、可靠度与荷载分析、单层与多层厂房结构、高层建筑结构、大板与升板结构、大跨度结构、结构抗震、工业化建筑体系、电子技术在钢筋混凝土结构中的应用和测试技术等方面取得了很多成果,为修订和制定有关规范和规程提供了大量的数据和科学依据。

1.2.2 混凝土结构材料方面的发展

钢筋混凝土结构自诞生以来在材料方面的发展主要表现在以下几个方面:混凝土和钢筋强度的不断提高,混凝土性能的不断改善,轻质混凝土的应用和用纤维增强复合材料筋(FRP筋)代替钢筋。

随着水泥和钢材工业的发展,混凝土和钢材的性能不断改进、强度逐步提高。美国在20世纪60年代使用的混凝土抗压强度平均为 28N/mm^2 ,在70年代已经提高到 42N/mm^2 。

近年来一些特殊结构的混凝土抗压强度可达 $100\text{N}/\text{mm}^2$ ，而试验室得出的抗压强度最高已达 $266\text{N}/\text{mm}^2$ 。前苏联在 20 世纪 70 年代使用钢材平均屈服强度为 $380\text{N}/\text{mm}^2$ ，在 80 年代提高到 $420\text{N}/\text{mm}^2$ ；美国在 20 世纪 70 年代钢材平均屈服强度已达 $420\text{N}/\text{mm}^2$ 。预应力筋所用钢材的强度则更高。这些均为进一步扩大钢筋混凝土结构的应用范围创造了条件，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，在减轻结构自重、节约钢材上取得了良好的效果。

20 世纪 90 年代以前，我国采用的混凝土抗压强度仅为 $15 \sim 20\text{N}/\text{mm}^2$ ，但随着经济的发展和科技的进步，高强混凝土在工程实践中得以应用。目前，我国的土木工程结构，尤其是超高层混凝土房屋，应用抗压强度为 $60\text{N}/\text{mm}^2$ 的混凝土已相当普遍。

为提高混凝土的抗拉强度，改善混凝土的抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗磨等性能，在普通混凝土中掺入各种纤维（如钢纤维、合成纤维、玻璃纤维和碳纤维等）而形成的纤维混凝土已在工程中得到广泛的应用，其中以钢纤维混凝土的技术最为成熟，应用最为广泛。美国、日本和我国都相继编制了钢纤维混凝土结构的施工设计规程或规范。

为克服混凝土自重大的缺点，经国内外学者的努力，由胶结料、多孔粗骨料、多孔或密实细骨料与水拌制而成的轻质混凝土（一般干重度不大于 $18\text{kN}/\text{m}^3$ ）得到了很大的发展。国外用于承重结构的轻质混凝土的抗压强度一般为 $30 \sim 60\text{N}/\text{mm}^2$ ，其重度一般为 $14 \sim 18\text{kN}/\text{m}^3$ 。国内轻质混凝土的抗压强度一般为 $20 \sim 40\text{N}/\text{mm}^2$ ，其重度一般为 $12 \sim 18\text{kN}/\text{m}^3$ 。1976 年建成的美国芝加哥市（Chicago）Water Tower 广场大厦的楼板采用了抗压强度为 $35\text{N}/\text{mm}^2$ 的轻骨料混凝土。美国休斯敦市（Houston）52 层 210m 高的贝壳广场大厦则全部由轻质混凝土建造。当对混凝土的强度要求不高时，可以采用普通粗骨料制成的无砂大孔混凝土，其重度一般为 $16 \sim 19\text{kN}/\text{m}^3$ 。

对于混凝土结构中的钢筋，主要是向高强并有较好延性、防腐性、黏结锚固性等方向发展。我国用于普通混凝土结构的钢筋强度已达 $500\text{N}/\text{mm}^2$ 。在中等跨度的预应力构件中将采用强度为 $800 \sim 1370\text{N}/\text{mm}^2$ 的中强螺旋肋钢丝，在大跨度的预应力构建中采用强度为 $1570 \sim 1960\text{N}/\text{mm}^2$ 的高强钢丝和钢绞线。混凝土结构中钢筋的锈蚀是影响结构寿命的重要因素之一，用 FRP 筋代替混凝土中的钢筋将是一种有效的解决锈蚀问题的方法。

FRP 筋是一种由纤维加筋、树脂母体和一些添加料制成的复合材料，具有强度高、质量轻、抗腐蚀、低松弛、易加工等优良特性，是钢筋的良好替代物。FRP 筋是近年来在土木工程中开始应用的新型材料，在桥梁工程中有着广阔的应用前景。

1.2.3 混凝土结构的设计理论的发展

混凝土结构的基本理论和设计方法是不断发展的。早期以弹性理论为基础的“容许应力法”一经提出便很快被工程界所接受。此方法认为截面应力分布是线性的，尽管在数学处理上比较简单，但是没有考虑钢筋与混凝土之间以及超静定结构各截面之间的应力或内力重分布，也没有深入考虑抗震设计中所必须考虑的延性。所以，这种设计方法不能正确揭示混凝土结构或构件受力性能的内在规律。现在绝大多数国家已不再采用容许应力法。

20 世纪 40 年代，前苏联的学者提出了按破损阶段计算的方法，该方法以截面所能抵抗的破坏内力为依据进行设计计算。这种方法虽然考虑了混凝土和钢筋的塑性，更接近于钢筋

混凝土的实际情况，但在总的安全系数的规定方面仍带有很大的经验性。

20世纪50年代提出了按极限状态计算结构承载力的设计方法。这种方法指出结构的极限状态是一种特定状态，当达到此状态时，结构或构件会丧失承载力或不能正常使用。由于计算系数是根据荷载及材料强度的变异性由统计规律分项确定，并考虑了影响结构构件承载力的非统计因素，因此这种设计方法又称为半经验、半概率极限状态设计方法。该方法在20世纪70年代已被多数国家所接受。

随着结构设计理论的进一步发展，为了合理规定结构及其构件的安全系数或分项系数，结构可靠度理论也得到了发展，提出了以失效概率来度量结构安全性的极限状态设计方法。在大量的调查、统计和分析后，能够比较合理地确定各分项系数，而且用失效概率和可靠度指标能够比较明确地说明结构“可靠”或“不可靠”的概念。所以，到目前为止，已经有许多国家采用了以概率理论为基础的极限状态设计方法。

目前，我国已编制出了GB/T 50068—2001《建筑结构可靠度设计统一标准》，GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》、GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》、GB50011—2010《建筑抗震设计规范》、JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》等。这些规范和规程积累了我国半个世纪以来丰富的工程实践经验和最新的科研成果，把我国混凝土结构设计方法提高到了当前的国际水平，这将促进我国混凝土结构设计的进一步发展。

1.2.4 混凝土结构的工程应用

混凝土结构可应用于土木工程中的各个领域，其在房屋建筑中占有相当大的比例。高强混凝土的发展促进了混凝土结构在超高层建筑中的应用。例如，1976年建成的美国芝加哥市（Chicago）水塔广场大厦，该大厦达74层，高262m；朝鲜平壤的柳京大厦，共105层，高305m。美国、俄罗斯等国家在高层建筑中采用的混凝土强度已达C100。例如，美国西雅图市（Seattle）的Two Union Square大厦（58层），该大厦60%的竖向荷载由中央四根直径为3.05m的钢管混凝土柱承受，钢管内填充的混凝土强度等级达C135，如图1-1所示。1998年在我国台北地区建成的台北101大楼，高509m；2008年在上海陆家嘴建成的上海环球金融中心，高492m；2010年在阿拉伯联合酋长国迪拜市建成的哈利法塔，高828m；2014年在上海陆家嘴建成的上海中心，高636m。混凝土结构工程示例如图1-2所示。



图 1-1 Two Union Square 大厦

钢筋混凝土结构在桥梁、特种结构、水利工程、海洋工程、港口码头工程等领域也得到不断发展。2000年德国建成了维尔德格拉桥，主跨252m；2005年在克罗地亚的希贝尼克建成了斯科拉丁桥钢筋混凝土主拱肋跨度为204m；2014年在辽宁省大连市建成主桥主跨206m的预应力混凝土矮塔斜拉桥等。桥梁工程示例如图1-3所示。

从1925年德国第一次采用折板结构大型煤仓开始，薄壁空间结构逐渐在屋盖及贮仓、水塔、水池等构筑物中得到广泛应用。

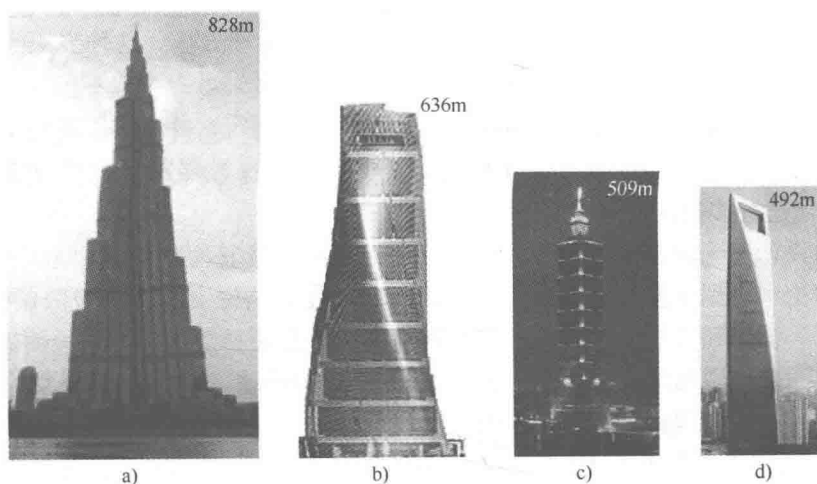


图 1-2 混凝土结构工程示例

a) 哈利法塔 b) 上海中心大厦 c) 台北 101 大厦 d) 上海环球金融中心

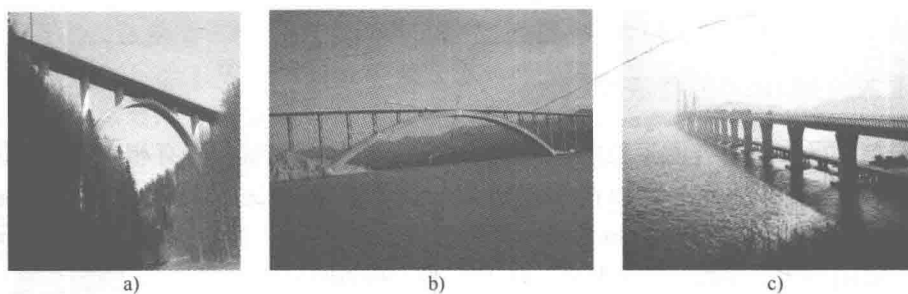


图 1-3 桥梁工程示例

a) 德国维尔德格拉桥 b) 克罗地亚斯科克林桥 c) 辽宁大连的短塔斜拉桥

1.3 本课程的特点和学习方法

本课程是土木工程专业的一门重要专业课程。学好这门课，能够为学习“砌体结构”“钢结构”“高层建筑结构”等课程打下坚实的基础。所以，该课程也是一门非常重要的专业平台课。本课程的特点是概念多、计算公式多、符号多、图多、构造规定多，这使得许多初学者在学习时感到困难重重。要学好本课程，就需要把握课程的要点，掌握结构构件的基本力学性能、计算分析方法以及混凝土结构构件基本构造措施。

1.3.1 把握混凝土结构的三要素

在钢筋混凝土结构中，钢筋和混凝土需要满足一定的条件才能使它们可以有效地完成工作，例如要考虑两种材料的数量比例、搭配及构件承载力等方面问题。随着对混凝土结构的深入研究，相关的规范和图集在不断变化调整，我们需要有能力适应这些变化，并加以理

解、掌握和吸收。本书总结归纳出钢筋混凝土构件承载力问题的三个要点，即形态、平衡和协调。透彻理解这三个要点，并把握这三点之间的关系，会对本课程的学习有很大帮助。

1. 形态

形态是指构件的截面、结构的构件及节点、整体结构在某一工作阶段的形貌、状态、属性等。形态具有具体、直观、形象的特点。一般通过参观实际工程结构或观察科学试验现象来认识结构形态。

混凝土结构在不同的工作阶段会呈现不同的形态特征，如混凝土结构受弯构件、受压构件、受扭构件及预应力混凝土构件等在不同工作阶段（包括达到承载力极限状态时）都有不同的破坏形态。正是由于这些带有各自特点的形态特征，表达出其受力平衡机理的差异，在选择计算方法时的侧重点也有很大不同。

以混凝土受弯构件正截面受弯破坏为例，当梁中纵向受力钢筋的配筋率适中（称为适筋梁），梁达到承载力极限状态而破坏时，受拉钢筋已经屈服，受压区边缘混凝土压碎。这就是适筋梁正截面承载力极限状态时的破坏形态。这一形态可以用上述文字表达，也可以用示意图（见图 1-4f）或实验照片描述，还可以用符号和数值来表述（受拉钢筋应力为 f_y ，受压区边缘混凝土应变为 ϵ_{cu} ）。三种方式虽然不同，但是都从不同角度准确说明了受弯构件

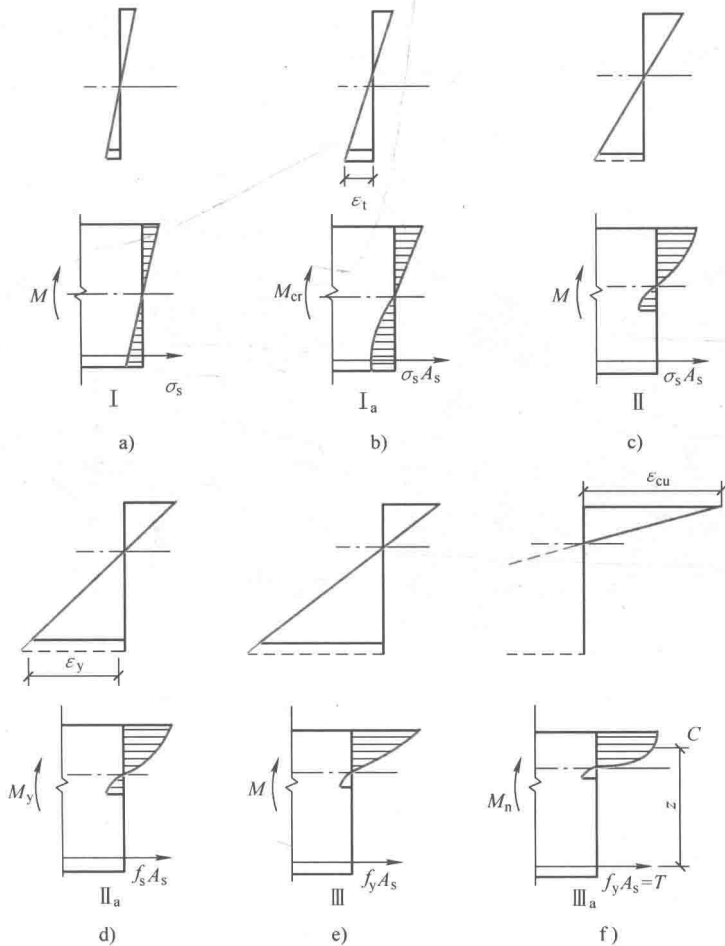


图 1-4 适筋梁受弯破坏过程

正截面受弯破坏承载力极限状态时的截面形态。

结构在不同工作阶段的形态是不一样的,上面描述的是适筋梁受力过程的第三个阶段末(Ⅲa)的截面形态,用于承载力极限状态计算和设计。此前,还有两个阶段。第一阶段称为弹性工作阶段,阶段末(Ⅰa)截面形态:受拉区混凝土边缘纤维应变到达混凝土的极限拉应变 ε_{tu} ,梁处于将裂未裂的极限状态,可用于开裂分析。第二阶段称为带裂缝工作阶段,阶段末(Ⅱa)截面形态:受拉钢筋应力达到屈服强度 f_y ,这一阶段是裂缝宽度和挠度验算的依据。可见,结构不同工作阶段的形态各有用途,均应注重学习和掌握。

混凝土结构形态的基础作用不仅体现在宏观结构分析上,对于材料的微观结构形态与力学性能研究也很重要。混凝土微观结构的改变是宏观力学性能改变的根本原因,这里以温度影响下微观结构的变化为例,介绍微观形态可以反映温度变化历程与强度性能的关系。

混凝土的微观结构随着温度的变化是比较明显的,随着温度的升高,混凝土微观结构的形貌发生变化。对于常温下的混凝土,通过扫描电镜观察其微观形貌可以发现,水化物相的棱角清晰、没有缺损,经过长时间的水化后,矿物掺和料的表面也有大量的水化产物出现,并且与混凝土基体的结合完好,如图1-5所示。但是当混凝土经过高温后(当最高温度到达 $650\sim 720^{\circ}\text{C}$ 时),如图1-6所示,通过扫描电镜可以观察到水化硅酸钙(CSH)凝胶基体已经收缩为小颗粒状,浆体结构疏松没有强度或强度很低,且基体中存在大量的气孔和贯穿性的裂纹,还有大量的纤维状水化产物出现,这是由于对高温后混凝土试样进行喷水冷却或冷却后遇到空气中的水分,试样中未水化的水泥颗粒重新水化造成的。通过X射线衍射图谱(图1-6d)可以直观地看出氢氧化钙不复存在,白云石的峰值隐约可见,表明温度对骨料影响程度很大,且碳酸钙的峰值较高,应存在部分白云石分解。

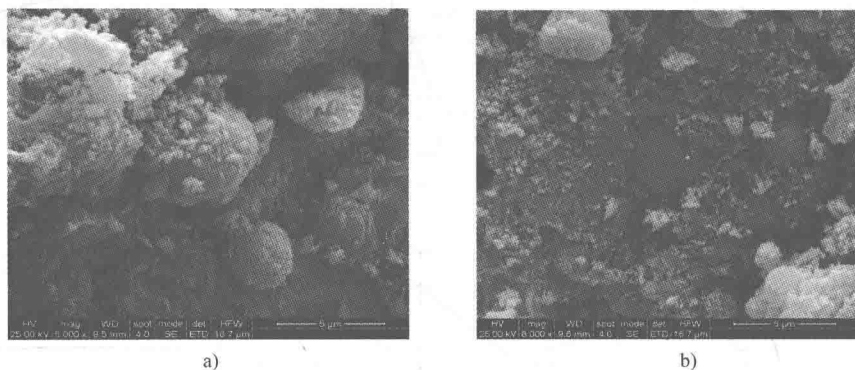


图 1-5 常温下的微观结构
a) 水化良好的浆体 b) 结构孔洞间充满了水化产物

2. 平衡

平衡是指受力平衡,主要指构件的截面、结构的构件及节点、整体结构的受力平衡,包括力的平衡和力矩的平衡。

以钢筋混凝土适筋梁正截面受弯承载力问题为例:钢筋混凝土适筋梁正截面受弯破坏时,其破坏形态为受拉区钢筋屈服,受压区混凝土被压碎。基于这个破坏形态,并考虑钢筋和混凝土两种材料的应力与应变协调关系,可以得到单筋矩形截面受弯构件正截面的承载力

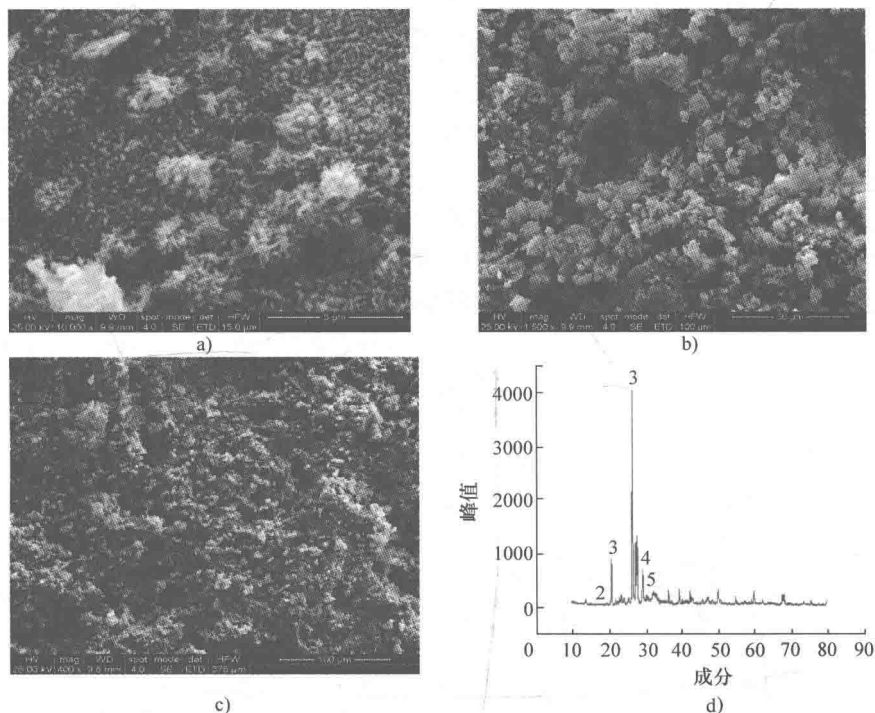


图 1-6 高温后的微观结构

- a) 水化产物已经收缩成小颗粒 b) 疏松的浆体结构 c) 浆体中存在大量的气孔 d) XRD 图谱
1—氢氧化钙 2—石英 3—碳酸钙 4—白云石 5—球霞石

计算简图，如图 1-7 所示。根据受力简图，就能很快列出其极限状态下的受力平衡方程和弯矩平衡方程。

3. 协调

协调是指组成截面的材料之间、组成构件的截面之间、组成结构的构件及节点之间、整体结构的各个部分之间，在共同工作时的抗力互相匹配、彼此协调。因此，构件的截面、结构的构件和节点、整体结构都需要考虑协调的问题。

例如，钢筋混凝土适筋梁正截面受弯承载力问题中的适用条件 $\rho \geq \rho_{\min}$ ， $\xi \leq \xi_b$ ，目的就是使梁正截面的钢筋和混凝土两种材料的数量比例协调，能组成一个和谐、优化的抗弯截面。这样，在受弯破坏时，钢筋和混凝土两种材料都能充分发挥各自的抗拉和抗压特性，两种材料的能量都能得到充分的利用。同时，适筋梁的设计也是为了保证构件具有一定的延性，防止其发生危险性较大的脆性破坏。

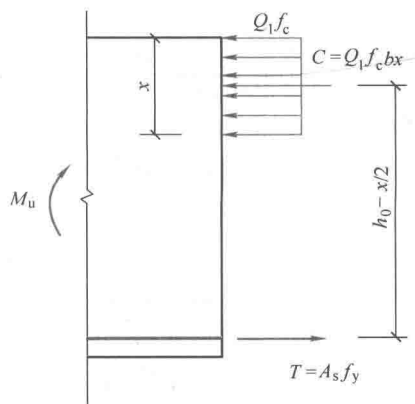


图 1-7 受弯构件正截面受力简图

1.3.2 理解三要素之间的关系

形态、平衡、协调的关系可以概括为：形态是基础，平衡是准则，协调是目的。三者彼