

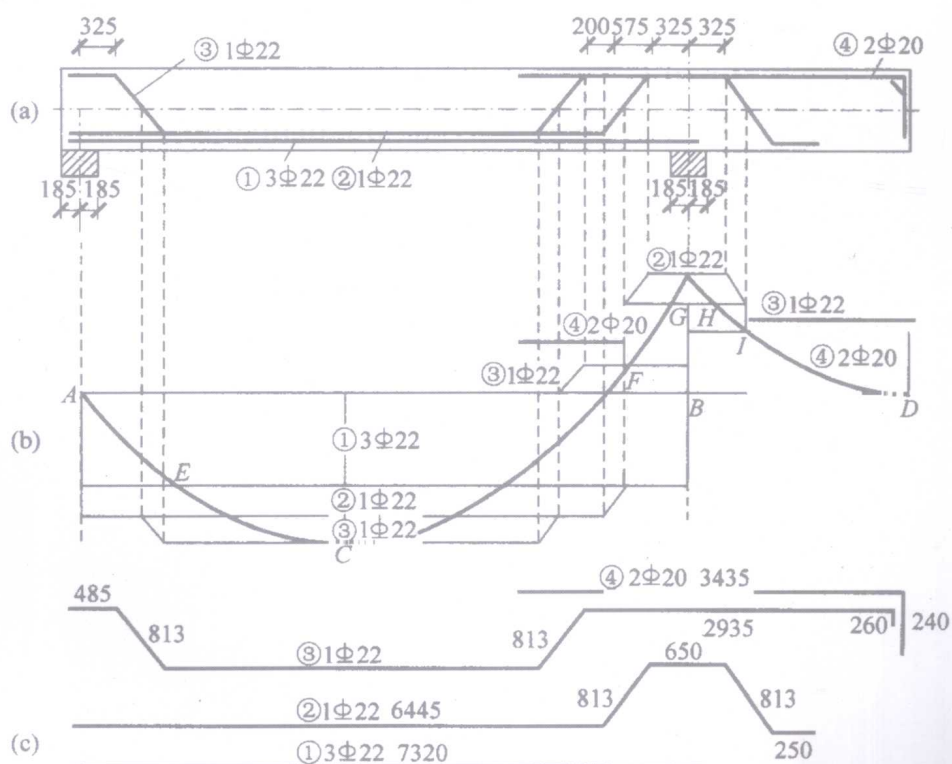
普通高等学校土木工程专业新编系列教材  
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

# 混凝土结构原理

(新1版)

H N T J G Y L

刘立新 叶燕华 主编



普通高等学校土木工程专业新编系列教材  
中国土木工程学会教育工作委员会 审订

# 混凝土结构原理

(新1版)

主 编 刘立新 叶燕华

武汉理工大学出版社

## 【内 容 提 要】

本书结合我国近年来混凝土结构的最新发展情况,主要介绍了混凝土结构材料的物理力学性能,极限状态设计方法的基本概念,受弯、受剪、受扭、受压和受拉构件承载力计算,混凝土构件裂缝、变形控制和耐久性,预应力混凝土构件等。

全书依据即将颁布的《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)(报批稿)编写,各章均有按新规范设计的典型例题、思考题和习题。本书可作为高等学校土木工程专业混凝土结构课程教材使用,也可供土木工程技术人员学习新规范参考。

## 【作 者 简 介】

刘立新,男,1947年10月出生,郑州大学教授,博士生导师。长期从事土木工程专业教学和科研工作,主要研究方向为混凝土结构、砌体结构基本理论及工程应用。曾荣获省级教学成果特等奖1项,部(省)级科技进步一等奖1项、二等奖4项、三等奖5项,出版学术专著、教材10多本,在国内外学术刊物发表论文70余篇。1997年被国务院批准为享受政府特殊津贴专家,1998年被评为全国优秀教师,2007年被评为河南省教学名师。主要社会兼职有全国混凝土结构标准技术委员会委员、全国砌体结构标准技术委员会委员等。

E-mail:liuli\_xin@126.com

叶燕华,女,1956年生,江西人,南京工业大学土木学院教授,建筑工程系主任。美国混凝土学会会员,中国基建优化研究会暨旧房建筑改造专业委员会委员,江苏省地震学会地震工程专业委员会委员,中国土木工程学会江苏结构分会会员,江苏省招标投标评标委员专家。曾荣获华夏建设科技进步三等奖一项,南京市科技进步三等奖一项;出版教材5本。

E-mail:yuh\_5610@163.com

## 图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构原理/刘立新,叶燕华主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-5629-3286-4

I. ①混…

II. ①刘… ②叶…

III. ①混凝土结构-高等学校-教材

IV. ①TU37

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第162904号

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路122号 邮编:430070)

<http://www.techbook.com.cn> 理工图书网

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:荆州鸿盛印务有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:15

字 数:486千字

版 次:2010年8月第1版

印 次:2010年8月第1次印刷

定 价:30.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:(027)87394412 87383695 87384729

版权所有,盗版必究。

## 前 言

混凝土结构原理是土木工程专业的主干专业基础课之一,本教材的编写力求贯彻土木工程专业指导委员会新制订的“土木工程专业指导规范”和培养卓越工程师的精神,在培养学生综合能力和创新意识的同时,注重建立学生的工程概念,提高应用能力。

本教材是依据新修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(报批稿)和新修订的其他相关规范、标准编写的,反映了我国混凝土结构在土木工程领域的新进展,以及可持续发展的要求。本书主要内容包括混凝土结构材料的物理力学性能,极限状态设计方法的基本概念,受弯、受剪、受扭、受压和受拉构件承载力计算方法,混凝土构件裂缝、变形控制和耐久性,预应力混凝土构件等。每章均有按照新规范设计计算的典型例题,各章均有提要、小结、思考题和习题,力求语言通俗易懂,内容深入浅出。本书既可供高等学校土木工程专业的教学使用,又可供土木工程技术人员学习理解新规范参考。

本书共分10章,其中,第1、2、3章由刘立新编写,第4、5章由叶燕华、李雪红编写,第6、8章由叶燕华、郭樟根编写,第7章由王新玲编写,第9章由赵文兰编写,第10章由管品武、赵文兰编写。全书由刘立新、叶燕华担任主编。另外,魏威、朱铁梅对4、5、6、8章的部分例题和习题进行了试做,深表感谢。

由于编者水平所限,对新修订的规范学习理解不够,错误与缺点在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2010年8月

# 目 录

1 绪论 .....	(1)
1.1 混凝土结构的一般概念 .....	(1)
1.2 混凝土结构的发展简况及其工程应用 .....	(2)
1.2.1 混凝土结构发展的几个阶段 .....	(2)
1.2.2 混凝土结构的工程应用 .....	(3)
1.2.3 混凝土结构发展概况 .....	(4)
1.2.4 混凝土结构计算理论的发展概况 .....	(5)
1.3 本课程的特点与学习方法 .....	(6)
本章小结 .....	(7)
思考题 .....	(7)
2 混凝土结构材料的物理力学性能 .....	(8)
2.1 钢筋 .....	(8)
2.1.1 钢筋的品种和级别 .....	(8)
2.1.2 钢筋强度和变形 .....	(9)
2.1.3 钢筋的疲劳 .....	(11)
2.1.4 混凝土结构对钢筋性能的要求 .....	(11)
2.2 混凝土 .....	(12)
2.2.1 混凝土的组成结构 .....	(12)
2.2.2 混凝土的强度 .....	(12)
2.2.3 混凝土的变形 .....	(16)
2.3 钢筋与混凝土的相互作用——粘结 .....	(24)
2.3.1 粘结的作用与性质 .....	(24)
2.3.2 粘结机理分析 .....	(25)
2.3.3 影响粘结强度的主要因素 .....	(26)
2.3.4 钢筋的锚固长度 .....	(27)
本章小结 .....	(28)
思考题与习题 .....	(29)
3 混凝土结构设计方法 .....	(30)
3.1 极限状态设计法的基本概念 .....	(30)
3.1.1 结构的功能要求 .....	(30)
3.1.2 结构的极限状态 .....	(30)
3.1.3 结构上的作用、作用效应和结构的抗力 .....	(31)
3.2 可靠度分析的基本概念 .....	(32)
3.2.1 结构设计问题的不确定性 .....	(32)
3.2.2 数理统计的基本概念 .....	(33)
3.2.3 结构的失效概率和可靠指标 .....	(35)
3.3 极限状态设计的实用表达式 .....	(36)
3.3.1 荷载代表值 .....	(37)
3.3.2 材料强度取值 .....	(39)
3.3.3 结构的设计状况 .....	(40)

3.3.4	承载力极限状态的设计表达式	(40)
3.3.5	正常使用极限状态设计表达式	(41)
	本章小结	(42)
	思考题与习题	(43)
<b>4</b>	<b>受弯构件正截面承载力计算</b>	<b>(44)</b>
4.1	受弯构件截面形式及计算内容	(44)
4.2	受弯构件基本构造要求	(44)
4.2.1	板的构造要求	(44)
4.2.2	梁的构造要求	(45)
4.3	受弯构件正截面受力性能	(46)
4.3.1	适筋梁的试验研究	(46)
4.3.2	配筋率与受弯构件正截面破坏特征	(48)
4.4	受弯构件正截面承载力计算基本规定	(49)
4.4.1	基本假定	(49)
4.4.2	等效矩形应力图	(50)
4.4.3	受弯构件正截面承载力计算公式	(51)
4.4.4	界限相对受压区高度	(52)
4.4.5	最小配筋率	(53)
4.5	单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	(54)
4.5.1	基本计算公式	(54)
4.5.2	适用条件	(55)
4.5.3	设计计算方法	(55)
4.6	双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	(59)
4.6.1	受压钢筋的强度	(59)
4.6.2	基本计算公式	(60)
4.6.3	适用条件	(61)
4.6.4	设计计算方法	(61)
4.7	T形截面	(65)
4.7.1	概述	(65)
4.7.2	T形截面类型及判别条件	(66)
4.7.3	基本计算公式	(67)
4.7.4	适用条件	(68)
4.7.5	计算方法	(69)
	本章小结	(71)
	思考题与习题	(71)
<b>5</b>	<b>受弯构件斜截面承载力计算</b>	<b>(74)</b>
5.1	斜裂缝的形成	(74)
5.2	无腹筋梁的受剪性能	(75)
5.2.1	斜裂缝出现后无腹筋梁的应力状态	(75)
5.2.2	无腹筋梁的受剪破坏形态	(76)
5.2.3	影响无腹筋梁受剪承载力的因素	(77)
5.2.4	无腹筋梁的受剪承载力	(78)
5.3	有腹筋梁的斜截面受剪性能	(79)
5.3.1	斜裂缝出现后有腹筋梁的应力状态	(79)
5.3.2	有腹筋梁的受剪破坏形态	(80)

5.4	受弯构件斜截面受剪承载力计算	(81)
5.4.1	受剪承载力计算公式	(81)
5.4.2	适用条件	(83)
5.4.3	计算方法	(84)
5.5	受弯构件纵向钢筋的构造要求	(89)
5.5.1	抵抗弯矩图	(89)
5.5.2	纵向受力钢筋的弯起	(89)
5.5.3	纵向受力钢筋的截断	(92)
5.5.4	受力钢筋的锚固和搭接	(93)
5.5.5	钢筋细部尺寸	(96)
5.6	钢筋混凝土伸臂梁设计例题	(96)
	本章小结	(99)
	思考题与习题	(100)
<b>6</b>	<b>受扭构件承载力计算</b>	<b>(102)</b>
6.1	概述	(102)
6.2	构件的开裂扭矩	(103)
6.2.1	构件开裂前的应力状态	(103)
6.2.2	矩形截面开裂扭矩	(103)
6.3	纯扭构件受扭承载力计算	(104)
6.3.1	受扭构件配筋方式	(104)
6.3.2	纯扭构件的破坏形式	(104)
6.3.3	矩形截面纯扭构件受扭承载力计算	(106)
6.3.4	箱形、T形和工形截面纯扭构件受扭承载力计算	(108)
6.4	弯剪扭构件受扭承载力计算	(111)
6.4.1	弯剪扭构件的破坏形式	(111)
6.4.2	剪扭相关性	(112)
6.4.3	弯剪扭构件受扭承载力计算	(114)
6.4.4	受扭计算公式适用条件	(115)
6.5	受扭构件配筋构造要求	(116)
6.6	压弯剪扭构件的承载力计算	(118)
6.6.1	压扭构件	(118)
6.6.2	压弯剪扭构件	(118)
6.7	拉弯剪扭构件的承载力计算	(119)
6.7.1	拉扭构件	(119)
6.7.2	拉弯剪扭构件	(119)
	本章小结	(119)
	思考题与习题	(120)
<b>7</b>	<b>受压构件承载力计算</b>	<b>(121)</b>
7.1	受压构件的类型及一般构造要求	(121)
7.1.1	受压构件的类型	(121)
7.1.2	一般构造要求	(121)
7.2	轴心受压构件承载力计算	(123)
7.2.1	配有普通箍筋轴心受压构件承载力计算	(124)
7.2.2	配有螺旋式箍筋轴心受压柱承载力计算	(127)
7.3	偏心受压构件的受力性能分析	(129)

7.3.1	偏心受压短柱的受力特点和破坏形态	(129)
7.3.2	截面承载力 $N_u$ - $M_u$ 关系	(131)
7.3.3	附加偏心距	(131)
7.3.4	偏心受压长柱的受力特点及设计弯矩计算方法	(132)
7.3.5	两种破坏形态的界限	(134)
7.4	矩形截面偏心受压构件承载力计算的基本公式	(134)
7.4.1	矩形截面大偏心受压构件承载力计算公式	(134)
7.4.2	矩形截面小偏心受压构件承载力计算公式	(136)
7.5	不对称配筋矩形截面偏心受压构件承载力计算方法	(137)
7.5.1	大、小偏心受压破坏的判别	(137)
7.5.2	截面设计	(138)
7.5.3	截面校核	(139)
7.6	对称配筋矩形截面偏心受压构件承载力计算方法	(144)
7.6.1	截面设计	(144)
7.6.2	截面校核	(145)
7.7	对称配筋工形截面偏心受压构件承载力计算	(147)
7.7.1	大偏心受压构件计算公式	(147)
7.7.2	小偏心受压构件计算公式	(148)
7.7.3	截面设计	(149)
7.8	双向偏心受压构件承载力计算	(150)
7.8.1	双向偏心受压构件受力特点	(150)
7.8.2	近似计算方法(倪克勤公式)	(151)
7.9	偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	(151)
7.9.1	轴向压力对构件斜截面受剪承载力的影响	(151)
7.9.2	偏心受压构件斜截面受剪承载力计算公式	(151)
	本章小结	(152)
	思考题与习题	(152)
<b>8</b>	<b>受拉构件承载力计算</b>	(154)
8.1	轴心受拉构件	(154)
8.2	偏心受拉构件正截面承载力	(155)
8.2.1	偏心受拉构件的破坏形态	(155)
8.2.2	偏心受拉构件承载力计算	(155)
8.3	偏心受拉构件斜截面受剪承载力	(158)
	本章小结	(158)
	思考题与习题	(159)
<b>9</b>	<b>钢筋混凝土构件的裂缝、变形和耐久性</b>	(160)
9.1	概述	(160)
9.2	裂缝宽度验算	(161)
9.2.1	粘结滑移理论	(161)
9.2.2	无滑移理论	(164)
9.2.3	我国规范裂缝宽度计算方法	(164)
9.3	受弯构件的挠度验算	(168)
9.3.1	钢筋混凝土受弯构件挠度与刚度的特点	(168)
9.3.2	钢筋混凝土受弯构件的短期刚度	(169)
9.3.3	钢筋混凝土受弯构件的长期刚度	(171)



9.3.4	钢筋混凝土受弯构件挠度的计算	(171)
9.4	混凝土结构的耐久性	(173)
9.4.1	耐久性的概念与主要影响因素	(173)
9.4.2	混凝土结构耐久性设计的主要内容	(174)
	本章小结	(175)
	思考题与习题	(175)
<b>10</b>	<b>预应力混凝土构件</b>	<b>(177)</b>
10.1	概述	(177)
10.1.1	预应力混凝土的基本概念	(177)
10.1.2	预应力混凝土构件的分类	(179)
10.1.3	预加应力的方法	(179)
10.1.4	锚具与夹具	(180)
10.2	预应力混凝土构件设计的一般规定	(182)
10.2.1	预应力混凝土的材料	(182)
10.2.2	张拉控制应力 $\sigma_{con}$	(183)
10.3	预应力损失	(183)
10.3.1	张拉端锚具变形和钢筋内缩引起的预应力损失 $\sigma_{11}$	(183)
10.3.2	预应力钢筋与孔道壁之间摩擦引起的预应力损失 $\sigma_{12}$	(185)
10.3.3	混凝土加热养护时受张拉的钢筋与承受拉力的设备之间的温差引起的预应力损失 $\sigma_{13}$	(185)
10.3.4	预应力钢筋的应力松弛引起的预应力损失 $\sigma_{14}$	(185)
10.3.5	混凝土收缩和徐变引起的预应力损失 $\sigma_{15}$	(186)
10.3.6	环形构件用螺旋式预应力钢筋作配筋时所引起的预应力损失 $\sigma_{16}$	(187)
10.3.7	预应力损失的组合	(187)
10.4	预应力钢筋的传递长度 $l_{tr}$ 和构件端部锚固区局部受压承载力计算	(187)
10.4.1	预应力钢筋的传递长度 $l_{tr}$	(187)
10.4.2	构件端部锚固区局部受压承载力计算	(188)
10.5	轴心受拉构件各阶段应力分析	(190)
10.5.1	先张法构件	(190)
10.5.2	后张法构件	(191)
10.5.3	先张法与后张法计算公式的比较	(192)
10.6	预应力混凝土轴心受拉构件计算	(193)
10.6.1	使用阶段承载力计算	(193)
10.6.2	使用阶段裂缝控制计算	(193)
10.6.3	施工阶段验算	(194)
10.6.4	端部锚固区局部受压承载能力验算	(195)
10.7	预应力混凝土受弯构件的计算	(197)
10.7.1	受弯构件应力分析	(197)
10.7.2	使用阶段正截面承载力计算	(200)
10.7.3	使用阶段斜截面承载力计算	(202)
10.7.4	使用阶段正截面裂缝控制验算	(202)
10.7.5	使用阶段斜截面裂缝控制验算	(203)
10.7.6	使用阶段挠度验算	(204)
10.7.7	施工阶段验算	(205)
10.8	预应力混凝土构件的构造要求	(213)

10.8.1 先张法构件.....	(213)
10.8.2 后张法构件.....	(214)
10.9 部分预应力混凝土与无粘结预应力混凝土结构.....	(215)
10.9.1 部分预应力混凝土结构.....	(215)
10.9.2 无粘结预应力混凝土结构基本概念.....	(216)
本章小结.....	(217)
思考题与习题.....	(217)
附录.....	(219)
参考文献.....	(229)

# 1 绪 论

## 本章提要

本章叙述了混凝土结构的一般概念,钢筋和混凝土这两种性质不同的材料能够组合在一起共同工作的条件,以及混凝土结构的优缺点;介绍了混凝土结构在房屋建筑工程、交通土建工程、水利工程及其他工程中的应用;介绍了混凝土结构的发展前景,包括在材料、结构、施工技术、计算理论等方面的发展;还介绍了混凝土结构课程的特点和学习方法,以及指导工程设计的混凝土结构设计规范发展的概况。

## 1.1 混凝土结构的一般概念

以混凝土为主要材料制成的结构称为混凝土结构,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。混凝土结构广泛应用于工业与民用建筑、桥梁、隧道、矿井以及水利、海港、核电等工程建设中。

钢筋和混凝土都是土木工程中重要的建筑材料,钢筋的抗拉和抗压强度都很高,但价格也相对较高;混凝土的抗压强度较高,但抗拉强度却很弱。为了充分发挥材料的性能,把钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式结合在一起,取长补短共同工作,使钢筋主要承受拉力,混凝土主要承受压力,这就组成了钢筋混凝土。

图 1.1(a)所示为一用素混凝土制成的简支梁,由试验可知,由于混凝土抗拉强度很低,在不大的荷载作用下,梁下部受拉区边缘的混凝土即出现裂缝,而受拉区混凝土一旦开裂,裂缝将迅速发展,梁瞬间断裂而破坏。此时受压区混凝土的抗压强度还远远没有充分利用,梁的承载力很低。如果在梁的底部受拉区配置抗拉强度较高的钢筋,如图 1.1(b)所示,形成钢筋混凝土梁,当荷载增加到一定值时,梁的受拉区混凝土仍会开裂,但钢筋可以代替混凝土承受拉力,裂缝不会迅速发展,且梁的承载力还会继续提高。如果配筋适当,梁可以在较大的荷载作用下才破坏,破坏时钢筋的应力达到屈服强度,受压区混凝土的抗压强度也能得到充分利用。而且在破坏前,混凝土裂缝充分发展,梁的变形迅速增大,有明显的破坏预兆。因此,在混凝土中配置一定形式和数量的钢筋形成钢筋混凝土构件后,可以使构件的承载力得到很大提高,构件的受力性能也得到显著改善。

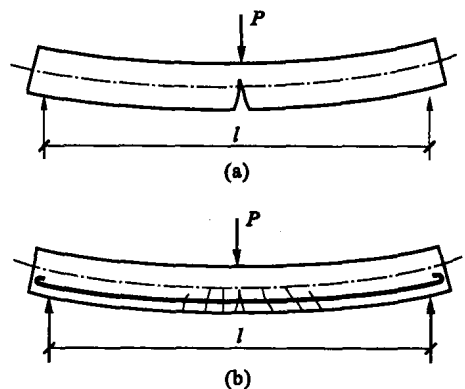


图 1.1 素混凝土梁和钢筋混凝土梁的破坏情况

(a) 素混凝土梁; (b) 钢筋混凝土梁

钢筋和混凝土是两种物理力学性能很不相同的材料,它们能够有效地结合在一起共同工作,其主要原因有:

(1) 混凝土硬化后,钢筋和混凝土之间存在粘结力,使两者之间能传递力和变形。粘结力是使这两种不同性质的材料能够共同工作的基础。

(2) 钢筋和混凝土两种材料的线膨胀系数接近。钢筋的线膨胀系数为  $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ,混凝土的线膨胀系数为  $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ,因此当温度变化时,钢筋和混凝土的粘结力不会因两者之间过大的相对变形而破坏。

以钢筋混凝土为主要承重骨架的土木工程构筑物就称为钢筋混凝土结构。钢筋混凝土结构由一系列受力类型不同的构件所组成,这些构件称为基本构件。钢筋混凝土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、剪力墙和屋架的压杆等。
- (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。

钢筋混凝土结构在土木工程结构中有广泛的应用,这是因为它有很多优点,其主要优点有:

#### (1) 材料利用合理

钢筋和混凝土两种材料的强度均可得到充分发挥,对于一般工程结构,钢筋混凝土结构的经济指标优于钢结构。

#### (2) 耐久性好

在一般环境条件下,钢筋可以受到混凝土的保护不发生锈蚀,而且混凝土的强度随着时间的增长还会有所增长,并能减少维护费用。

#### (3) 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那样很快升温达到软化而丧失承载能力,在常温至 300 ℃ 范围内,混凝土强度基本不降低。

#### (4) 可模性好

钢筋混凝土可以根据需要浇筑成各种形状和尺寸的结构,如空间结构、箱形结构等。采用高性能混凝土可浇筑清水混凝土,具有很好的建筑效果。

#### (5) 整体性好

现浇式或装配整体式的钢筋混凝土结构整体性好,对抗震、抗爆有利。

#### (6) 易于就地取材

在混凝土结构中,钢筋和水泥这两种工业产品所占的比例较小,砂、石等材料所占比例虽然较大,但属于地方材料,可就地供应。近年来利用建筑垃圾、工业废渣制造再生骨料,利用粉煤灰作为水泥或混凝土的外加成分,这些做法既可变废为宝,又有利于保护环境。

但是钢筋混凝土结构也存在一些缺点,主要是结构自重较大,抗裂性较差,一旦损坏修复比较困难,施工受季节环境影响较大等,这就使得钢筋混凝土结构的应用范围受到一定限制。随着科学技术的发展,上述缺点已在一定程度上得到了克服和改善。如采用轻质混凝土可以减轻结构自重,采用预应力混凝土可以提高结构或构件的抗裂性能,采用植筋或粘钢等技术可以较好地对发生局部损坏的混凝土结构或构件进行修复等。

## 1.2 混凝土结构的发展简况及其工程应用

混凝土结构是在 19 世纪中期开始得到应用的,与砌体结构、木结构、钢结构相比,它是一种出现较晚的结构形式。但是由于混凝土结构具有很多明显的优点,使其在各方面的应用发展很快,现已成为世界各国占主导地位的结构。

### 1.2.1 混凝土结构发展的几个阶段

混凝土结构的发展,大体上可分为三个阶段。

第一阶段是从钢筋混凝土发明至 20 世纪初。这一阶段所采用的钢筋和混凝土的强度都比较低,混凝土结构主要用来建造中小型楼板、梁、拱和基础等构件。其计算理论套用弹性理论,设计方法采用容许应力法。

第二阶段是从 20 世纪初到第二次世界大战前后。这一阶段混凝土和钢筋的强度有所提高,预应力混凝土结构的发明和应用,使钢筋混凝土被用于建造大跨度的空间结构。同时,开始进行混凝土结构的试验

研究,在计算理论上开始考虑材料的塑性,已开始按破损阶段计算结构的破坏承载力。

第三阶段是从第二次世界大战以后至今。这一阶段的特点是:随着高强混凝土和高强钢筋的出现,预制装配式混凝土结构、高效预应力混凝土结构、泵送商品混凝土以及各种新的施工技术等开始广泛地应用于各类土木工程,如超高层建筑、大跨度桥梁、高速铁路、地铁工程、跨海隧道、高耸结构等。在计算理论上已过渡到充分考虑混凝土和钢筋塑性的极限状态设计理论,在设计方法上已过渡到以概率理论为基础的多系数表达的设计公式。混凝土本构模型的研究以及计算机技术的发展,使人们可以利用非线性分析方法对各种复杂混凝土结构进行全过程受力模拟;而新型钢筋和混凝土材料以及复合结构的出现,又不断提出新的课题,并不断促进混凝土结构的发展。

## 1.2.2 混凝土结构的工程应用

### (1) 房屋建筑工程

在房屋建筑工程中,厂房、住宅、办公楼等多高层建筑广泛采用混凝土结构。在7层以下的多层房屋中,虽然墙体大多采用砌体结构,但其楼板几乎全部采用预制混凝土楼板或现浇混凝土楼盖。采用混凝土结构的高层和超高层建筑已十分普遍,美国芝加哥的威克·德赖夫大楼(高296 m,65层)、德国的密思埃姆大厦(高256 m,70层)、中国香港中心大厦(高374 m,78层)等都采用了混凝土结构,马来西亚吉隆坡高450 m的双塔大厦为钢筋混凝土结构。我国目前最高的钢筋混凝土建筑是广州的中天广场(高332 m,80层);上海环球金融中心是我国大陆目前最高的建筑(高492 m,地上101层),其主体结构为钢筋混凝土结构。

在大跨度建筑方面,预应力混凝土屋架、薄腹梁、V形折板、SP板、钢筋混凝土拱、薄壳等已得到广泛应用。例如,法国巴黎国家工业与发展技术展览中心大厅的平面为三角形,屋盖结构采用拱身为钢筋混凝土装配整体式薄壁结构的落地拱,跨度为206 m;美国旧金山地下展厅,采用钢筋混凝土拱16片,跨度为83.8 m;意大利都灵展览馆拱顶由装配式混凝土构件组成,跨度达95 m;澳大利亚悉尼歌剧院的主体结构由三组巨大的壳片组成,壳片曲率半径为76 m,建筑涂白色,状如帆船,已成为世界著名的风光建筑。

### (2) 桥梁工程

在桥梁建设方面,很大一部分中小跨度桥梁采用钢筋混凝土建造,结构形式有梁、拱、桁架等。一些大跨度桥虽已采用钢悬索或钢斜拉索,但其桥面结构也有用混凝土结构的。例如,洛阳黄河大桥,共67孔,由跨度为50 m的预应力混凝土简支梁组成。厦门高崎-集美跨海大桥,主跨46 m,桥体结构由平行的两个带翼箱形梁组成。由钢筋混凝土建造拱桥有较大优势,目前世界上跨度最大的混凝土拱桥是克罗地亚的克尔克1号桥,形式为敞肩拱桥,跨度达390 m。公路拱桥在我国应用也很广泛,1989年建成的涪陵岛江桥,全长351.8 m,主跨200 m,为拱结构,矢跨比为1/4,是我国跨度最大的拱桥之一。我国最大的铁路拱桥为丰沙线上的永定河7号桥,跨度达150 m。在我国西南交通干线上,有许多桥梁采用钢筋混凝土结构,如清水河大桥,主跨为72 m+128 m+72 m,为预应力连续刚架结构,其4号桥墩高100 m,是世界上最高的铁路桥墩。跨度超过500 m的大桥往往采用悬索桥或斜拉桥,但目前也常与混凝土结构混合使用。如香港的青马大桥,跨度1377 m,桥体为悬索结构,其中支承悬索的两端立塔高202 m,是混凝土结构;又如上海杨浦大桥,主跨602 m,为斜拉桥,其桥塔和桥面均为混凝土结构。

### (3) 特种结构与高耸结构

混凝土结构在道路、港口工程中也有大量应用,许多贮水池、贮仓构筑物、电线杆、上下水管道等均可见到混凝土结构的应用。由于滑模施工技术的发展,许多高耸建筑可以采用混凝土结构。加拿大多伦多电视塔,高549 m,是目前世界上最高的混凝土结构建筑物。其他混凝土结构高耸建筑物还有莫斯科奥斯坦金电视塔(高533.3 m)、天津电视塔(高415.2 m)、北京中央电视塔(高405 m)等。

### (4) 水利及其他工程

在水利工程中,因混凝土自重大,尤其其中砂石比例大,易于就地取材,故常用来修建大坝。例如,瑞士狄克桑斯坝,坝高285 m,坝顶宽15 m,坝底宽225 m,坝长695 m,库容量4亿 $m^3$ ,是目前世界上最高的重力坝。我国龙羊峡水电站拦河大坝为混凝土重力坝,坝高178 m,坝顶宽15 m,坝底宽80 m,坝长393.34 m。长江葛洲坝水利枢纽工程,发电能力271.5万千瓦,库容量15.8亿 $m^3$ ,整个工程混凝土用量

达 983 万  $\text{m}^3$ 。长江三峡水利枢纽工程,大坝高 186 m,坝体混凝土用量达 1527 万  $\text{m}^3$ ,是世界上最大的水利工程。

混凝土结构在其他特殊的工程结构中也有广泛的应用,如地下铁道的支护和站台工程、核电站的安全壳、机场的跑道、海上采油平台、填海造地工程等。

### 1.2.3 混凝土结构发展概况

混凝土已成为现代最主要的工程结构材料之一,中国更是广泛应用这一材料的国家之一。目前,我国水泥年产量已超过 10 亿吨,年混凝土用量已超过 20 亿  $\text{m}^3$ ,年钢筋用量接近 1 亿吨,混凝土结构在各类工程结构中占有主导地位。可以预见,今后混凝土仍将是一种重要的工程材料,并将在材料、结构、施工技术和计算理论等方面得到进一步发展。

#### (1) 材料方面

混凝土材料主要发展方向是高强、轻质、耐久、提高抗裂性和易于成型,而钢筋的发展方向是高强、较好的延性和较好的粘结锚固性能。

目前国内常用的混凝土强度等级为 20~50  $\text{N}/\text{mm}^2$ ,国外常用的强度等级为 60  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。在实验室内,我国已制成强度等级 100  $\text{N}/\text{mm}^2$  以上的混凝土,美国已制成 200  $\text{N}/\text{mm}^2$  的混凝土。今后常用的混凝土强度可达 100  $\text{N}/\text{mm}^2$ ,在特殊结构(如高耸、大跨、薄壁空间结构等)的应用中,可配制出 400  $\text{N}/\text{mm}^2$  的混凝土。

为了减轻混凝土结构的自重,国内外都在大力发展轻质混凝土。轻质混凝土主要采用轻质骨料,而轻质骨料主要有天然轻集料(浮石、凝灰岩等)、人造轻集料(页岩陶粒、黏土陶粒、膨胀珍珠岩等)和工业废料(炉渣、矿渣粉煤灰陶粒等)。轻质混凝土的容重一般为 14~18  $\text{kN}/\text{m}^3$ ,可在预制或现浇混凝土结构中使用。目前国外轻质混凝土的强度为 30~60  $\text{N}/\text{mm}^2$ ,国内轻质混凝土的强度为 20~40  $\text{N}/\text{mm}^2$ 。由轻质混凝土制成的结构自重可比普通混凝土减少 20%~30%,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,降低造价。利用建筑垃圾、工业废渣制作再生骨料的再生混凝土也已开始在工程中应用,这对实现资源的再生利用、保护环境有重要意义。

另外,为了提高混凝土的抗裂性和耐久性而掺入高分子化合物的混凝土,如浸渍混凝土、聚合物混凝土、树脂混凝土等,也将会得到发展和应用。实验室研究显示,这类混凝土不仅抗压强度高,抗拉性能也很好,而且耐磨、抗渗、抗冲击、耐冻等性能大大优于普通混凝土。纤维混凝土因改善了混凝土的抗裂性、耐磨性及延性,在一些有特殊要求的工程中已有较多应用。

外加剂的发明与应用对改善混凝土的性能起到了很大作用。目前的外加剂主要有四类:① 改善混凝土拌合物流动性的外加剂,如各种减水剂、增塑剂等;② 调节混凝土凝结时间的外加剂,如缓凝剂、早强剂、速凝剂等;③ 改善混凝土耐久性的外加剂,如引气剂、防水剂、阻锈剂等;④ 改善混凝土其他性能的外加剂,如加气剂、防冻剂、膨胀剂、着色剂等。可以预见,今后一段时间内各种高性能的外加剂还会源源不断地研制出来。

对于钢筋,主要是向高强并有较好延性、防腐、高粘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 800~1370  $\text{N}/\text{mm}^2$  的中强螺旋肋钢丝,在大跨度的预应力构件中采用强度为 1570~1960  $\text{N}/\text{mm}^2$  的高强钢丝和钢绞线。试验结果显示,中强和高强螺旋肋钢丝不仅强度高、延性好,而且与混凝土的粘结锚固性能也优于其他钢筋。为了提高钢筋的防腐性能,带有环氧树脂涂层的热轧钢筋已开始在某些有特殊防腐要求的工程中应用。

#### (2) 结构方面

预应力混凝土是 20 世纪工程结构的重大发明之一,现在已有先张法、后张法、无粘结预应力和体外张拉等技术,预应力技术将来还会有重大发展。在锚具方面将发展高效而耐久的锚具和夹具,在施加预应力方面也有新的技术出现,近期在国内外已研究将预应力用于组合结构。如体外张拉预应力筋的技术,初期只是用于结构的加固补强,因体外张拉预应力筋可以避免制孔、穿筋、灌浆等工序,并且发现问题时易于更换预应力筋,目前已开始应用于新建结构。在预制构件方面正在发展采用高强钢丝、钢绞线和高强度混凝土的大跨度高效预应力楼板,以适应大开间住宅的需要。

钢和混凝土组合结构近年来应用范围逐渐扩大,在约束混凝土概念的指导下,钢管混凝土柱、外包钢混凝土柱已在高层建筑、地下铁道、桥梁、火电厂厂房以及石油化工企业构筑物中大量应用。钢-混凝土组合梁、钢筋混凝土(劲性钢筋混凝土)构件,由于其具有强度高、截面小、延性好以及施工简化等优点,今后也将得到更加广泛的应用。

在工程结构实践的基础上,将会有更多的大型、巨型工程采用混凝土结构。

### (3) 施工技术方面

施工技术的改进对混凝土结构施工过程有很大作用。预应力技术的发明使混凝土结构的跨度大大增加,滑模施工法的发明使高耸结构和贮仓、水池等特种结构的施工进度大大加快,商品混凝土的应用和泵送混凝土技术的出现使高层建筑、大跨桥梁可以方便地整体浇筑,蒸汽养护法使预制构件成品出厂时间为缩短。另外,喷射混凝土、碾压混凝土等施工技术也日益广泛地应用于公路、水利工程当中。

在模板方面,除了目前使用的木模板、钢模板、竹模板、硬塑料模板外,今后将向多功能方向发展,如发展薄片、美观、廉价又能与混凝土牢固结合的永久性模板,使模板可以作为结构的一部分参与受力,还可省去装修工序。透水模板的使用,可以滤去混凝土中多余的水分,大大提高混凝土的密实性和耐久性。

在钢筋的绑扎成型方面,正在大力发展各种钢筋成型机械及绑扎机具,以减少大量的手工操作。在钢筋的连接方面,除了现有的绑扎搭接、焊接、螺栓连接及挤压连接方式外,随着化工胶结材料的发展,将来胶接方式也会有较大发展。

可以预见,今后混凝土结构的施工技术还将有很大的发展空间。

## 1.2.4 混凝土结构计算理论的发展概况

### (1) 混凝土结构计算理论发展概况

混凝土结构基本理论和设计方法也在不断发展中。早期由于混凝土结构材料的性能及其内在规律尚未被人们完全认识,多数国家采用以弹性理论为基础的容许应力设计方法。实践证明,这种设计方法和结构的实际情况有较大出入,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。

随着钢筋混凝土构件极限强度试验的进展,20世纪40年代出现了按破损阶段计算结构承载力的设计方法。这种方法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,比容许应力法前进了一步,但在总的安全系数的规定方面仍带有很大的经验性。

另外,对荷载和材料变异性的研究,使人们逐渐认识到各种荷载对结构产生的效应以及结构的抗力均非定值,并在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。这种设计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,结构或构件即丧失承载力或不能正常使用,而计算系数则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。由于这种方法概念较明确,比按破损阶段计算结构承载力的设计方法合理,到了20世纪70年代已为多数国家所接受。

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发展,提出了以失效概率来度量结构安全性的以概率理论为基础的极限状态设计方法。因为这种方法对各种荷载、材料强度的变异规律进行了大量的调查、统计和分析,各分项系数的确定比较合理,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。

### (2) 我国混凝土结构设计规范发展概况

作为反映我国混凝土结构学科水平的混凝土结构设计规范,也随着我国工程建设经验的积累、科研成果以及世界范围内技术的进步而不断改进。新中国成立初期,东北地区首先颁布了《建筑物结构设计暂行标准》,1955年又制定了《钢筋混凝土结构设计暂行规范》(规结6—55),采用了当时苏联规范中的按破损阶段计算结构承载力的设计方法,1966年颁布了《钢筋混凝土结构设计规范》(GBJ 21—66),采用了当时较为进步的以多系数表达的极限状态设计方法。在总结工程经验和科学研究成果的基础上,1974年编制了《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ 10—74),采用了多系数分析、单一系数表达的极限状态设计

方法。

20世纪70年代,为了解决各类材料的建筑结构可靠度的合理和统一问题,我国组织有关高校和科研、设计单位对荷载、材料性能及构件几何尺寸等设计基本变量进行了大量实测统计,并认真借鉴国外的先进经验,于1984年颁布了《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—84),规定了我国各种建筑结构设计规范均统一采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,从而把我国结构可靠度设计方法提高到了国际水平。在此基础上对《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ 10—74)进行了全面系统的修订,于1990年颁布了《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89)。20世纪90年代末,为适应我国混凝土结构的发展和新技术、新材料的应用,又对《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89)进行了系统修订,颁布了《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002),并明确了工程设计人员必须遵守的强制性条文。

进入21世纪,随着工程建设领域新材料和新技术的不断涌现,混凝土结构学科的研究也取得了新的进展。随着人民生活水平的不断提高,对建筑结构安全性、适用性、耐久性以及抵御各种灾害的要求也进一步提高。为了落实“节能、降耗、减排、环保”可持续发展的基本国策,我国近几年又组织有关高校、科研设计单位和建设单位对《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)进行了全面修订,并将颁布新的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)。新修订的规范反映了近十年来在工程建设中的新经验和混凝土结构学科新的科研成果,标志着我国混凝土结构的计算理论和设计水平又有了新的提高。

与《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)相比,新修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)从原来以构件设计为主适当扩展到整体结构的设计,增加了结构设计方案、结构抗倒塌设计和既有结构设计的内容,完善了耐久性设计方法。在材料方面将混凝土强度等级提高为C20~C80,混凝土结构中的非预应力钢筋以400 MPa级和500 MPa级作为主导钢筋,预应力钢筋以钢绞线和高强钢丝作为主导预应力筋。此外,还对结构和构件极限状态设计方法、各类构件的构造措施等进行了修订、补充和完善。本教材除了介绍混凝土结构材料性能和计算分析的基本原理外,在设计方法上将主要介绍新修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中的内容。

### 1.3 本课程的特点与学习方法

本课程从学习钢筋混凝土材料的力学性能和以概率理论为基础的极限状态设计方法开始,对各种钢筋混凝土构件的受力性能、设计计算方法及配筋构造进行探讨,如受弯构件正截面、斜截面承载力计算,受扭构件承载力计算,受压和受拉构件承载力计算,受弯构件变形和裂缝宽度验算,以及预应力混凝土构件的计算等,最后将学习钢筋混凝土楼盖设计方法和单层工业厂房、多层及高层建筑混凝土结构的设计方法。

学习本课程时应注意以下特点:

(1) 钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种力学性能不同的材料组成的复合材料,它与以往学过的材料力学中单一理想的弹性材料不同,所以材料力学中所学的公式在钢筋混凝土结构中可以直接应用的不多。为了对钢筋混凝土的受力性能和破坏特性有较好的了解,首先要掌握好钢筋和混凝土材料的力学性能。

(2) 钢筋混凝土既然是一种复合材料,就存在着两种材料的数量比例和强度搭配问题,超过一定范围,构件的受力性能就会发生改变,导致不能正常使用。以钢筋混凝土简支梁为例,随着受拉区配置的纵向受拉钢筋的增加,梁的破坏形态可能由受拉钢筋先屈服而变为受压区混凝土先压碎。

(3) 钢筋混凝土材料的力学性能和构件的计算方法都是建立在试验研究基础上的,许多计算公式都是在大量试验资料的基础上用统计分析方法得出的半理论半经验公式。这些公式的推导并不像数学公式或力学公式那样严谨,但却能较好地反映钢筋混凝土的真实受力情况。

(4) 学习本课程是为了在工程建设中进行混凝土结构的设计,它包括整体方案、材料选择、截面形式、配筋、构造措施等。结构设计是一个综合问题,要求做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量。同一构件在相同的荷载作用下,可以有不同的截面形式、尺寸、配筋方法及配筋数量,设计时需要进行综合分析,结合具体情况确定最佳方案,以获得良好的技术经济效果。因此,在学习过程中,要学会对多种因素进行综合分析的设计方法。



(5) 学习本课程时,要学会运用现行的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)。设计规范是国家颁布的有关设计计算和构造要求的技术规定和标准,规范条文尤其是强制性条文是设计中必须遵守的带有法律性的技术文件,这将使设计方法达到统一化和标准化,从而有效地贯彻国家的技术经济政策,保证工程质量。《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)是总结近年来全国高校和设计、科研单位的科研成果和工程实践经验,学习借鉴国外先进规范和经验,并广泛征求国内有关单位意见,经过反复修改而制定的,它代表了该学科在一个时期的技术水平。

因为科学技术水平和生产实践经验是不断发展的,所以设计规范也必然需要不断修订和补充。因此,要用发展的观点来看待设计规范,在学习和掌握钢筋混凝土结构理论和设计方法的同时,要善于观察和分析,不断地进行探索和创新。

混凝土结构是我国工程建设中应用最广泛的一种结构,在现代化建设事业中起着重要作用。随着改革开放的不断深入,中国的建筑业必将走向世界,因此应该大力开展混凝土结构的科学研究,努力提高生产技术水平,采用先进的设计理论,推广新材料、新工艺,使我国的混凝土结构理论和设计水平尽快达到国际先进水平。

### 本章小结

(1) 钢筋混凝土是把钢筋和混凝土这两种材料按照合理的方式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,充分发挥两种材料各自优点的一种复合材料。在混凝土中配置一定形式和数量的钢筋形成钢筋混凝土构件后,可以使构件的承载力得到较大幅度提高,构件的受力性能也得到显著改善。

(2) 钢筋和混凝土能够有效地结合在一起共同工作的主要原因有两点:一是钢筋和混凝土之间存在粘结力,使两者之间能传递力和变形;二是钢筋和混凝土两种材料的温度线膨胀系数接近。

(3) 钢筋混凝土结构的主要优点是材料利用合理,耐久性、耐火性、可模性、整体性好,易于就地取材等;主要缺点是结构自重大、抗裂性较差、一旦损坏修复比较困难、施工受季节环境影响较大等。

(4) 混凝土材料主要发展方向是高强、轻质、耐久、提高抗裂性和易于成型等,而钢筋的发展方向是高强、较好的延性和较好的粘结锚固性能等。

(5) 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)条文尤其是强制性条文是设计中必须遵守的带有法律性的技术文件,遵守《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)是为了使设计方法达到统一化和标准化,从而有效地贯彻国家的技术经济政策,保证工程质量。

### 思考题

- 1.1 在混凝土构件中配置一定形式和数量的钢筋有哪些作用?
- 1.2 钢筋和混凝土这两种不同材料能够有效地结合在一起共同工作的主要原因是什么?
- 1.3 钢筋混凝土结构有哪些优点和缺点?如何克服这些缺点?
- 1.4 试简述混凝土结构计算理论的发展过程。
- 1.5 学习混凝土结构课程时应注意哪些问题?