

服务热线: 400-615-1233

★ 配套精品教学资料包

www.huatengedu.com.cn

高等职业教育土建系列创新教材

高等职业教育土建系列创新教材

HUNNINGTU JIEGOU YU QITI JIEGOU

# 混凝土结构与砌体结构

HUNNINGTU JIEGOU YU QITI JIEGOU

# 混凝土结构与砌体结构

混凝土结构与砌体结构

AR (增强现实)

主 编 郭 梅 姜仁安  
主 审 崔 岩

策划编辑: 刘 建  
责任编辑: 高建华 贺兰晔  
封面设计: 于德梅



定价: 55.00元

中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

X-A

高等职业教育土建系列创新教材

# 混凝土结构与砌体结构

主 编 郭 梅 姜仁安  
副主编 张玉华 郑成艳  
主 审 崔 岩

 中国石油大学出版社  
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

山东·青岛

### 图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构与砌体结构/郭梅,姜仁安主编. —青岛:中国石油大学出版社, 2015. 8(2026. 2 重印)

ISBN 978-7-5636-4906-8

I. ①混… II. ①郭… ②姜… III. ①混凝土结构 ②砌体结构  
IV. ①TU37 ②TU209

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 185378 号

如有印装质量问题,请与中国石油大学出版社发行部联系。

服务电话:400-615-1233

书 名: 混凝土结构与砌体结构

HUNNINGTU JIEGOU YU QITI JIEGOU

主 编: 郭 梅 姜仁安

责任编辑: 高建华 贺兰曦

封面设计: 于德梅

出 版 者: 中国石油大学出版社

(地址:山东省青岛市黄岛区长江西路 66 号 邮编:266580)

网 址: <http://cbs.upc.edu.cn>

电子邮箱: [uppbook@upc.edu.cn](mailto:uppbook@upc.edu.cn)

排 版 者: 华腾教育排版中心

印 刷 者: 三河市长城印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 010-88433760)

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 19

字 数: 462 千

版 印 次: 2015 年 8 月第 1 版 2026 年 2 月第 4 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5636-4906-8

定 价: 55.00 元

# 前言

## Preface

近年来,随着我国建筑行业的飞速发展,工程建设的新材料、新技术、新工艺得到了广泛应用。为此,国家对建筑设计相关规范和标准进行了全面修订。本书按照高等职业教育建筑工程技术专业人才培养方案对“混凝土结构与砌体结构”课程的基本要求,依据我国现行的最新结构设计规范和标准编写而成。

本书主要依据的国家现行规范和标准有《混凝土结构设计标准(2024年版)》(GB/T 50010—2010)、《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012)、《冷轧带肋钢筋混凝土结构技术规程》(JGJ 95—2011)、《砌体结构工程施工质量验收规范》(GB 50203—2011)、《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)、《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)。

本书力求适应社会需求和新时期高等职业教育的特点,体现职业岗位所需要的知识和能力要求。以工程应用为主旨,在内容的选取上突出适用性和实用性,注重学生职业技能的培养。

本书推荐学时安排见下表:

项 目	内 容	学 时
第 1 篇 混凝土结构		
1	混凝土结构的基础知识	4
2	混凝土及砌体结构的设计方法	2
3	钢筋混凝土受弯构件	20
4	钢筋混凝土受扭构件	4
5	钢筋混凝土受压构件	12
6	钢筋混凝土受拉构件	4
7	预应力混凝土结构构件	4
第 2 篇 砌体结构		
8	砌体及其力学性能	4
9	砌体结构承载力计算	4
10	砌体结构房屋的设计	6
总计		64



## 前 言

本书由吉林交通职业技术学院郭梅、姜仁安任主编，吉林交通职业技术学院张玉华、郑成艳任副主编，中国市政工程东北设计研究总院有限公司张乃新，中水东北勘测设计研究有限责任公司郭春、尹一光，吉林交通职业技术学院刘仲波参与了编写工作。具体编写分工如下：姜仁安编写项目 1、项目 2、项目 5，郭梅编写项目 3、项目 4 的工作任务 4.1 和工作任务 4.2，郑成艳编写项目 4 的工作任务 4.3 和工作任务 4.4、项目 8，郭春编写项目 6 和项目 9，尹一光编写项目 7，张乃新编写项目 10 的工作任务 10.1 和工作任务 10.3，张玉华、刘仲波共同编写项目 10 的工作任务 10.2。本书由吉林交通职业技术学院崔岩教授主审。

本书在编写过程中参考了国内同行的教材和专著，在此向各位作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

## Contents

### — 第 1 篇 混凝土结构 —

<b>项目 1</b>	<b>混凝土结构的基础知识</b> .....	3
工作任务 1.1	钢筋混凝土的工作原理与结构特点 .....	3
1.1.1	钢筋与混凝土共同工作的原理 .....	3
1.1.2	钢筋混凝土结构的特点 .....	4
	学习评价 .....	4
工作任务 1.2	混凝土结构的物理力学性能 .....	5
1.2.1	混凝土的强度 .....	6
1.2.2	混凝土的变形 .....	10
	学习评价 .....	16
工作任务 1.3	钢筋的物理力学性能 .....	16
1.3.1	钢筋的种类 .....	17
1.3.2	钢筋的强度和变形 .....	18
1.3.3	钢筋的接头、弯钩和弯折 .....	22
1.3.4	混凝土结构对钢筋性能的要求 .....	25
	学习评价 .....	25
工作任务 1.4	钢筋与混凝土的相互作用——黏结力 .....	26
1.4.1	黏结力的测定 .....	27
1.4.2	影响黏结强度的因素 .....	27
1.4.3	纵向受拉钢筋的基本锚固长度 .....	28
	学习评价 .....	28
<b>项目 2</b>	<b>混凝土及砌体结构的设计方法</b> .....	29
工作任务 2.1	结构上的作用 .....	29
2.1.1	结构上的作用的定义 .....	29
2.1.2	结构上的作用的分类 .....	30
	学习评价 .....	31



工作任务 2.2 极限状态法 ..... 31

    2.2.1 建筑结构的性能要求 ..... 31

    2.2.2 极限状态的种类 ..... 32

    2.2.3 两类极限状态的表达式 ..... 32

    学习评价 ..... 36

**项目 3 钢筋混凝土受弯构件..... 37**

工作任务 3.1 受弯构件正截面承载力计算 ..... 37

    3.1.1 受弯构件的一般构造要求 ..... 37

    3.1.2 受弯构件正截面承载力的试验分析 ..... 41

    3.1.3 受弯构件正截面承载力的计算原理 ..... 46

    3.1.4 不同形式截面受弯构件的正截面承载力计算 ..... 48

    学习评价 ..... 68

工作任务 3.2 受弯构件斜截面承载力计算 ..... 68

    3.2.1 受弯构件斜截面的破坏形态 ..... 69

    3.2.2 受弯构件斜截面受剪承载力的影响因素 ..... 71

    3.2.3 受弯构件斜截面受剪承载力的计算原理 ..... 72

    3.2.4 受弯构件斜截面受剪承载力的计算方法 ..... 75

    3.2.5 受弯承载力的要求与构造措施 ..... 78

    学习评价 ..... 85

工作任务 3.3 受弯构件正常使用极限状态验算 ..... 85

    3.3.1 受弯构件的抗裂性验算 ..... 86

    3.3.2 钢筋混凝土构件的裂缝宽度验算 ..... 88

    3.3.3 钢筋混凝土构件的变形验算 ..... 92

    3.3.4 混凝土结构的耐久性设计 ..... 95

    学习评价 ..... 98

**项目 4 钢筋混凝土受扭构件..... 99**

工作任务 4.1 受扭构件的分类 ..... 99

    学习评价 ..... 100

工作任务 4.2 受扭构件的试验研究 ..... 100

    4.2.1 受扭构件概述 ..... 101

    4.2.2 受扭构件出现裂缝前后的性能 ..... 101

    4.2.3 受扭构件破坏的形态 ..... 103

    学习评价 ..... 106

工作任务 4.3 受扭构件的承载力计算 ..... 106

    4.3.1 素混凝土受扭构件的受力性能 ..... 107

    4.3.2 钢筋混凝土受扭构件的承载力计算 ..... 108

    4.3.3 剪扭和弯扭构件的承载力计算 ..... 109

    学习评价 ..... 112



工作任务 4.4	受扭构件的构造要求及设计	112
4.4.1	受扭构件的构造要求	113
4.4.2	受扭构件的设计举例	113
	学习评价	116
<b>项目 5</b>	<b>钢筋混凝土受压构件</b>	<b>117</b>
工作任务 5.1	受压构件概述	117
5.1.1	受压构件的分类	117
5.1.2	受压构件材料的强度等级	118
5.1.3	受压构件的截面形式和尺寸	118
5.1.4	受压构件配筋的构造要求	119
	学习评价	120
工作任务 5.2	轴心受压构件正截面承载力计算	121
5.2.1	普通箍筋柱的设计	121
5.2.2	间接钢筋柱的设计	125
	学习评价	128
工作任务 5.3	偏心受压构件正截面承载力计算	128
5.3.1	偏心受压构件正截面承载力计算概述	129
5.3.2	矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	133
5.3.3	非对称配筋截面的承载力计算	135
5.3.4	对称配筋截面的承载力计算	144
	学习评价	148
<b>项目 6</b>	<b>钢筋混凝土受拉构件</b>	<b>149</b>
工作任务 6.1	受拉构件概述	149
	学习评价	150
工作任务 6.2	轴心受拉构件承载力计算及构造要求	150
6.2.1	轴心受拉构件承载力计算	150
6.2.2	轴心受拉构件的构造要求	151
	学习评价	151
工作任务 6.3	偏心受拉构件正截面承载力计算	151
6.3.1	偏心受拉构件的受力界限	152
6.3.2	小偏心受拉构件正截面承载力计算	153
6.3.3	大偏心受拉构件正截面承载力计算	154
	学习评价	157
工作任务 6.4	偏心受拉构件斜截面承载力计算	157
	学习评价	159
<b>项目 7</b>	<b>预应力混凝土结构构件</b>	<b>161</b>
工作任务 7.1	预应力混凝土结构构件的基础知识	161
7.1.1	预应力混凝土结构概述	161



7.1.2	裂缝控制等级及预应力混凝土结构的分类	163
7.1.3	张拉预应力筋的方法	164
7.1.4	预应力混凝土结构的材料及锚夹工具	166
	学习评价	170
工作任务 7.2	张拉控制应力及预应力损失	170
7.2.1	张拉控制应力	171
7.2.2	预应力损失的种类	171
7.2.3	预应力损失值的组合	177
	学习评价	178

## 第 2 篇 砌体结构

### 项目 8 砌体及其力学性能 181

工作任务 8.1	砌体材料	181
8.1.1	块材	181
8.1.2	砂浆	185
	学习评价	192
工作任务 8.2	砌体分类	192
8.2.1	无筋砌体	193
8.2.2	配筋砌体	195
8.2.3	预应力砌体	197
	学习评价	200
工作任务 8.3	砌体的力学性能	200
8.3.1	砌体的受压性能	201
8.3.2	砌体的轴心受拉、弯曲受拉和受剪性能	208
8.3.3	砌体的变形性能	209
	学习评价	210

### 项目 9 砌体结构承载力计算 211

工作任务 9.1	无筋砌体结构承载力计算	211
9.1.1	受压构件承载力计算	211
9.1.2	局部受压承载力计算	216
9.1.3	轴心受拉、受弯和受剪构件的承载力计算	223
	学习评价	224
工作任务 9.2	配筋砌体结构承载力计算	225
9.2.1	网状配筋砖砌体受压构件	225
9.2.2	组合砖砌体受压构件	228
9.2.3	配筋砌块砌体构件	233
	学习评价	235



<b>项目 10 砌体结构房屋的设计</b> .....	237
工作任务 10.1 混合结构房屋的墙柱设计 .....	237
10.1.1 混合结构房屋的结构布置 .....	237
10.1.2 混合结构房屋的墙体设计 .....	244
10.1.3 墙、柱的高厚比 .....	257
10.1.4 砌体墙柱的构造要求 .....	262
学习评价 .....	268
工作任务 10.2 过梁、圈梁、墙梁及挑梁 .....	269
10.2.1 过梁的类型及承载力计算 .....	269
10.2.2 圈梁的设置及构造要求 .....	272
10.2.3 墙梁的破坏形态及构造要求 .....	274
10.2.4 挑梁的破坏形态及构造要求 .....	282
学习评价 .....	284
工作任务 10.3 砌体结构房屋的抗震设计 .....	285
10.3.1 砌体结构房屋震害分析 .....	286
10.3.2 砌体结构房屋抗震构造措施 .....	287
学习评价 .....	295
<b>参考文献</b> .....	296



# 第

# 1

## 篇 混凝土结构

- 项目 1 混凝土结构的基础知识
- 项目 2 混凝土及砌体结构的设计方法
- 项目 3 钢筋混凝土受弯构件
- 项目 4 钢筋混凝土受扭构件
- 项目 5 钢筋混凝土受压构件
- 项目 6 钢筋混凝土受拉构件
- 项目 7 预应力混凝土结构构件

钢筋混凝土结构是指在混凝土结构中配置受力的普通钢筋、钢筋网或钢筋骨架而形成的结构，该结构被广泛用于建筑、桥梁、隧道、矿井及水利、海港等工程。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，该结构主要用于对抗裂和刚度要求较高的大跨结构，如桥梁、水利、海洋及港口工程等。钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构是工程中应用最为广泛的混凝土结构。



# 项目 1 混凝土结构的基础知识

## 工作任务 1.1 钢筋混凝土的工作原理与结构特点

### 学习目标

- (1) 认知钢筋混凝土的结构组成。
- (2) 掌握钢筋与混凝土共同工作的原理。
- (3) 了解钢筋混凝土结构的优缺点。

### 学习描述

本任务的目的是认知混凝土的基本特点，主要掌握钢筋混凝土的概念、钢筋与混凝土共同工作的原理及钢筋混凝土结构的优缺点。任务完成的标准是能够正确叙述钢筋和混凝土共同工作的原理及钢筋混凝土结构的优缺点。

### 学习引导

本工作任务应按照如下流程进行学习：



钢筋混凝土是由两种力学性能不同的材料（钢筋和混凝土）结合而成的、共同发挥作用的一种建筑材料。钢筋的抗拉强度和抗压强度都很高，破坏时表现出良好的变形能力。混凝土的抗压强度很高而抗拉强度很低，受拉破坏前无预兆，具有明显的脆性性质。将这两种材料进行有机组合，充分发挥各自的长处，可以创造出多种形式的复合材料，满足各种不同的受力要求，取得较好的综合经济效益。

### 1.1.1 钢筋与混凝土共同工作的原理

钢筋与混凝土共同工作的原理如下：

- (1) 混凝土干缩硬化后能产生较大的黏结力（握裹力），由于黏结力的存在使两者可靠地结合为一个整体，在荷载的作用下共同工作、协调变形。



(2) 钢筋的温度线膨胀系数与混凝土的温度线膨胀系数较为接近(钢筋为 $1.2 \times 10^{-5}$ , 混凝土为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$ )。当温度变化时,这两种材料不会产生较大的相对变形,即不会产生较大的内应力。

(3) 钢筋被混凝土包裹,免遭锈蚀,使钢筋混凝土结构具有较好的耐久性。水泥水化作用后发生碱性反应,在钢筋表面生成一种水泥石质薄膜,可以阻止有害介质的侵蚀。

### 1.1.2 钢筋混凝土结构的特点

#### 1. 钢筋混凝土结构的优点

钢筋混凝土结构具有以下优点:

(1) 耐久性好。与钢结构相比,钢筋混凝土结构具有较好的耐久性,不需要经常地保养与维护。因为在钢筋混凝土结构中混凝土的强度会随时间的增长而略有提高。对于在有侵蚀介质存在的环境中工作的钢筋混凝土结构,可根据侵蚀的性质合理地选用不同品种的水泥,以达到提高耐久性的目的。一般火山灰水泥和矿渣水泥的抗硫酸盐侵蚀的能力很强,可在有硫酸盐腐蚀的环境中使用。另外,矿渣水泥的抗碱腐蚀能力也很强,可在碱腐蚀的环境中使用。

(2) 耐火性好。相对于钢结构和木结构而言,钢筋混凝土结构具有较好的耐火性。在钢筋混凝土结构中,由于钢筋被包裹在混凝土的里面,因此发生火灾时钢筋不至于很快达到流塑状态而使结构整体破坏。

(3) 整体性、刚性好。相对于砌体结构而言,钢筋混凝土结构具有较好的整体性,适用于抗震、抗爆结构。另外,钢筋混凝土结构的刚性较好,受力后变形小。

(4) 取材容易。混凝土所用的砂、石一般可就地取材,还可利用工业材料制成人造集料,用于混凝土中。

(5) 可模性好。根据结构方面的要求,可将钢筋混凝土结构浇筑成设计所要求的形式。

#### 2. 钢筋混凝土结构的缺点

钢筋混凝土结构除了具有以上优点外,还存在以下缺点:

(1) 结构自重大。钢筋混凝土结构的自重大,截面尺寸也较大,当达到一定跨径时,承受荷载的能力会显著降低。

(2) 抗裂性能差。混凝土的抗拉强度很低,在使用阶段构件一般是带裂缝工作的,因此构件的刚度和耐久性都会给钢筋混凝土结构带来不利影响。

(3) 浇筑混凝土时需要大量的模板。

(4) 在户外浇筑混凝土时受季节及天气条件的限制,在冬季及雨季进行混凝土施工时必须对混凝土浇筑、振捣和养生等工艺采取相应的措施,以确保施工质量。

(5) 新旧混凝土不易形成整体。钢筋混凝土结构一旦被破坏,修补和加固都比较困难。



### 学习评价

通过以上任务的学习,回答下列问题:

(1) 钢筋和混凝土两种力学性质不同的材料能结合在一起共同工作的原理是什么?

- (2) 钢筋混凝土结构的优点有哪些?
- (3) 钢筋混凝土结构的缺点有哪些?

## 工作任务 1.2 混凝土结构的物理力学性能

### 学习目标

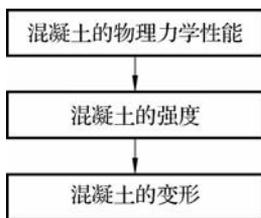
- (1) 掌握立方体抗压强度、混凝土轴心抗压强度及混凝土轴心抗拉强度等的规定。
- (2) 会查混凝土的强度标准值与设计值表。
- (3) 掌握混凝土变形的种类及每种变形产生的原因、特点。

### 学习描述

本任务的目的是掌握混凝土结构的物理力学性能, 主要掌握有关立方体抗压强度、混凝土轴心抗压强度及混凝土轴心抗拉强度等的规定, 混凝土强度表的使用, 一次短期加载作用下的变形, 长期加载作用下的变形, 重复加载作用下的变形, 混凝土收缩的作用原理。任务完成的标准是掌握混凝土的物理力学指标及性能, 并能熟练叙述。

### 学习引导

本工作任务应按照如下流程进行学习:



混凝土的强度是混凝土的重要力学性能指标, 是设计混凝土结构的重要依据, 它直接影响到混凝土结构的安全性和耐久性。在设计施工中常用的混凝土强度可分为立方体抗压强度、混凝土轴心抗压强度及混凝土轴心抗拉强度等。

在实际工程中, 单向受力的构件是极少见的, 一般均处于复合应力状态。对于复合应力作用下的混凝土的强度应引起足够的重视。研究复合应力作用下的混凝土的强度必须以单向应力作用下的强度为基础, 由于复合应力作用下混凝土的强度试验需要复杂的设备, 理论分析也比较困难, 还处于研究阶段, 因此, 单向受力状态下混凝土的强度指标就显得非常重要, 因为它是结构构件分析及建立强度理论公式的重要依据。

另外, 普通混凝土是由水泥、砂、石用水拌和硬化后形成的人工石材, 是多相复合材料。混凝土中的砂、石、水泥胶体组成了弹性骨架, 主要承受外力, 并使混凝土具有弹性变形的特点。水泥胶体中的凝胶、孔隙和界面初始的微裂缝等在外力作用下会使混凝土产生塑性变形。而混凝土中的孔隙、界面微裂缝等缺陷又往往是混凝土受力破坏的原因。由于水泥胶体的硬化过程需要多年才能完成, 因此混凝土的强度和变形也会随时间而逐渐



增长。

混凝土的变形通常分为两类：一类是荷载作用下的受力变形，包括一次短期加载作用下的变形、长期加载作用下的变形和重复加载作用下的变形；另一类是体积变形，包括收缩、膨胀和温度变形。

### 1.2.1 混凝土的强度

#### 1. 立方体抗压强度

##### 1) 概念

由于混凝土的强度不仅与水泥强度等级、水灰比关系密切，而且受到集料的性质、混凝土的级配、混凝土成型方法、硬化时的环境条件及混凝土的龄期等不同程度的影响，同时，试件的大小和形状、试验方法、加载速率也影响着混凝土强度的试验结果，因此，各国对各种单向受力状态下的混凝土强度都规定了标准试验方法。我国采用边长为 150 mm 的立方体作为混凝土抗压强度的标准尺寸试件，并以立方体抗压强度作为混凝土各种力学指标的代表值。《混凝土结构设计标准（2024 年版）》（GB/T 50010—2010）规定以边长为 150 mm 的立方体，在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度和相对湿度在 90% 以上的潮湿空气中养护 28 d，依照标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度（以  $\text{N}/\text{mm}^2$  计，即 MPa）作为混凝土的强度等级，并用符号  $f_{\text{cu},k}$  表示。立方体抗压强度是在实验室条件下取得的抗压强度。

##### 2) 强度等级的划分及有关规定

混凝土强度等级应按立方体抗压强度标准值确定。混凝土强度等级划分为 C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75 和 C80，共 14 个等级。例如，C30 表示立方体抗压强度标准值为  $30\text{ N}/\text{mm}^2$ 。其中，C50 以下为普通混凝土，C50~C80 为高强度混凝土。钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C25；采用强度等级 500 MPa 及以上的钢筋时，混凝土强度等级不应低于 C30。预应力混凝土楼板结构的混凝土强度等级不应低于 C30，其他预应力混凝土结构构件的混凝土强度等级不应低于 C40。当采用钢绞线、钢丝、热处理钢筋作为预应力筋时，混凝土强度等级不得低于 C40。

##### 3) 试验方法对立方体抗压强度的影响

试件在试验机上受压时，纵向压缩，横向膨胀，由于混凝土与压力机垫板在弹性模量及横向变形上存在差异，使得压力机垫板的横向变形明显小于混凝土的横向变形。当试件承压接触面上不涂润滑剂时，混凝土的横向变形由于受到摩擦力的约束而形成套箍作用，如图 1-1（a）所示。在套箍的作用下，试件与垫板接触面的局部混凝土处于三向受压应力状态，试件破坏时将形成两个对顶的角锥形破坏面，如图 1-1（b）所示，表明试件是被压坏的。若在试件承压面上涂一些润滑剂，则试件与压力机垫板间的摩擦力将大大减小，由于横向变形使混凝土产生横向拉力，因此试件将沿着力的作用方向平行地产生几条裂缝而破坏，如图 1-1（c）所示。此时，测得的抗压极限强度较低。《混凝土结构试验方法标准》（GB/T 50152—2012）规定的标准试验方法是不涂润滑剂的。

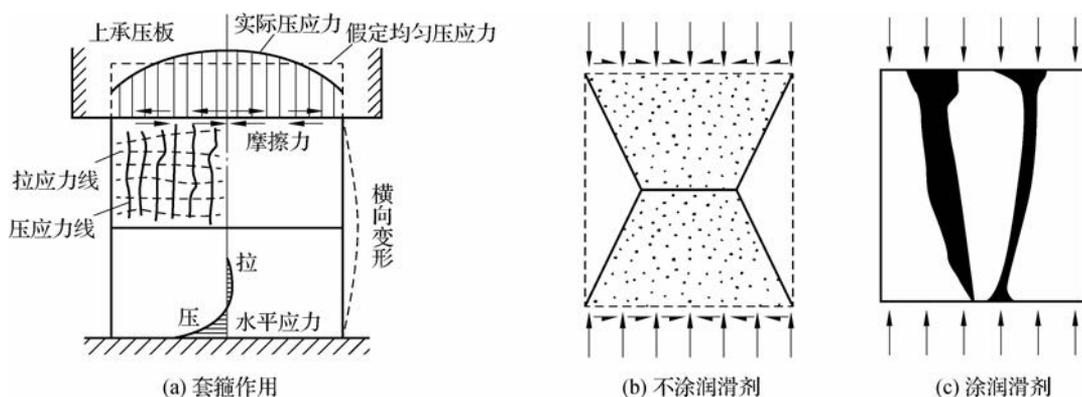


图 1-1 混凝土立方体的破坏情况

#### 4) 加载速度对立方体抗压强度的影响

加载速度越快，测得的立方体抗压强度越高。通常规定的加载速度如下：

- (1) 当混凝土强度等级低于 C30 时，取每秒钟  $0.3 \sim 0.5 \text{ N/mm}^2$ 。
- (2) 当混凝土强度等级高于或等于 C30 时，取每秒钟  $0.5 \sim 0.8 \text{ N/mm}^2$ 。
- (3) 当混凝土强度等级高于 C60 时，取每秒钟  $0.8 \text{ N/mm}^2$ 。

#### 5) 龄期对立方体抗压强度的影响

混凝土的立方体抗压强度随着成型后混凝土的龄期逐渐增大，开始时增长速度较快，后来逐渐变慢，强度的增长过程往往要延续几年，在潮湿环境中时间会更长。

#### 6) 尺寸效应

立方体尺寸越小则试验测出的抗压强度就越高，对此现象有多种不同的原因分析和理论解释。一种观点认为是材料自身的原因，认为与试件内部缺陷（裂纹）的分布，粗、细粒径的大小和分布，材料内摩擦角的不同和分布，试件表面与内部硬化程度有差异等因素有关。另一种观点认为是试验方法的原因，认为与试块受压面与试验机之间的摩擦力分布（四周较大，中央较小）、试验机垫板的刚度有关。过去我国曾长期采用边长为 200 mm 的立方体作为标准试件，在试验研究中则采用边长为 100 mm 的立方体试件。用这两种尺寸试件测得的强度与用边长为 150 mm 立方体标准试件测得的强度有一定的差异，这归结于尺寸效应的影响。所以，非标准试件强度应乘以一个换算系数换算成标准试件强度。根据《混凝土结构试验方法标准》（GB/T 50152—2012）的规定，现测定立方体强度时所采用的立方体试件的边长为 150 mm。若采用边长为 200 mm 或 100 mm 的立方体试块，则其换算系数分别取 1.05 或 0.95。

## 2. 混凝土轴心抗压强度

由于实际的结构和构件往往不是立方体，而是棱柱体，因此用棱柱体试件比用立方体试件更能很好地反映混凝土的实际抗压能力。试验证明，轴心抗压钢筋混凝土短柱中的混凝土抗压强度基本上和棱柱体的抗压强度相同，因此，可以用棱柱体测得的抗压强度作为轴心抗压强度，又称为棱柱体抗压强度。《混凝土结构试验方法标准》（GB/T 50152—2012）规定以  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  的棱柱体试件试验测得的具有 95% 保证率的抗压强度作为混凝土轴心抗压强度标准值，用符号  $f_{ck}$  表示。混凝土轴心抗压强度设计值用



符号  $f_c$  表示。棱柱体试件与立方体试件的制作条件相同，即试件的上下表面都不涂润滑剂。实测的棱柱体试件的抗压强度都比立方体的抗压强度值低，并且棱柱体试件的高宽比越大，强度越小。混凝土轴心抗压强度随着混凝土强度等级的提高而增大，总的趋势是混凝土轴心抗压强度与混凝土强度成正比。

### 3. 混凝土轴心抗拉强度

混凝土轴心抗拉强度是混凝土的基本力学指标之一，可用其间接地衡量混凝土的冲切强度等其他力学性能。混凝土轴心抗拉强度只有立方体抗压强度的  $1/18 \sim 1/8$ ，混凝土强度等级越高，这个比值越小。混凝土的轴心抗拉强度取决于水泥石的强度和水泥石与集料的黏结强度。采用表面粗糙的集料及较好的养护条件可以提高混凝土的轴心抗拉强度。

在进行混凝土结构强度计算时，认为受拉区混凝土开裂后退出工作，拉力全部由钢筋来承受，此时研究混凝土的抗拉强度没有实际意义。但是对于不允许出现裂缝的结构，就应该考虑混凝土的抗拉能力，并以混凝土的轴心抗拉极限强度作为混凝土抗裂强度的重要指标。

轴心抗拉强度标准值  $f_{tk}$  可采用图 1-2 所示的试验方法来测定。试件是尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$  的柱体，两端埋有伸出长度为  $150 \text{ mm}$  的变形钢筋（钢筋直径  $d=16 \text{ mm}$ ），钢筋位于试件轴线上。试验机夹紧两端伸出的钢筋，对试件施加拉力，破坏时裂缝产生在试件的中部，单位时间的平均破坏应力为轴心抗拉强度。由于混凝土内部的不均匀性，加之安装试件的偏差等原因，用这种方法很难准确地测定混凝土轴心抗拉强度，因此，国内外也常用图 1-3 所示的圆柱体或立方体的劈裂试验来间接测定混凝土的轴心抗拉强度标准值。混凝土轴心抗拉强度设计值用符号  $f_t$  表示。

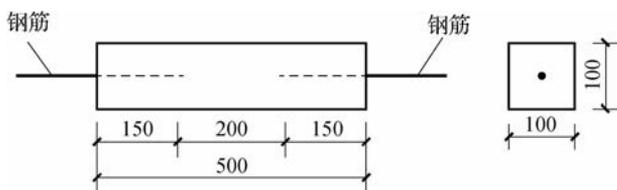
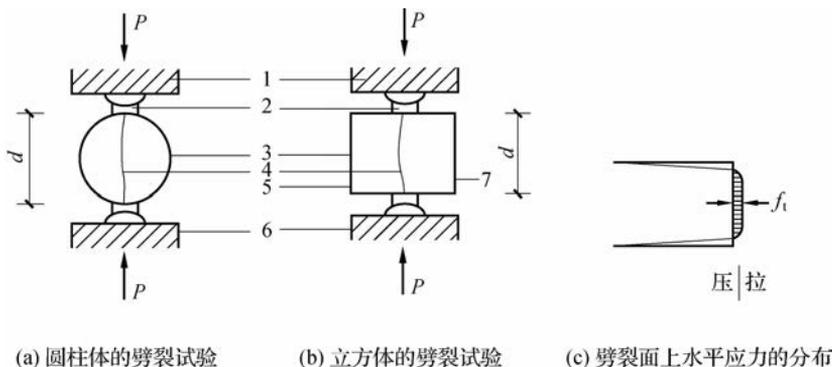


图 1-2 混凝土直接受拉试验



(a) 圆柱体的劈裂试验 (b) 立方体的劈裂试验 (c) 劈裂面上水平应力的分布

图 1-3 混凝土的劈裂试验及其应力分布

1—压力机的上压板；2—弧形垫条及垫层各一条；3—试件；4—试件破裂线；  
5—浇模顶面；6—压力机的下压板；7—浇模底面

在立方体或圆柱体上加垫条，在垫条上施加一条压力线荷载，这样在试件中间垂直截面上除加力点附近很小的范围外，均有均匀分布的水平拉应力存在。当拉应力达到混凝土的抗拉强度时，试件被劈成两半。根据弹性理论，劈裂抗拉强度  $f_{t,s}$  可按式 (1-1) 计算。

$$f_{t,s} = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1-1)$$

式中， $P$  为破坏荷载； $d$  为圆柱体的直径或立方体的边长； $l$  为试件的长度。

试验结果表明，混凝土的劈裂强度除与试件尺寸等因素有关外，还与垫条的宽度和材料特性有关。加大垫条的宽度可使实测劈裂强度提高，一般认为垫条的宽度应不小于立方体试件边长或圆柱体试件直径的  $1/10$ 。国内外的大多数试验资料表明混凝土的劈裂抗拉强度略高于轴心抗拉强度，考虑到国内外对比资料的具体条件不完全相同，且目前我国尚未建立混凝土劈裂试验的统一标准，因此，通常认为混凝土的轴心抗拉强度与劈裂抗拉强度基本相同。

#### 4. 混凝土强度设计值和标准值

取用混凝土强度设计值和标准值时查表 1-1。

表 1-1 混凝土强度设计值和标准值

单位：N/mm<sup>2</sup>

强度值种类		混凝土强度等级													
		C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
设计值	$f_c$	7.2	9.6	11.9	14.3	16.7	19.1	21.1	23.1	25.3	27.5	29.7	31.8	33.8	35.9
	$f_t$	0.91	1.10	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80	1.89	1.96	2.04	2.09	2.14	2.18	2.22
标准值	$f_{ck}$	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
	$f_{tk}$	1.27	1.54	1.78	2.01	2.20	2.39	2.51	2.64	2.74	2.85	2.93	2.99	3.05	3.11

注 1：计算现浇钢筋混凝土轴心受压及偏心受压构件时，如截面的长边或直径小于 300 mm，则表中混凝土的强度设计值应乘以系数 0.8；当构件质量（如混凝土成型、截面和轴线尺寸等）确有保证时，可不受此限制。

注 2：离心混凝土的强度设计值应按专门标准取用。

#### 5. 混凝土在复合应力作用下的强度

混凝土结构和构件通常受到轴力、弯矩、剪力和扭矩的不同组合作用，如框架梁、柱既受到柱的轴向力作用，又受到弯矩和剪力的作用。节点区混凝土的受力状态一般更为复杂，所以分析混凝土在复合应力作用下的强度很有必要，它对认识混凝土的强度理论具有重要的意义。

##### 1) 双向应力状态下混凝土的强度

如图 1-4 所示，在两个相互垂直的平面上作用着法向应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ，在第三个平面上应力为零的双向应力状态下，混凝土的强度变化特点如下：

(1) 双向受拉状态。第 I 象限为双向受拉区， $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  相互影响不大，即不同应力比值  $\sigma_1/\sigma_2$  下的双向受拉强度均接近于单向受拉强度。

(2) 双向受压状态。第 III 象限为双向受压区，大体上是一个方向的强度随另一个方向压力的增加而增加。这是由于一个方向的压应力对另一个方向压应力引起的横向变形起到了一定的约束作用，限制了试件内部混凝土微裂缝的扩展，使混凝土的抗压强度得到提高。当  $\sigma_1/\sigma_2 \approx 2$  或 0.5 时，混凝土双向受压强度比单向受压强度提高 25% 左右。当  $\sigma_1/\sigma_2 = 1$  时，



混凝土双向受压强度比单向受压强度提高 16% 左右。

(3) 拉-压应力状态。第 II、IV 象限为拉-压应力状态，此时混凝土的强度均低于单向拉伸或压缩时的强度。这是由于试件在一个平面上受拉，在另一个平面上受压，其相互作用的结果助长了试件的横向变形，加速了混凝土内部微裂缝的发展，降低了混凝土的强度。

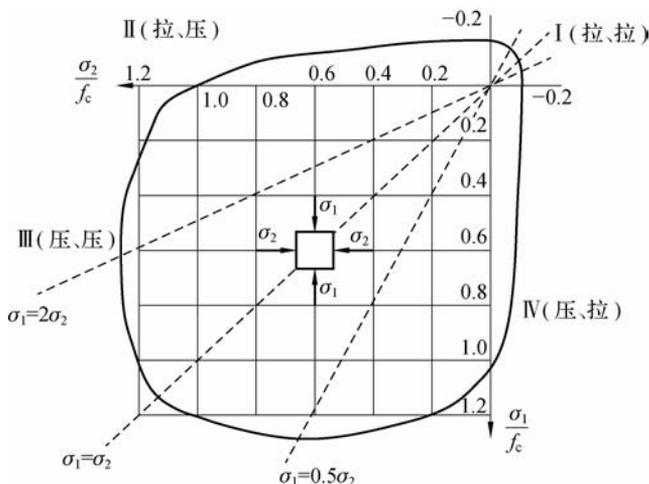


图 1-4 双向应力状态下混凝土的强度变化曲线

## 2) 三向受压状态下混凝土的强度

混凝土在三向受压的状态下，由于受到侧向压力的约束作用，最大主压应力轴的抗压强度有较大幅度的增长，其变化规律随两个侧向压应力 ( $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ ) 比值的大小而不同。混凝土在三向受压时，其最大主压应力方向的抗压强度的大小取决于侧向压应力的约束程度，随着侧向压应力的增大，微裂缝的发展受到了极大的限制，从而大大提高了混凝土的纵向抗压强度，并使混凝土的变形性能接近理想的弹塑性体。例如，采用钢管混凝土柱、螺旋箍筋柱等能有效约束混凝土的侧向变形，使混凝土的抗压强度、延性（耐受变形的能力）得到相应的提高。常规的三向受压试验是在圆柱体周围加液压、在两侧向等压的情况下进行的。由试验得到的经验公式为

$$f_{cc} = f_{cl} + K\sigma_r \quad (1-2)$$

式中， $f_{cc}$  为三向受压时的混凝土轴心抗压强度； $f_{cl}$  为无侧向压力约束试件的轴心抗压强度； $K$  为侧向压应力系数，当侧向压应力较低时， $K$  值较大，由试验资料得出  $K = 4.5 \sim 7.0$ ； $\sigma_r$  为侧向约束压应力。

## 1.2.2 混凝土的变形

### 1. 一次短期加载作用下混凝土的变形

对混凝土进行短期单向施加压力所获得的应力-应变关系曲线即为混凝土单轴受压的应力-应变关系曲线 ( $\sigma$ - $\epsilon$  曲线)，如图 1-5 所示，它能反映混凝土受力全过程的重要力学特征和基本力学性能，是研究混凝土结构强度理论的必要依据，也是对混凝土进行非线性分

析的重要基础。一次短期加载作用下混凝土的变形一般用棱柱体试件来测试。

一次短期加载是指荷载从零开始单调增加至试件破坏，也称单调加载。从图 1-5 中可以看出全曲线包括上升段和下降段两部分，以 C 点为分界点，每部分由三小段组成。

图中各关键点的含义分别是：A 为比例极限点，B 为临界点，C 为峰值点，D 为拐点，E 为收敛点，F 为曲线末梢。

各小段的含义为：OA 段 ( $\sigma \leq 0.3f_c$ ) 接近直线，应力较小，应变不大，混凝土的变形为弹性变形，原始裂缝影响很小；AB 段 [ $\sigma = (0.3 \sim 0.8)f_c$ ] 为微曲线段，混凝土应变的增长比应力稍快，混凝土处于裂缝稳定扩展阶段，其中，B 点的应力是确定混凝土长期荷载作用下抗压强度的依据；BC 段 [ $\sigma = (0.8 \sim 1.0)f_c$ ] 的应变增长明显比应力增长快，混凝土处于裂缝快速不稳定发展阶段，其中，C 点的应力最大，即为混凝土的极限抗压强度，与之对应的应变 ( $\epsilon_0 \approx 0.002$ ) 为峰值应变；CD 段混凝土应力快速下降，应变仍在增长，混凝土中的裂缝迅速发展且贯通，出现了主裂缝，内部结构破坏严重；DE 段混凝土应力下降变慢，应变较快增长，混凝土的内部结构处于磨合和调整阶段，主裂缝的宽度进一步增大，最后只依赖集料间的咬合力和摩擦力来承受荷载；EF 段为收敛段，此时试件中主裂缝的宽度快速增加而完全破坏了混凝土的内部结构，这时贯通的主裂缝已很宽，对无侧向约束的混凝土，收敛段 EF 已失去结构意义。

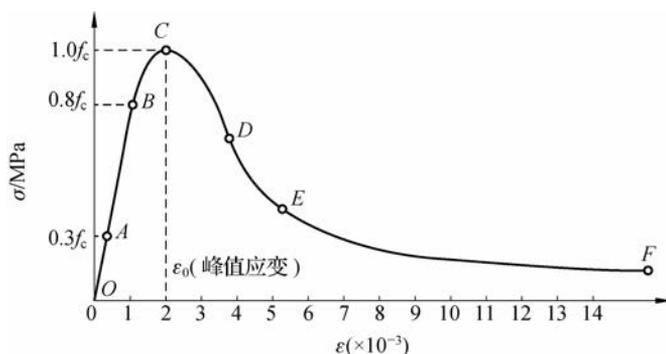


图 1-5 混凝土单轴受压的应力-应变关系曲线

由不同强度等级的混凝土  $\sigma$ - $\epsilon$  关系曲线（见图 1-6）的比较可知：

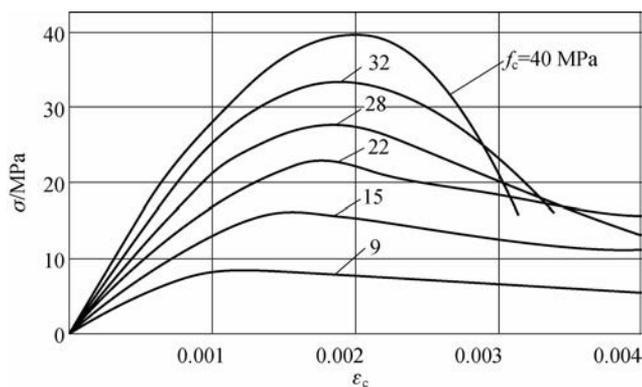


图 1-6 不同强度等级的混凝土的  $\sigma$ - $\epsilon$  关系曲线



- (1) 混凝土强度等级高，其峰值应变  $\epsilon_{c0}$  增加不多。
- (2) 上升段曲线相似。
- (3) 下降段区别较大。强度等级低的混凝土，下降段平缓，应力下降慢；强度等级高的混凝土，下降段较陡，应力下降很快。等级高的混凝土受压时的延性不如等级低的混凝土。

## 2. 长期加载作用下混凝土的变形

混凝土构件或材料在不变荷载或应力的长期作用下，其变形或应变随时间而不断增长的现象称为混凝土的徐变。徐变主要由两个原因引起：一是混凝土具有黏性流动性质的水泥凝胶体，在荷载长期作用下产生黏性流动；二是混凝土中的微裂缝在荷载的长期作用下不断发展。当使用在混凝土构件或材料上的应力较小时，徐变主要由凝胶体引起；反之，则主要由微裂缝引起。

图 1-7 所示为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 400\text{ mm}$  的棱柱体试件在相对湿度为 65%、温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ 、承受  $\sigma=0.5f_c$  压应力并保持不变情况下的应变-时间关系曲线。

由图 1-7 可知，24 个月的徐变变形  $\epsilon_{cc}$  为加荷时立即产生的瞬时弹性变形  $\epsilon_{ci}$  的 2~4 倍，前期徐变变形增长很快，6 个月可达到最终徐变变形的 70%~80%，以后徐变变形增长逐渐变慢，徐变的特性主要与时间有关，通常表现为前期增长较快，后期逐渐减慢，经过 2~3 年后趋于稳定。由 B 点卸载后，应变会恢复一部分，其中，立即恢复的一部分称为混凝土瞬时恢复弹性应变  $\epsilon_{chr}$ ；经过一段时间（约为 20 d）后才恢复的那部分被称为弹性后效  $\epsilon_{chr}$ ，其值约为徐变变形的 1/12；最后剩下的不可恢复的应变称为残余应变  $\epsilon_{cp}$ 。

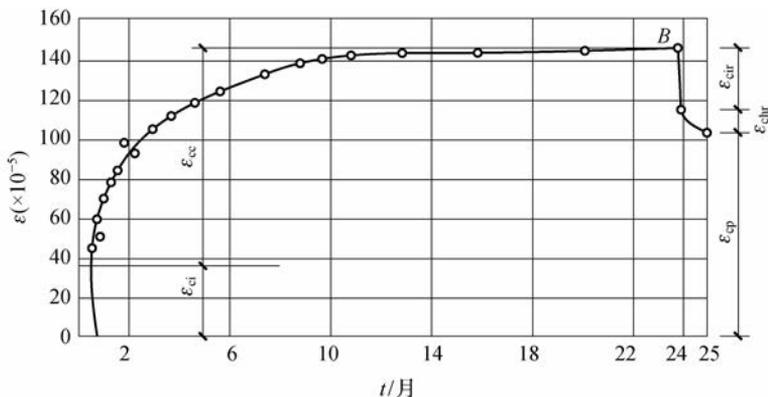


图 1-7 混凝土在荷载长期作用下的应变-时间关系曲线

徐变具有两面性：一方面，引起混凝土结构变形增大，导致预应力混凝土发生预应力损失，严重时还会引起结构破坏；另一方面，徐变的发生对结构内力的重分布有利，可以减小各种外界因素对超静定结构的不利影响，降低附加应力。

影响混凝土徐变的因素是多方面的，概括起来有内在因素、环境因素和应力因素。

就内在因素而言，水泥含量少、水灰比小、集料弹性模量大、集料含量多，则徐变小。

就环境因素而言，养护及使用条件下的温（湿）度对徐变会产生影响。养护时，若温度高、湿度大、水泥水化作用充分，则徐变就小，采用蒸汽养护可使徐变减小 20%~

35%。构件受荷后所处环境的温度越高、湿度越低，则徐变越大。例如，环境温度为 70℃ 的试件受荷一年后的徐变要比环境温度为 20℃ 的试件大一倍以上。因此，高温干燥环境将使徐变显著增大，并且构件的体表比越大，徐变越小。

应力因素主要反映在加荷时的应力水平。当  $\sigma \leq 0.5f_c$  时，徐变与应力成正比，这种情况称为线性徐变。当  $\sigma = (0.5 \sim 0.8)f_c$  时，徐变变形与应力不成正比，徐变变形比应力增长要快，称为非线性徐变。在非线性徐变范围内，当加载应力过高时，徐变变形急剧增加不再收敛，呈非稳定徐变状态，可能造成混凝土的破坏。当  $\sigma > 0.8f_c$  时，徐变的发展是非收敛的，最终将导致混凝土破坏。所以，混凝土构件在使用期间应当避免经常处于不变的高应力状态。显然应力水平越高，徐变越大；持荷时间越长，徐变也越大。一般来讲，在同等应力水平下，高强度混凝土的徐变量要比普通混凝土的小很多，但若使高强混凝土承受较高的应力，则高强度混凝土与普通混凝土最终的总变形量将较为接近。

### 3. 重复加载作用下混凝土的变形

混凝土在荷载重复作用下引起的破坏称为疲劳破坏。疲劳破坏现象大量存在于工程结构中，如钢筋混凝土吊车梁受到重复荷载的作用，钢筋混凝土桥梁受到车辆振动的影响及港口海岸的混凝土结构受到波浪冲击而损伤等。疲劳破坏的特征是裂缝小而变形大。

混凝土在荷载重复作用下的应力-应变曲线如图 1-8 所示。

(1) 当  $\sigma_1$  (或  $\sigma_2$ )  $< 0.5f_c$  时。对混凝土棱柱体试件，当一次加载应力  $\sigma_1$  或  $\sigma_2$  小于混凝土的疲劳强度  $f_{cf}$  (混凝土的疲劳强度用疲劳试验测定。能使棱柱体试件承受 200 万次反复荷载而发生破坏的应力值称为混凝土的疲劳强度，一般取  $f_{cf} \approx 0.5f_c$ ) 时，其加载卸载应力-应变曲线 OAB 形成了一个环状，如图 1-8 (a) 所示。再经过一段时间应变恢复到  $B'$  点。而在多次加载、卸载的作用下，应力-应变环会越来越密合，经过多次重复，这条曲线就密合成一条直线，如图 1-8 (b) 所示。

(2) 当  $\sigma_3 > 0.5f_c$  时。开始时，混凝土应力-应变曲线凸向应力轴，在重复荷载作用下逐渐变成直线，再经过多次重复加卸载后，其应力-应变曲线由凸向应力轴而逐渐凸向应变轴，以致加卸载不能形成封闭环，这标志着混凝土内部微裂缝的发展加剧，结构趋近破坏。随着重复荷载次数的增加，应力-应变曲线的倾角不断减小，至荷载重复到一定次数时，混凝土试件会因严重开裂或变形过大而导致破坏。

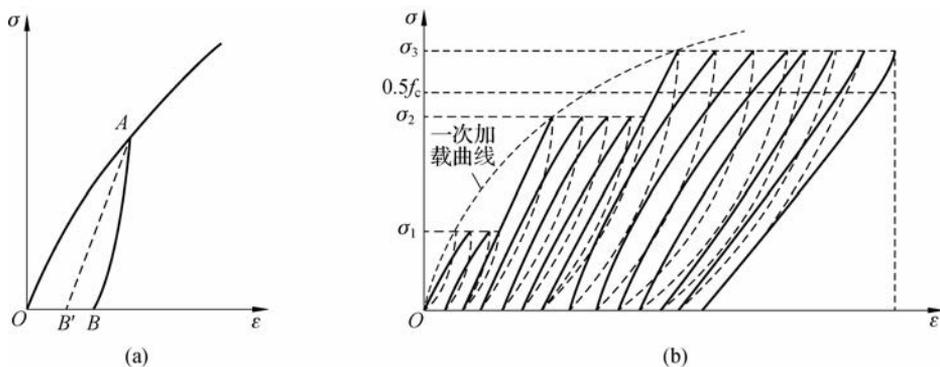


图 1-8 混凝土在荷载重复作用下的应力-应变曲线



## 4. 混凝土的变形模量

混凝土的变形模量被广泛用于计算混凝土结构的内力、构件截面的应力和变形及预应力混凝土构件截面应力的分析之中。与弹性材料相比，混凝土的应力-应变关系呈现非线性性质，即在不同的应力状态下，应力与应变的比值是一个变数。混凝土的变形模量有以下三种表示方法：

1) 原点模量  $E_c$ 

原点模量也称弹性模量，在混凝土轴心受压的应力-应变曲线上过原点  $O$  作该曲线的切线，其斜率即为混凝土的原点切线模量，通常称为混凝土的弹性模量  $E_c$ ，如图 1-9 所示，即

$$E_c = \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\sigma=0} = \tan \alpha_0 \quad (1-3)$$

式中， $\alpha_0$  为过原点所作的应力-应变曲线的切线与应变轴间的夹角。

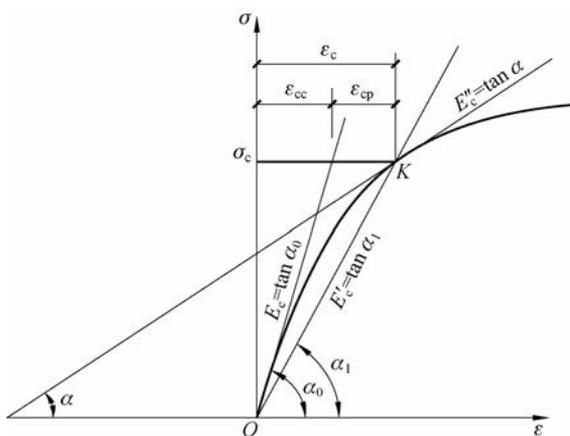


图 1-9 混凝土变形模量的表示方法

在实际工作中应用最多的还是原点弹性模量。按照原点弹性模量的定义，直接从应力-应变曲线的原点  $O$  作切线找出的  $\alpha_0$  角是很不精确的，目前各国对弹性模量的试验方法尚没有统一的标准。我国的通常做法是对棱柱体试件先加荷至  $\sigma=0.5f_c$ ，然后卸载至零，再重复加载、卸载 5~10 次，当应力应变逐渐趋于稳定并基本上接近于直线时，该直线的斜率即为混凝土弹性模量的取值。混凝土强度越高，其弹性模量越大，其取值见表 1-2。

表 1-2 混凝土的弹性模量

单位:  $\times 10^4$  N/mm<sup>2</sup>

强度等级	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
$E_c$	2.20	2.55	2.8	3.00	3.15	3.25	3.35	3.45	3.55	3.60	3.65	3.70	3.75	3.80

按照上述做法测得不同等级的混凝土的弹性模量，经统计分析后得到的经验公式为

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.74}{f_{cu,k}}} \quad (1-4)$$

试验表明,混凝土的受拉弹性模量与受压弹性模量大体相等,其比值为 0.820~0.995,计算中受拉弹性模量和受压弹性模量可取同一个值。

### 2) 割线模量 $E'_c$

如图 1-9 所示,混凝土的应力-应变曲线上任意一点与原点  $O$  的连线的割线斜率即为混凝土的割线模量  $E'_c$ 。

$$E'_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \tan \alpha_1 \quad (1-5)$$

式中,  $\sigma_c$ 、 $\epsilon_c$  分别为  $K$  点位置所对应的应力和应变;  $\alpha_1$  为应力-应变曲线上某点和原点的连线与应变轴间的夹角。

由上述可知,混凝土的割线模量是一个随应力不同而异的变数。在相同的应变条件下,混凝土强度越高,割线模量越大。

### 3) 切线模量 $E''_c$

如图 1-9 所示,在混凝土的应力-应变曲线上任意取一点(如  $K$  点),并作该点的切线,则其斜率即为混凝土的切线模量  $E''_c$ 。

$$E''_c = \frac{d\sigma}{d\epsilon} = \tan \alpha \quad (1-6)$$

式中,  $\alpha$  为应力-应变曲线上某点的切线与应变轴间的夹角。

混凝土的切线模量也是一个变数,并随应力的增大而减小。对不同强度等级的混凝土,在应变相同的条件下,其强度越高,切线模量越大。

### 4) 剪切模量

混凝土的剪切模量可近似按弹性理论计算,即

$$G = \frac{E_c}{2(1+\gamma)} \quad (1-7)$$

式中,  $\gamma$  为混凝土的泊松比。

一般结构的混凝土泊松比变化不大,且与混凝土的强度等级无明显关系,取  $\gamma=1/6$ ,则  $G=0.43E_c$ 。

## 5. 体积变形

混凝土凝结硬化时,在空气中体积收缩,在水中体积膨胀。通常,混凝土的收缩值比膨胀值大很多,且膨胀常起到有利作用,因此在计算中不予考虑。混凝土的收缩值随着时间而增大,蒸汽养护下的混凝土的收缩值要小于常温养护下的混凝土的收缩值。

收缩是混凝土在不受外力情况下体积变化产生的变形,是由混凝土在凝结硬化过程中的化学反应产生的“凝缩”和混凝土自由水分的蒸发产生的“干缩”两部分所引起的。结硬初期,混凝土的收缩变形发展很快,两周可完成全部收缩的 25%,一个月可完成 50%,三个月后增长缓慢,两年后趋于稳定。最终混凝土的收缩值为  $2 \times 10^{-4} \sim 6 \times 10^{-4}$ 。

当混凝土收缩受到外部(支座)或内部(钢筋)的约束时,将使混凝土中产生拉应力,甚至引起混凝土开裂。混凝土收缩会使预应力混凝土构件产生预应力损失。某些对跨度比较敏感的超静定结构(如拱结构等)收缩也会引起不利的内力。

影响混凝土收缩的主要因素有如下几个:



- (1) 水泥的用量：水泥越多，混凝土收缩越大；水灰比越大，混凝土收缩也越大。
- (2) 集料的性质：集料的弹性模量越大，混凝土收缩越小。
- (3) 养护条件：在结硬过程中周围的温度、湿度越大，混凝土收缩越小。
- (4) 混凝土的制作方法：混凝土越密实，收缩越小。
- (5) 使用环境：当环境的温度较高或湿度较大时，混凝土收缩较小。
- (6) 构件的体积与表面积的比值：当两者比值较大时，混凝土收缩较小。



### 学习评价

通过以上任务的学习，回答下列问题：

- (1) 名词解释：混凝土立方体抗压强度、混凝土轴心抗压强度、混凝土轴心抗拉强度、徐变、混凝土收缩、疲劳破坏。
- (2) 影响混凝土立方体抗压强度的主要因素有哪些？
- (3) 如何用劈裂试验测定混凝土的轴心抗拉强度？
- (4) 混凝土单轴受压的应力-应变曲线有何特点？
- (5) 混凝土的变形模量有哪几种表示方法？

## 工作任务 1.3 钢筋的物理力学性能



### 学习目标

- (1) 掌握钢筋常用的种类和表达方法。
- (2) 会查钢筋的强度标准值与设计值表。
- (3) 掌握钢筋的强度和变形指标及要求。
- (4) 了解钢筋的接头、弯钩和弯折的加工要求。
- (5) 了解混凝土结构对钢筋性能的要求。



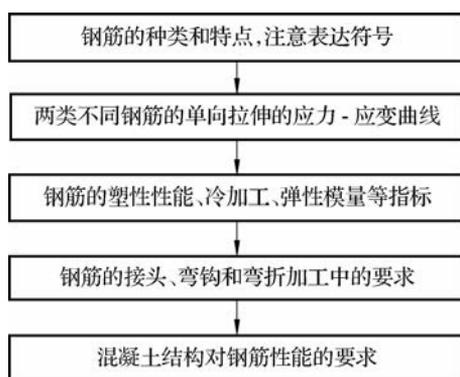
### 学习描述

本任务的目的是掌握钢筋的物理力学性能。通过学习，在读图时能根据图中的钢筋表达方法说出图中钢筋的种类、强度与变形特点；会根据要求查钢筋的强度标准值与设计值表；知道如何进行钢筋的冷加工。任务完成的标准是熟练掌握钢筋的种类和物理力学指标及性能。



### 学习引导

本工作任务按照如下流程进行学习：



钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构中所用钢筋的物理力学性能主要是指其在短期、长期和重复荷载作用下的强度及弹塑性变形性能。钢筋的弹塑性变形性能一般用伸长率和冷弯性能来表示。

### 1.3.1 钢筋的种类

在钢筋混凝土结构中,我国目前通用的普通钢筋按化学成分的不同分为碳素结构钢和普通低合金钢两类。碳素结构钢以 Fe 为主,加少量 C、Mn 等。按含碳量的多少,碳素结构钢又分为低碳钢(含碳量不大于 0.25%)、中碳钢(含碳量大于 0.25%~0.6%)和高碳钢(含碳量大于 0.6%~1.4%)。含 C 量越高,碳素结构钢的强度越高,但塑性和可焊性会降低。普通低合金钢除含有碳素结构钢已有的成分外,还加入了少量(一般不超过 3%)的合金元素(如 Si、Mn、Ti、V 和 Cr 等),从而可以有效地提高钢材的强度和改善钢材的性能。另外,为了节省 V、Ti 等合金资源,冶金行业还开发了新型细晶粒带肋钢筋。

按生产工艺和强度的不同,钢筋可分为热轧钢筋、中(高)强钢丝、螺纹钢、钢绞线、冷加工钢筋等。用于钢筋混凝土结构的钢筋主要有热轧钢筋、碳素钢丝、精轧螺纹钢和钢绞线。

#### 1. 热轧钢筋

热轧钢筋是由低碳钢、普通低合金钢在高温状态下轧制而成的。热轧钢筋按外形分为热轧光圆钢筋和带肋钢筋,如图 1-10 所示。热轧钢筋又分为普通热轧钢筋和细晶粒热轧钢筋。普通热轧钢筋的牌号由 HRB 和屈服强度特征值构成,有 HRB335、HRB400、HRB500,其中,H、R、B 分别为热轧(hotrolling)、带肋(ribbed)、钢筋(bars)三个英文单词的首字母;细晶粒热轧钢筋的牌号由 HRBF 和屈服强度特征值构成,有 HRBF335、HRBF400、HRBF500,其中,F 为“细”的英文单词 fine 的首字母。

热轧光圆钢筋(HPB300)是一种低碳钢。其强度较低,外形光圆,公称直径为 6~22 mm,它与混凝土的黏结强度较低,但塑性与可焊性较好,主要用作板的受力钢筋、箍筋及构造钢筋。

HRB335、HRB400、HRB500 级钢筋属于低合金钢。为了增加钢筋与混凝土之间的黏结力,而将钢筋表面轧制成等高肋(人字纹、螺纹)、月牙肋。低合金钢的公称直径为 6~50 mm,是我国钢筋混凝土结构构件所用钢筋中最主要的品种。HRB400、HRB500 级钢筋主要用于大中型钢筋混凝土结构和高强混凝土结构构件,是我国钢筋混凝土结构构件



受力钢筋用材的最主要品种。

细晶粒热轧钢筋是在热轧过程中通过控轧和控冷工艺形成的细晶粒钢筋。

### 2. 碳素钢丝

碳素钢丝又称高强钢丝，一般是将热轧  $\phi 8$  高碳钢盘条加热到  $850\sim 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，并在在  $500\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  的铅浴中淬火，使其具有较高的塑性，再经酸洗、镀铜、拉拔、矫直、回火、卷盘等工艺生产而得。

(1) 消除应力钢丝（光面钢丝）。消除应力钢丝是将钢筋拉拔后，矫直，经中温回火消除应力并稳定化处理的光面钢丝。

(2) 螺旋肋钢丝和刻痕钢丝如图 1-10 所示。螺旋肋钢丝是以普通低碳钢或低合金钢热轧的圆盘条为母材，经冷轧减径后，在其表面冷轧成两面或三面有月牙肋的钢筋。刻痕钢丝是在光面钢丝的表面进行机械刻痕处理，以增加钢丝与混凝土的黏结力。我国生产的刻痕钢丝的直径可分为  $\phi 4$ 、 $\phi 5$ 、 $\phi 6$ 、 $\phi 7$ 、 $\phi 8$ 、 $\phi 9$  六个级别。

### 3. 精轧螺纹钢筋

精轧螺纹钢筋是在整根钢筋上轧有外螺纹的大直径、高强度、高尺寸精度的直条钢筋。它具有连接、锚固简便，黏着力强，张拉锚固安全可靠，施工方便等优点，而且节约钢筋，减小构件的面积和重量。精轧螺纹钢筋以屈服强度划分级别，其代号为 PSB 加上规定的屈服强度最小值。

### 4. 钢绞线

钢绞线是一般由多根钢丝组成钢丝束或若干根高强钢丝捻制在一起，经过低温回火处理，清除内应力后而制成，有三股和七股两种钢绞线形式。其中采用最多的是七股钢绞线，如图 1-10 所示。

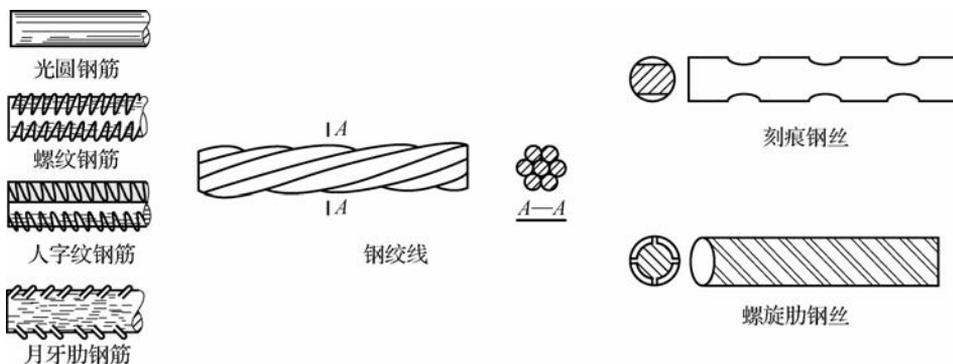


图 1-10 钢筋的种类

## 1.3.2 钢筋的强度和变形

钢筋的强度和变形性能可以由钢筋单向拉伸的应力-应变曲线来分析说明。钢筋的应力-应变曲线可以分为两类：一类是有明显流幅的，即有明显屈服点和屈服台阶的；另一类是没有明显流幅的，即没有明显屈服点和屈服台阶的。热轧钢筋属于有明显流幅的钢筋，其强度相对较低，但变形性能较好；热处理钢筋、钢丝和钢绞线等属于无明显屈服点

的钢筋，其强度较高，但变形性能较差。

### 1. 钢筋的应力-应变曲线

#### 1) 有明显屈服点的钢筋的强度和变形

有明显屈服点的钢筋（软钢）单向拉伸的应力-应变曲线如图 1-11 (a) 所示。该曲线由四个阶段组成，即弹性阶段、屈服阶段、强化阶段和颈缩阶段。在  $a$  点以前的阶段称为弹性阶段， $a$  点称为比例极限点。在  $a$  点以前，钢筋的应力随应变成比例增长，即钢筋的应力应变关系为线性关系；过了  $a$  点后，应变增长的速度大于应力增长的速度，当应力增长较小的幅度后达到  $b$  点，钢筋开始屈服。随后应力稍有降低达到  $c$  点，此后钢筋进入流幅阶段或屈服台阶阶段，曲线接近水平线，此时应力不再增加而应变持续增加。 $b$  点和  $c$  点分别称为上屈服点和下屈服点。上屈服点不稳定，受加载速度、截面形式和表面光洁度等因素的影响；下屈服点一般比较稳定，所以一般以下屈服点对应的应力作为有明显流幅钢筋的屈服强度。过了  $d$  点后为强化阶段，应力又继续上升，说明钢筋的抗拉能力又有所提高。曲线上升到最高点  $e$  时的应力称为钢筋的极限强度。过了  $e$  点后为颈缩阶段，试件薄弱处的截面将会突然显著缩小，发生局部颈缩，变形迅速增加，应力随之下落，达到  $f$  点时试件被拉断。

在钢筋混凝土构件计算中，一般取钢筋的屈服强度作为强度计算指标。尽管热轧低碳钢和低合金钢都属于有明显流幅的钢筋，但不同强度等级的钢筋的屈服台阶的长度是不同的，强度越高，屈服台阶的长度越短，塑性越差。

#### 2) 无明显屈服点的钢筋的典型应力-应变曲线

如图 1-11 (b) 所示，无明显屈服点的钢筋（硬钢）没有明显的屈服平台，在应力达到比例极限  $a$  点（约为极限强度的 0.65 倍）之前，应力应变关系呈直线变化，钢筋具有明显的弹性质，过了  $a$  点之后，钢筋表现出越来越明显的塑性质，应力应变持续增加，到达  $b$  点后，同样出现钢筋的颈缩现象，应力-应变曲线为下降段，至  $c$  点钢筋被拉断。硬钢的强度很高，但伸长率较低，塑性性能较弱。设计上取相应于残余应变为 0.2% 的应力为硬钢的名义屈服强度，也就是假定屈服点，用  $\sigma_{0.2}$  表示。

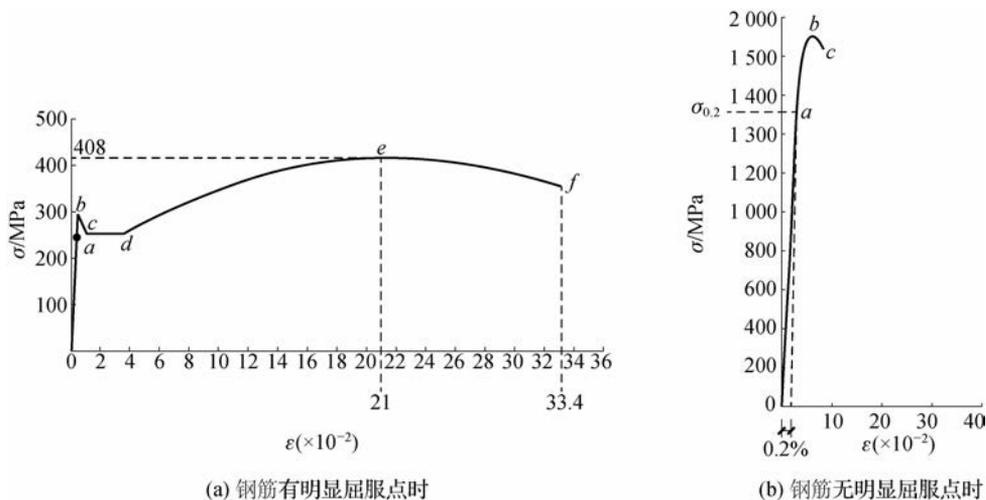


图 1-11 钢筋的应力-应变曲线



## 2. 钢筋的塑性性能

反映钢筋塑性性能的基本指标是钢筋的伸长率和冷弯性能。钢筋试件被拉断后的伸长值与原长的比值称为伸长率，按  $\delta = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \times 100\%$  ( $l_1$  为钢筋的原长， $l_2$  为钢筋被拉断后的总长) 进行计算。钢筋试件上标距为  $10d$  或  $5d$  ( $d$  为钢筋试件的直径) 范围内的极限伸长率记为  $\delta_{10}$  或  $\delta_5$ 。伸长率越大，钢筋的塑性性能越好，破坏时有明显的拉断预兆；伸长率越大，钢筋的弯曲性能越好，构件破坏时不致发生脆断。因此，在选择钢筋的品种时应考虑强度和塑性两方面的要求。

冷弯是指将直径为  $d$  的钢筋围绕某个规定直径  $D$  (规定  $D$  为  $d$ 、 $2d$ 、 $3d$ 、 $4d$ 、 $5d$ ) 的辊轴弯曲成一定的角度 ( $90^\circ$  或  $180^\circ$ )，弯曲后钢筋无裂纹、鳞落或断裂现象。弯芯的直径越小，弯转角越大，说明钢筋的塑性越好。

## 3. 钢筋的冷加工

为了节约钢材，在常温下对有明显屈服点的钢筋 (软钢) 进行机械冷加工，可以使钢材的内部组织结构发生变化，从而提高钢材的强度。机械冷加工可分为冷拔和冷拉，通过冷拔或冷拉的冷加工方法可以提高热轧钢筋的强度。

冷拔钢筋是指将钢筋 (盘条) 用强力拔过比它本身直径还小的硬质合金拔丝模而得到的钢筋，这时钢筋同时受到纵向拉力和横向压力的作用。钢筋经多次冷拔后，截面变小，长度变长，强度、硬度都比原来提高很多，但塑性降低。

冷拉钢筋是先将钢筋在常温下拉伸超过屈服强度达到强化阶段，然后卸载并经过一定时间的时效硬化而得到的钢筋。如图 1-12 所示，将钢筋拉伸达到  $K$  点时卸载，若立即再次拉伸钢筋，则其应力-应变曲线将沿  $O'KDE$  变化，钢筋的强度没有变化，但塑性降低；若经过一段时间后再拉伸，则钢筋的应力-应变曲线将沿  $O'K'D'E'$  变化，屈服台阶有所恢复，钢筋的强度明显提高，塑性降低，即冷拉后经过一段时间，钢筋的屈服点比原来的屈服点有所提高，这种现象称为时效硬化。钢筋强度提高的程度与冷拉前钢筋的强度有关，冷拉前钢筋的强度越大，钢筋强度提高的幅度越小。所以，为了保证冷拉钢筋具有一定的塑性，应合理地选择张拉控制应力和冷拉率 (张拉控制应力点所对应的伸长率称为冷拉率)。工程上若只控制应变，称为单控；若同时控制张拉应力和应变，则称为双控。一般情况下应尽量采用双控。时效硬化的完成与温度和时间有关，在常温下需要 20 h 左右才能完成，在  $100^\circ\text{C}$  的温度下需要 2 h 才能完成，在  $250^\circ\text{C}$  的温度下仅需要 0.5 h 就可以完成。当温度超过  $250^\circ\text{C}$  时，钢筋会随温度的提高而软化。

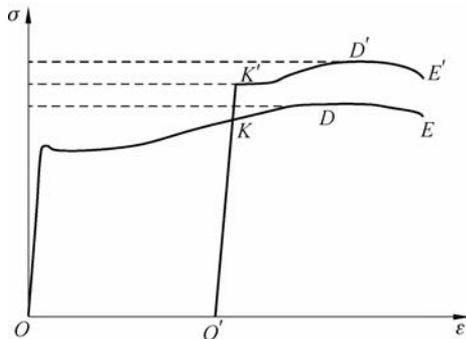


图 1-12 钢筋的冷拉应力-应变曲线

如图 1-13 所示,  $\phi^b$  表示冷加工的冷拔钢筋, 其下角标表示冷拔的直径。钢筋经拉拔后, 原有的明显屈服点消失, 无屈服平台。冷拔既可以提高钢筋的抗拉强度, 又可以提高钢筋的抗压强度, 而冷拉只能提高钢筋的抗拉强度。

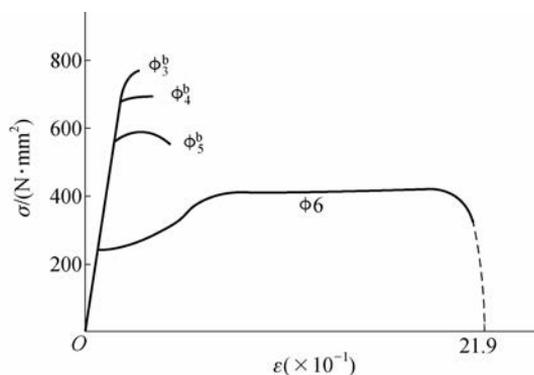


图 1-13 钢筋的冷拔应力-应变曲线

#### 4. 钢筋的强度标准值和设计值

为了使钢筋强度标准值与钢筋的检验标准统一, 对有明显流幅的热轧钢筋, 钢筋的抗拉强度标准值采用国家标准中规定的屈服强度标准值  $f_{yk}$  (废品限值, 其保证率不小于 95%); 对于无明显流幅的钢筋, 根据国家标准中规定的极限抗拉强度确定钢筋的抗拉强度标准值, 其保证率也不低于 95%。

普通钢筋的强度标准值和设计值见表 1-3。

表 1-3 普通钢筋的强度标准值和设计值

单位:  $\text{N}/\text{mm}^2$

牌 号	符 号	屈服强度标准值 $f_{yk}$	抗拉强度设计值 $f_y$	抗压强度设计值 $f'_y$
HPB300	$\phi$	300	270	270
HRB335 HRBF335	$\phi$ $\phi^F$	335	300	300
HRB400 HRBF400 RRB400	$\phi$ $\phi^F$ $\phi^R$	400	360	360
HRB500 HRBF500	$\phi$ $\phi^F$	500	435	410

#### 5. 钢筋的弹性模量

钢筋的弹性模量  $E_s$  是一项稳定的材料常数, 即使是强度等级相差很大的钢筋, 弹性模量也很接近, 并且强度高的钢筋的弹性模量反而小。钢筋的弹性模量见表 1-4。



表 1-4 钢筋的弹性模量

单位: N/mm<sup>2</sup>

牌号或种类	弹性模量 $E_s$
HPB300	$2.10 \times 10^5$
HRB335、HRB400、HRB500 HRBF335、HRBF400、HRBF500 RRB400 预应力螺纹钢筋	$2.00 \times 10^5$
消除应力钢丝、中强度预应力钢丝	$2.05 \times 10^5$
钢绞线	$1.95 \times 10^5$

### 1.3.3 钢筋的接头、弯钩和弯折

#### 1. 钢筋的接头

一般为了运输方便,除小直径(直径不大于 10 mm)的钢筋按盘圆供应外,其他直径的钢筋的长度多为 10~12 m,所以在施工时要把钢筋接长到设计长度。钢筋的连接可分为三类:焊接接头、绑扎接头及机械连接接头。钢筋的接头宜优先考虑焊接接头和机械连接接头,只有当没有焊接条件或施工有困难时才采用绑扎接头。直径不大于 25 mm 的螺纹钢筋和光圆钢筋可采用铁丝绑扎接头,但对于轴心受拉和小偏心受拉构件中的主筋均应焊接,不得采用绑扎接头。

##### 1) 焊接接头

钢筋焊接接头的方式很多,有闪光接触对焊、电弧焊、电渣压力焊、气压焊等。工程中应用最多的焊接接头方式是闪光接触对焊和电弧焊。

(1) 闪光接触对焊。钢筋的纵向焊接应采用闪光接触对焊,即将两根钢筋安放成对接形式,利用电阻热使接触点的金属熔化,产生强烈飞溅,形成闪光,迅速完成焊接的一种压焊方法,如图 1-14 (a) 所示。

为了保证对焊接头的质量,被焊接钢筋的焊接端应裁切平整,端部的断面应与钢筋轴线垂直,两个焊接断面应彼此平行,焊接时被挤出接头外的熔渣应予除去。

(2) 电弧焊。将一根导线接在被焊钢筋上,将另一根导线接在夹有焊条的焊钳上,合上开关,将接触焊件接通电源后立即将焊条提起 2~3 cm,产生电弧,电弧温度高达 4 000 °C,将焊条和钢筋熔化并汇合成一条焊缝,焊接结束。电弧焊有搭接焊和帮条焊,如图 1-14 (b)、(c) 所示。当钢筋接头采用搭接焊时,应将两根钢筋搭接的端部预先折向一侧,使两根接合钢筋的轴线一致。当钢筋接头采用帮条焊时,应用短钢筋或短角钢等作为帮条,将两根钢筋对接拼焊,帮条应采用与主筋同级别的钢筋,其总截面面积不应小于被焊钢筋的截面积。双面焊缝的长度  $L$  不应小于  $5d$ ,单面焊缝的长度  $L$  不应小于  $10d$ 。

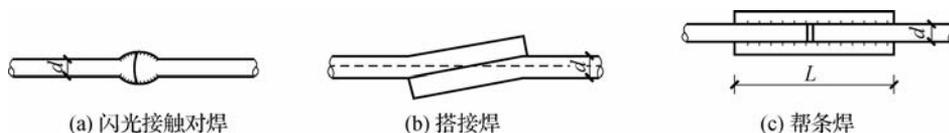


图 1-14 钢筋焊接接头的方式

当焊接受力钢筋的接头时，设置在同一构件内的焊接接头应相互错开，在任意一个焊接接头中心至长度为钢筋直径的 35 倍，且不小于 500 mm 的区段范围内，同一根钢筋不得有两个接头；绑扎接头连接区段的长度为 1.3 倍的搭接长度，在该区段内有搭接接头的受力钢筋的截面面积占全部受力钢筋截面面积的百分率应不超过 50%，接头长度区段内受力钢筋接头面积的最大百分率见表 1-5。

表 1-5 接头长度区段内受力钢筋接头面积的最大百分率

接头形式	接头面积的最大百分率/%	
	受拉区	受压区
主钢筋绑扎接头	25	50
主钢筋焊接接头	50	不限制

注 1：装配式构件连接处的受力钢筋焊接接头可不受此表限制。

注 2：绑扎接头中钢筋的横向净间距  $s_n$  不应小于钢筋直径且不应小于 25 mm。

注 3：环氧树脂涂层钢筋绑扎搭接长度，对受拉钢筋应至少为涂层钢筋锚固长度的 1.5 倍且不小于 375 mm，对受压钢筋为无涂层钢筋锚固长度的 1.0 倍且不小于 250 mm。

## 2) 绑扎接头

绑扎接头是将两根钢筋搭接一定长度并用铁丝绑扎，通过钢筋与混凝土的黏结力传递内力。绑扎钢筋的直径不宜大于 28 mm，轴心受压和偏心受压构件中的受压钢筋的直径不宜大于 32 mm。轴心受拉和小偏心受拉构件不得采用绑扎接头。

受拉钢筋绑扎接头的搭接长度应符合表 1-6 的规定，受压钢筋绑扎接头的搭接长度应取受拉钢筋绑扎接头搭接长度的 0.7 倍。

表 1-6 受拉钢筋绑扎接头的搭接长度

钢筋类型	混凝土强度等级		
	C20	C25	高于 C25
HPB300	35d	30d	25d
HRB335	45d	40d	35d
HRB400、KL400	55d	50d	45d

注 1：当带肋钢筋直径  $d \leq 25$  mm 时，其受拉钢筋的搭接长度应按表中数值减少 5d 采用；当带肋钢筋直径  $d > 25$  mm 时，其受拉钢筋的搭接长度应按表中数值增加 5d 采用。

注 2：当混凝土在凝固过程中受力钢筋易受扰动时，其搭接长度宜适当增加。

注 3：在任何情况下，纵向受拉钢筋的搭接长度不应小于 300 mm，受压钢筋的搭接长度不应小于 200 mm。

注 4：当混凝土强度等级低于 C20 时，HPB300、HRB335 钢筋的搭接长度应按表中 C20 的数值相应增加 10d。

注 5：对有抗震要求的受力钢筋的搭接长度，当抗震烈度为七度及以上时应增加 5d。

注 6：两根不同直径的钢筋的搭接长度以较细的钢筋直径计算。

注 7：在受拉区域内，光圆钢筋接头的末端应做弯钩，变形钢筋的末端可不作弯钩。

注 8：搭接长度范围内的箍筋应加密。当搭接钢筋为受拉时，其箍筋间距不应大于  $5d_{\min}$ ，且不应大于 100 mm；当搭接钢筋为受压时，其箍筋间距不应大于  $10d_{\min}$ ，且不应大于 200 mm ( $d_{\min}$  为受力钢筋中的最小直径)。

## 3) 机械连接接头

机械连接接头是通过连接件的机械咬合作用或钢筋端面的承压作用，将一根钢筋中的力传递至另一根钢筋的连接方法。机械连接接头具有接头性能可靠，质量稳定，不受气候



影响，连接速度快，安全且不需要较大功率的电源，以及可焊与不可焊钢筋均能可靠连接等优点。

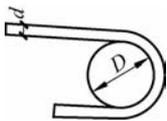
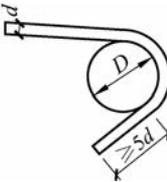
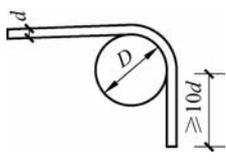
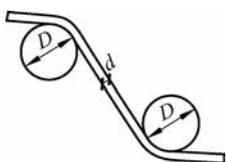
(1) 挤压套筒接头。挤压套筒接头是通过挤压力使连接用钢套发生塑性变形而与带肋钢筋紧密咬合形成的接头。挤压套筒接头适用于直径为 16~40 mm 的 HRB335、HRB400 带肋钢筋的径向挤压连接。两根相连接钢筋的直径相差不应大于 5 mm。当混凝土结构中挤压接头部位的温度低于 -20 °C 时，宜进行专门的试验。

(2) 镦粗直螺纹接头。镦粗直螺纹接头是将钢筋的连接端先行镦粗，再加工成圆柱螺纹，并用连接套连接的钢筋接头。镦粗直螺纹接头适用于直径为 18~40 mm 的 HRB335、HRB400 钢筋的连接。

## 2. 钢筋的弯钩和弯折

为了防止承受拉力的光圆钢筋在混凝土内滑动，须把钢筋两端做成半圆形弯钩。受压的光圆钢筋可以不设弯钩；带肋的钢筋握裹力好，可以不设半圆形弯钩，改用直角形弯钩。受力主钢筋末端弯钩的要求见表 1-7。

表 1-7 受力主钢筋末端弯钩的要求

弯曲部位	弯曲角度	形状图	钢筋种类	公称直径 $d$ /mm	弯曲直径 $D$	平直部分的长度
末端弯钩	180°		HPB300	6~22	$\geq 2.5d$	$\geq 3d$
	135°		HRB335	28~40	$\geq 4d$	$\geq 5d$
			HRB400	28~40	$\geq 5d$	
	90°		HRB335	28~40	$\geq 4d$	$\geq 10d$
			HRB400	28~40	$\geq 5d$	
	中间弯钩	$\leq 90^\circ$		各类		$\geq 20d$

注：当对环氧树脂涂层钢筋进行弯曲加工时，对于直径  $d \leq 20$  mm 的钢筋，其弯曲直径不应小于  $4d$ ；对于直径  $d > 20$  mm 的钢筋，其弯曲直径不应小于  $6d$ 。

用 HPB300 钢筋制作的箍筋，其末端应做弯钩，弯钩的弯曲直径应大于受力主钢筋的直径，且不小于箍筋直径的 2.5 倍。弯钩平直部分的长度，对一般结构不宜小于箍筋直径

的 5 倍；对有抗震要求的结构，不应小于箍筋直径的 10 倍。弯钩的形式，如设计无要求时，可按图 1-15 (a) 和图 1-15 (b) 所示进行加工；对有抗震要求的结构，应按图 1-15 (c) 所示进行加工。

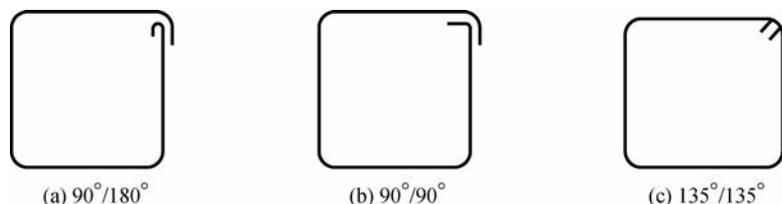


图 1-15 箍筋的弯钩形式

### 1.3.4 混凝土结构对钢筋性能的要求

用于混凝土结构中的钢筋一般应满足下列要求：

#### 1) 具有适当的屈强比

屈服强度与抗拉强度的比值称为屈强比，它可以代表结构的强度储备，比值小则结构的强度后备大，但若比值太小则钢筋强度的有效利用率会太低，所以要选择适当的屈强比。

#### 2) 足够的塑性

在混凝土结构中，要求钢筋断裂时有足够的变形，这样，结构在破坏之前就能发出预警信号，保证安全。另外，在施工时，钢筋要经受各种加工，所以钢筋要满足冷弯试验的要求。屈服强度、抗拉强度、伸长率、冷弯性能是钢筋的强度和变形的四项主要指标。

#### 3) 良好的可焊性

要求钢筋具备良好的焊接性能，保证焊接强度，焊接后钢筋不产生裂纹及过大的变形。

#### 4) 抗低温性能

在寒冷地区要求钢筋具备抗低温性能，以防钢筋因低温冷脆而破坏。

#### 5) 与混凝土有良好的黏结力

黏结力是钢筋与混凝土得以共同工作的基础，在钢筋表面刻痕或制成各种纹形都有助于或大大提高黏结力。

混凝土结构对钢筋性能的要求，概括地说，即要求强度高、塑性及焊接性能好。此外，还要求钢筋和混凝土有良好的黏结性能。

### 学习评价

通过以上任务的学习，回答下列问题：

- (1) 软钢的拉伸应力-应变关系曲线有何特点？
- (2) 软钢的拉伸应力-应变关系曲线由哪四个阶段组成？
- (3) 名称解释：名义屈服强度、时效硬化、冷拉钢筋、单控、双控。
- (4) 钢筋的塑性性能的基本指标有哪些？



- (5) 机械冷加工的方法有哪些?
- (6) 钢筋的接头有哪几类?

## 工作任务 1.4 钢筋与混凝土的相互作用——黏结力

### 学习目标

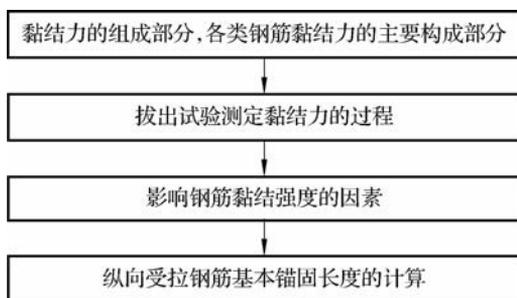
- (1) 了解黏结力的组成部分, 各类钢筋黏结力的主要构成部分。
- (2) 了解利用拔出试验测定黏结力的过程。
- (3) 了解影响黏结强度的因素。
- (4) 了解纵向受拉钢筋基本锚固长度的计算方法。

### 学习描述

本任务的目的是掌握钢筋与混凝土的相互作用——黏结力的相关知识。任务完成的标准是通过学习了解黏结力的影响因素、各类钢筋黏结力的主要构成部分; 可以利用拔出试验测定黏结力并且利用黏结强度公式计算黏结强度; 通过了解影响黏结强度的因素知道如何增强结构的黏结力; 在了解纵向受拉钢筋基本锚固长度的计算原理后, 会进行受拉钢筋锚固长度的计算。

### 学习引导

本工作任务按照如下流程进行学习:



混凝土凝结硬化并达到一定强度后, 混凝土和钢筋之间就建立了足够的黏结强度, 能够承受由于钢筋和混凝土的相对变形在两者界面上所产生的相互作用力, 即钢筋与混凝土接触面上的剪应力, 又称为黏结力  $\tau$ 。因此, 钢筋与混凝土之间的黏结力是保证两者共同工作, 阻止钢筋在混凝土中滑移所必不可少的基本条件。

黏结力的主要组成部分如下:

- (1) 混凝土收缩将钢筋紧紧握裹而产生的摩擦力。
- (2) 混凝土颗粒与钢筋表面产生的化学黏合力。
- (3) 由于钢筋表面凹凸不平而与混凝土之间产生的机械咬合力。

各种黏结力在不同的情况 (钢筋的截面形式、受力阶段和构件部位) 下将发挥各自的

作用。光圆钢筋的黏结力主要来自与混凝土材料的胶结力和摩阻力，而变形钢筋的黏结力主要来自机械咬合作用。机械咬合力可提供很大的黏结力，但若布置不当，则会产生较大的滑移、裂缝和局部混凝土破碎的现象。光圆钢筋和变形钢筋的黏结力的差别可以用钉入木料中的普通钉和螺丝钉的差别来理解。

### 1.4.1 黏结力的测定

黏结力的测定一般采用拔出试验的方法，如图 1-16 所示。

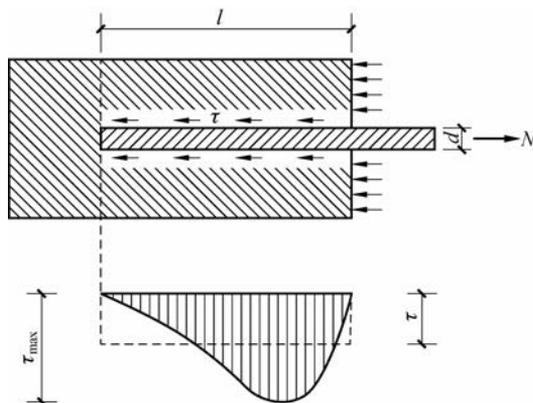


图 1-16 拔出试验图示

黏结强度  $f_{\tau}$  可由式 (1-8) 计算。

$$f_{\tau} = \frac{N}{\pi dl} \quad (1-8)$$

式中， $N$  为钢筋受到的拉力； $d$  为钢筋的直径； $l$  为钢筋的埋置长度。

根据拔出试验可知：

- (1) 黏结力按曲线分布，最大黏结力在离开端部的某一位置出现，且随拔出力的大小而变化。
- (2) 钢筋的埋置长度越长，拔出力越大，但若埋入过长，则尾部的黏结力很小，甚至为零。
- (3) 黏结强度随混凝土强度等级的提高而增大。
- (4) 变形钢筋的黏结强度比光圆钢筋的大，但若在光圆钢筋末端做弯钩，则其拔出力将会大大提高。

### 1.4.2 影响黏结强度的因素

影响黏结强度的主要因素有混凝土强度、保护层厚度、钢筋净间距、横向配筋、横向压应力及浇筑混凝土时钢筋的位置等。

- (1) 混凝土强度。光圆钢筋和变形钢筋的黏结强度随混凝土强度等级的提高而提高。
- (2) 保护层厚度。若钢筋外围的混凝土保护层太薄，则会造成外围混凝土的黏结强度因混凝土产生径向劈裂而降低。增大保护层厚度，保持一定的钢筋间距，可以提高外围混凝土的抗劈裂能力，有利于黏结强度的充分发挥。



(3) 钢筋净间距。当混凝土构件截面上有多根钢筋并列在一排时, 钢筋净间距对黏结强度有重要影响。当钢筋净间距过小时, 外围混凝土将发生水平劈裂, 形成贯穿整个梁宽的劈裂裂缝, 造成整个混凝土保护层剥落, 黏结强度显著降低。并列在一排的钢筋的根数越多, 净间距越小, 黏结强度降低的就越多。

(4) 横向配筋。横向钢筋(如梁中的箍筋)可以限制混凝土内部裂缝的发展, 提高黏结强度。横向钢筋还可以限制到达构件表面的裂缝宽度, 从而提高黏结强度。在较大直径钢筋的锚固区段和搭接长度范围内均应设置一定数量的横向钢筋, 如将梁的箍筋加密等, 对控制劈裂裂缝, 提高黏结强度是很有效的。

(5) 横向压应力。在直接支承的支座处(如梁的简支端), 钢筋的锚固区受到来自支座的横向压应力, 横向压应力约束了混凝土的横向变形, 使钢筋与混凝土间抵抗滑动的摩阻力增大, 从而提高了黏结强度。

(6) 浇筑混凝土时钢筋的位置。浇筑混凝土时, 若深度过大(超过 300 mm), 则钢筋底面的混凝土会出现沉淀收缩和离析泌水, 逸出气泡, 使混凝土与水平放置的钢筋之间产生强度较低的疏松空隙层, 从而削弱钢筋与混凝土的黏结作用。

另外, 钢筋表面的形状对黏结强度也有影响, 当其他条件相同时, 光圆钢筋的黏结强度约比带肋的变形钢筋的黏结强度低 20%。

### 1.4.3 纵向受拉钢筋的基本锚固长度

钢筋的锚固是指在混凝土中设置埋置段(锚固长度)或采取机械措施将钢筋所受的力传递给混凝土, 使钢筋锚固于混凝土内而不致滑出。《冷轧带肋钢筋混凝土结构技术规程》(JGJ 95—2011)规定以纵向受拉钢筋的锚固长度  $l_a$  作为钢筋的基本锚固长度。

$$l_a = \alpha \frac{f_{yk}}{f_t} d \quad (1-9)$$

式中,  $\alpha$  为锚固钢筋的外形系数, 按表 1-8 取用;  $f_{yk}$  为钢筋的屈服强度标准值;  $f_t$  为混凝土轴心抗拉强度设计值, 当混凝土强度等级高于 C60 时, 按 C60 取值;  $d$  为钢筋的公称直径。

表 1-8 锚固钢筋的外形系数  $\alpha$

钢筋类型	光圆钢筋	带肋钢筋	刻痕钢筋	螺旋肋钢筋	三股钢绞线	七股钢绞线
外形系数 $\alpha$	0.16	0.14	0.19	0.13	0.16	0.17



### 学习评价

通过以上任务的学习, 回答下列问题:

- (1) 黏结力如何测定?
- (2) 影响混凝土黏结强度的因素有哪些?