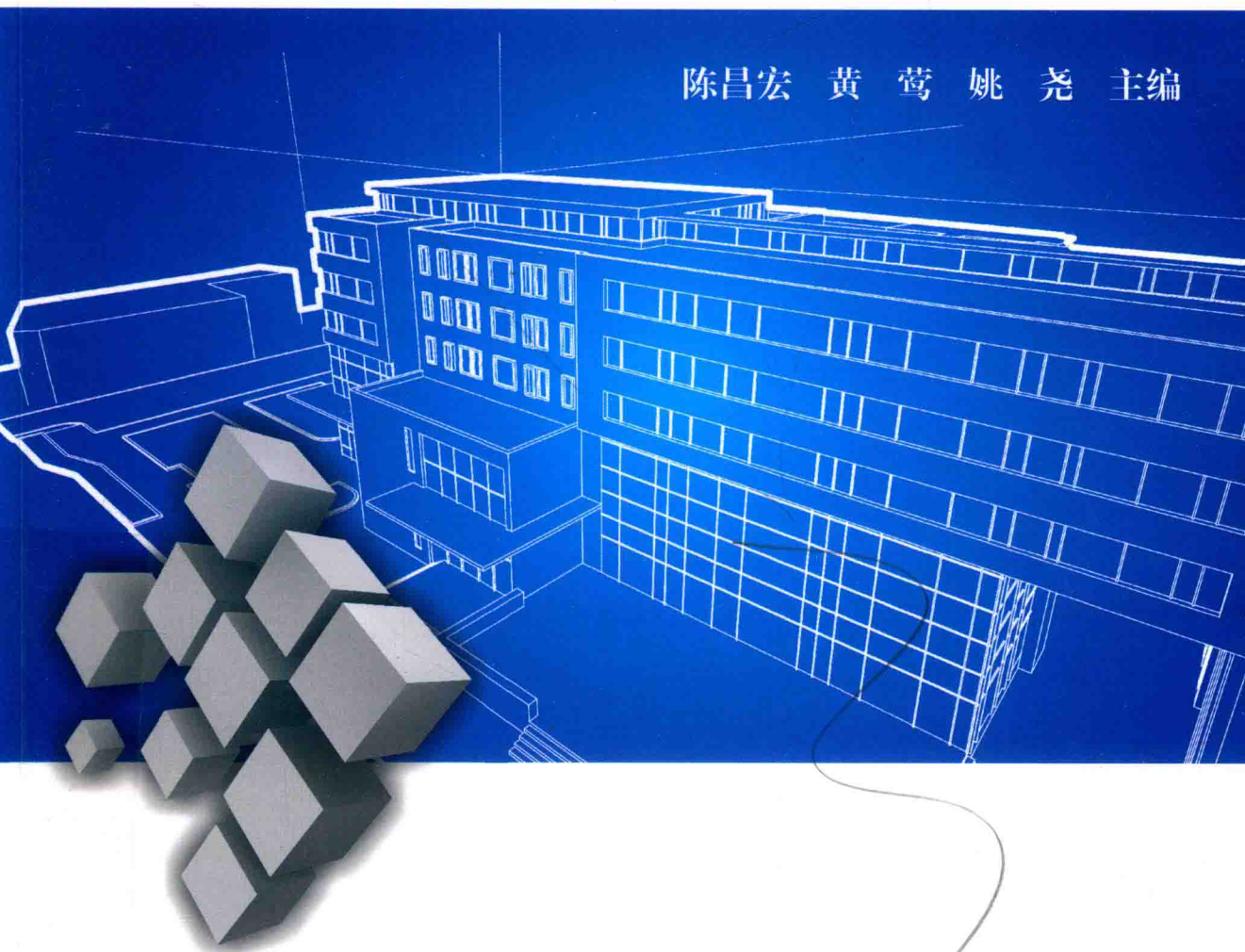


高等学校教材

混凝土 基本构件及原理

陈昌宏 黄莺 姚尧 主编



西北工业大学出版社

高等学校教材

HUNNINGTU JIBEN GOUJIAN JI YUANLI

混凝土基本构件及原理

主 编 陈昌宏 黄 莺 姚 尧
编 者 陈昌宏 黄 莺 姚 尧 陈安英
余 波 林基础 朱彦飞 宫 贺
张 倩 伍 妍
主 审 张洵安



西北工业大学出版社
西安

【内容简介】 本书基于最新的混凝土结构设计规范和国家一级注册结构工程师考试案例而编写。内容涵盖混凝土结构的材料、理论公式计算和构造要求,强调实际工程中的应用环节,能更好地适应当前混凝土结构课程教学的发展。

本书可供从事土木工程和结构工程设计的技术人员和科研人员以及高等学校的本科生和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土基本构件及原理/陈昌宏,黄莺,姚尧主编.

—西安:西北工业大学出版社,2018.6

ISBN 978-7-5612-5954-2

I. ①混… II. ①陈… ②黄… ③姚…

III. ①混凝土结构—结构构件 IV. ①TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 096106 号

策划编辑:雷 军

责任编辑:张 潼

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpu.com

印刷者:陕西博闻印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:14.25

字 数:343 千字

版 次:2018 年 6 月第 1 版

2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:40.00 元

前言

本教材是根据全国高校土木工程专业指导委员会审定通过的教学大纲编写的,属专业基础课教材。全书共 10 章,内容包括混凝土的结构概述,钢筋混凝土材料的基本性能,结构可靠度及结构设计方法,受弯构件正截面承载力,受压构件正截面承载力,受拉构件正截面承载力,受压构件正截面承载力,构件斜截面承载力,受扭构件扭曲截面受力性能与设计,正常使用极限状态验算及耐久性设计。为了满足读者需要,本教材按照最新颁布的国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)和《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)进行编写。

本教材的特色是除了对钢筋混凝土基本构件做了较为详细的叙述之外,结合全国注册工程师委员会颁布的一级、二级注册结构工程师考试中对混凝土部分应掌握的重难点配置了大量的注册工程师考试例题及其标准解答,充分满足了结合理论与实际应用的要求。

本教材被列为西北工业大学校级规划教材,由西北工业大学陈昌宏副教授、西安建筑科技大学黄莺副教授、西北工业大学姚尧教授任主编,西北工业大学张洵安教授主审。参加具体编写的有陈昌宏(第 1,2,3,4 章),黄莺(第 5,6,7,8 章),姚尧(第 9,10 章),合肥工业大学陈安英副教授参与了第 3,4 章的编写,南京工业大学的余波博士参与了第 10 章的编写,郑州大学的林基础博士参与了第 7,8 章的编写,西北工业大学研究生朱彦飞、宫贺、张倩、伍研参与了书中计算案例的编写和校对工作,在此一并感谢。

限于水平,书中如有不妥之处,请批评指正。

编者

2018 年 2 月

目 录

第 1 章 混凝土结构概述	1
1.1 混凝土结构的基本概念和特点	1
1.2 混凝土结构的发展及应用	2
1.3 本课程的主要内容及特点	3
第 2 章 钢筋和混凝土材料的基本性能	6
2.1 钢筋的基本性能	6
2.2 混凝土的基本性能	12
2.3 钢筋与混凝土的黏结	17
2.4 公路桥涵工程混凝土结构材料	23
2.5 本章小结	23
第 3 章 结构设计基本原理	25
3.1 结构可靠度及结构设计方法	25
3.2 荷载和材料强度的取值	28
3.3 概率极限状态设计法	29
3.4 结构极限状态设计表达式	29
3.5 本章小结	38
思考题	38
第 4 章 受弯构件正截面承载力	39
4.1 概述	39
4.2 正截面受弯性能的实验研究	40
4.3 正截面受弯承载力分析	44
4.4 单筋矩形截面受弯承载力计算	50
4.5 双筋矩形截面受弯承载力计算	54
4.6 T 形截面受弯承载力计算	60
4.7 本章小结	66
思考题	67
第 5 章 受压构件正截面的性能和设计	68
5.1 轴心受压构件承载力计算	68
5.2 偏心受压构件正截面受力性能分析	71

5.3 矩形截面非对称配筋偏心受压构件正截面受压承载力计算	73
5.4 矩形截面对称配筋偏心受压构件正截面受压承载力计算	79
5.5 I形截面对称配筋偏心受压构件正截面受压承载力计算	83
5.6 本章小结	93
思考题	94
第6章 受拉构件正截面的性能与设计	95
6.1 轴心受拉构件承载力计算	95
6.2 矩形截面偏心受拉构件正截面承载力计算	97
6.3 本章小结	103
思考题	103
第7章 构件斜截面承载力	104
7.1 概述	104
7.2 受弯构件受剪性能的试验研究	105
7.3 受弯构件斜截面受剪承载力计算	114
7.4 受弯构件斜截面受剪承载力的设计计算	118
7.5 本章小结	124
思考题	125
第8章 受扭构件扭曲截面受力性能与设计	126
8.1 一般说明	126
8.2 纯扭构件的受力性能和扭曲截面承载力计算	127
8.3 复合受扭构件承载力计算	131
8.4 本章小结	138
思考题	138
第9章 正常使用极限状态验算及耐久性设计	139
9.1 概述	139
9.2 裂缝宽度的计算	142
9.3 受弯构件的变形计算	151
9.5 本章小结	160
思考题	160
第10章 预应力混凝土构件的性能与设计	161
10.1 预应力混凝土的基本知识	161
10.2 预应力混凝土构件设计的一般规定	177
10.3 预应力混凝土轴心受拉构件的应力分析	185
10.4 预应力混凝土轴心受拉构件的计算和验算	189

第 1 章 混凝土结构概述

本章在本课程中的作用

- 对混凝土结构的概念和本课程内容形成总体了解

本章的主要内容

- 混凝土结构的基本概念和特点
- 混凝土结构的应用及发展
- 混凝土结构设计原理的基本内容和学习方法

1.1 混凝土结构的基本概念和特点

1.1.1 混凝土结构的基本概念

混凝土结构是以混凝土为主要材料制成的结构,包括:①素混凝土结构;②钢筋混凝土结构;③预应力混凝土结构;④型钢混凝土结构;⑤纤维混凝土结构。图 1-1 所示为几种混凝土结构。

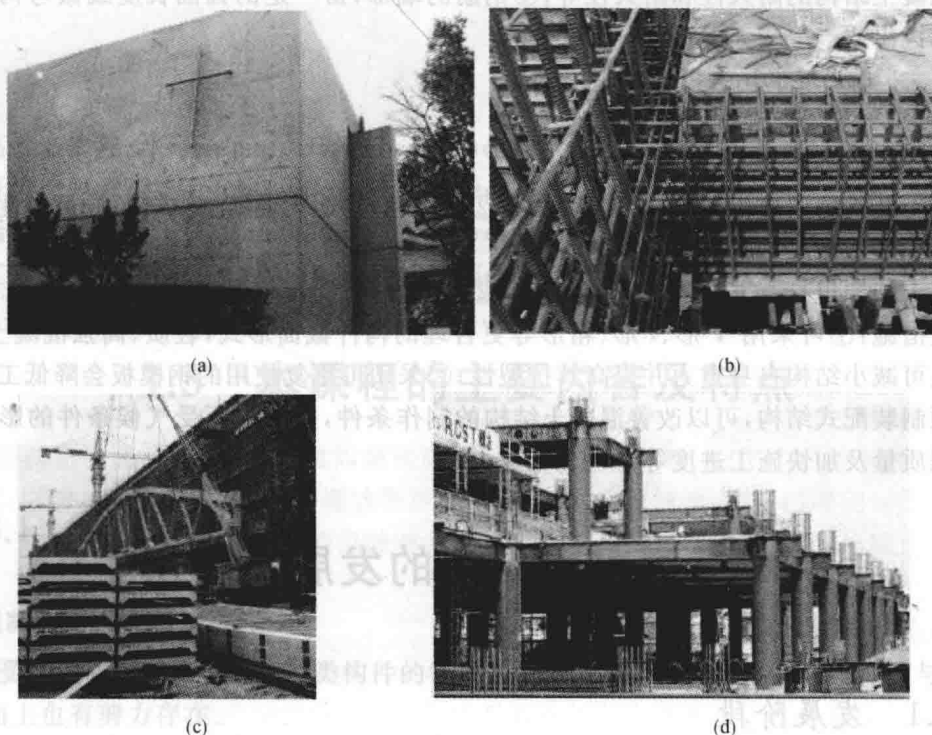


图 1-1 混凝土结构示意图

(a)素混凝土结构;(b)钢筋混凝土结构;(c)预应力混凝土;(d)钢管混凝土

素混凝土梁的破坏特征为断裂破坏,承载能力和变形能力均很低,属脆性破坏。

钢筋混凝土梁的破坏特征为受拉钢筋应力先达到其屈服强度,受压区混凝土最后被压坏,承载能力和变形能力均较高,属延性破坏。

钢筋混凝土梁的极限承载力和变形能力大大超过同样条件的素混凝土梁,如图 1-2(b)所示。

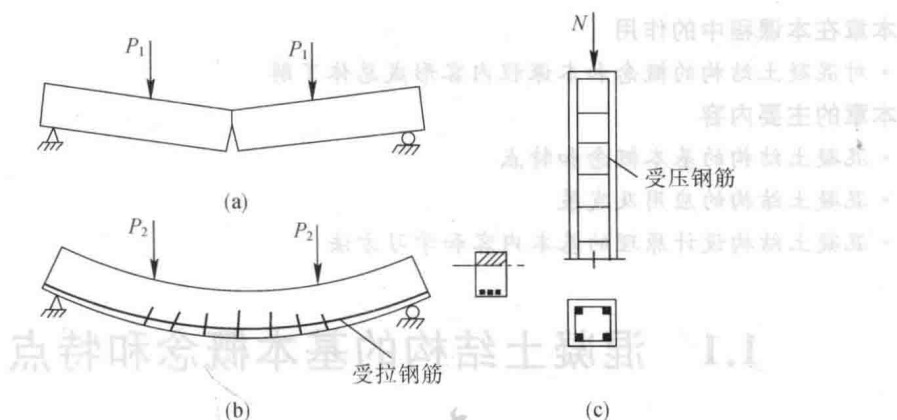


图 1-2 素混凝土梁及钢筋混凝土梁

钢筋与混凝土两种材料共同工作的基础:①钢筋与混凝土之间存在黏结力,使两者能协调变形,共同工作;②钢筋与混凝土两种材料的温度线膨胀系数很接近,钢材料为 1.2×10^{-5} ,混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}$,使两者间的黏结力免遭破坏;③混凝土对钢筋起保护和固定作用,提高了混凝土结构的耐久性和耐火性等;④钢筋的端部,留一定的锚固长度或做弯钩,防止受力钢筋被拔出或产生较大滑移。

1.1.2 混凝土结构的特点

混凝土结构的主要优点有:①就地取材;②耐久性;③耐火性;④整体性;⑤可模性;⑥节约钢材。

混凝土结构也具有下列缺点:①自重较大;②抗裂性差;③需用模板。

改进措施:①可采用 T 形、I 形、箱形等更合理的构件截面形式,轻质、高强混凝土及预应力混凝土可减小结构自身重力并提高其抗裂性;②采用可重复使用的钢模板会降低工程造价;③采用预制装配式结构,可以改善混凝土结构的制作条件,少受或不受气候条件的影响,并能提高工程质量及加快施工进度等。

1.2 混凝土结构的发展及应用

1.2.1 发展阶段

第一阶段(1850—1920 年):仅能建造一些小型的梁、板、柱、基础等构件;按弹性理论进

行结构设计。

第二阶段(1920—1950年):已建成各种空间结构;发明了预应力混凝土并应用于实际工程;开始按破损安全理论进行构件截面设计。

第三阶段(1950—1980年):材料强度的提高,混凝土单层房屋和桥梁结构的跨度不断增加;混凝土高层建筑的高度已达 262 m;结构构件设计已过渡到按极限状态的设计方法。

第四阶段(1980年以后):全面发展;结构构件的设计已采用以概率理论为基础的极限状态设计方法。

1.2.2 应用

(1)混凝土强度:C50~C80 级混凝土甚至更高强度混凝土的应用已较普遍。

(2)房屋建筑:钢筋混凝土楼盖和屋盖。其中包括:

- 单层厂房:很多采用钢筋混凝土柱、基础,钢筋混凝土或预应力混凝土屋架及薄腹梁等。
- 高层建筑:混凝土结构体系的应用甚为广泛。

(3)桥梁工程:中、小跨度桥梁绝大部分采用混凝土结构建造,大跨度桥梁也有相当多的是采用混凝土结构建造。

(4)隧道及地下工程:多采用混凝土结构建造。

(5)水利工程:水电站、拦洪坝、引水渡槽、污水排灌管等均采用钢筋混凝土结构。

(6)特种结构:烟囱、水塔、筒仓、储水池、电视塔、核电站反应堆安全壳、近海采油平台等也有很多采用混凝土结构建造。

1.2.3 混凝土拓展应用

- 高性能混凝土(high performance concrete)结构。
- 纤维增强混凝土(fibre reinforced concrete)结构。
- 活性粉末混凝土(Reactive Powder Concrete, RPC)。
- 工程化的纤维增强水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)。

1.3 本课程的主要内容及特点

1.3.1 主要内容

1.混凝土结构的基本构件

(1)受弯构件,如梁、板等。这类构件的截面上有弯矩作用,故称为受弯构件。与此同时,构件截面上也有剪力存在。

(2)受压构件,如柱、墙等。这类构件都有压力作用。当压力沿构件纵轴作用在构件截面上时,则为轴心受压构件;如果压力在截面上不是沿纵轴作用或截面上同时有压力和弯矩作用

时,则为偏心受压构件。

(3)受拉构件,如屋架下弦杆、拉杆拱中的拉杆等,通常按轴心受拉构件(忽略构件自重重力)考虑。又如层数较多的框架结构,在竖向荷载和水平荷载共同作用下,有的柱截面上除产生剪力和弯矩外,还可能出现拉力,则为偏心受拉构件。

(4)受扭构件,如曲梁、框架结构的边梁等。这类构件的截面上除产生弯矩和剪力外,还会产生扭矩。因此,对这类结构构件应考虑扭矩的作用。

2. 预应力混凝土构件

预应力混凝土(prestressed concrete)是在构件使用(加载)以前,预先给混凝土施加预压力,即在混凝土的受拉区内,用人工加力的方法,将钢筋进行张拉,利用钢筋的回缩力,使混凝土受拉区预先受压力。这种储存下来的预加压力,当构件承受由外荷载产生拉力时,首先抵消受拉区混凝土中的预压力,然后随荷载增加,才使混凝土受拉,这就限制了混凝土的伸长,延缓或不使裂缝出现,弥补混凝土过早出现裂缝的现象。

预压应力用来减小或抵消荷载所引起的混凝土拉应力,从而将结构构件的拉应力控制在较小范围,甚至处于受压状态,以推迟混凝土裂缝的出现和开展,从而提高构件的抗裂性能和刚度如图 1-3 所示,预应力构件的实际制作过程如图 1-4 所示。

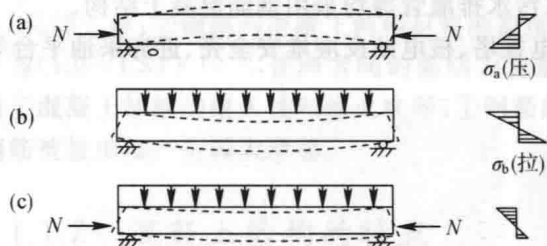


图 1-3 预应力受力示意图



图 1-4 预应力锚具

根据预加应力值大小对构件截面裂缝控制程度的不同分为以下 3 类:

(1)全预应力混凝土(FPC)。在使用荷载作用下,不允许截面上混凝土出现拉应力的构件,属严格要求不出现裂缝的构件,和严格控制预应力构件的截面尺寸和预应力梁的挠度。

(2)部分预应力混凝土(PPC)。允许出现裂缝,但最大裂缝宽度不超过允许值的构件,属允许出现裂缝的构件。

(3)无黏结预应力钢筋。将预应力钢筋的外表面涂以沥青,油脂或其他润滑防锈材料,以减小摩擦力并防锈蚀,并用塑料套管或以纸带、塑料带包裹,以防止施工中碰坏涂层,并使之与周围混凝土隔离,而在张拉时可沿纵向发生相对滑移的后张预应力钢筋。

1.3.2 课程特点与学习方法

(1)材料力学公式一般不能直接用来计算钢筋混凝土构件的承载力和变形。

(2)两种材料,在强度和数量上存在一个合理的配比范围。如果钢筋和混凝土在面积上的比例及材料强度的搭配超过了这个范围,就会引起构件受力性能的改变,从而引起构件截面设

计方法的改变。

(3)钢筋混凝土构件的计算方法是建立在试验研究基础上的,即

试验研究 → 破坏机理和受力性能 → 构件计算公式

(4)需要解决的不仅是构件的承载力和变形计算等问题,还包括构件的截面形式、材料选用及配筋构造等。

本课程的实践性很强,其基本原理和设计方法必须通过构件设计来掌握,并在设计过程中逐步熟悉和正确运用我国有关的设计规范和标准。

图 号	图 名	图 例	图 说
1.1.1	钢筋混凝土梁的配筋构造		1.1.1 钢筋混凝土梁的配筋构造
1.1.2	钢筋混凝土板的配筋构造		1.1.2 钢筋混凝土板的配筋构造
1.1.3	钢筋混凝土柱的配筋构造		1.1.3 钢筋混凝土柱的配筋构造

第 2 章 钢筋和混凝土材料的基本性能

本章的主要内容

- 钢筋的强度和变形性能
- 混凝土的强度和变形性能
- 钢筋与混凝土的黏结-滑移性能

本章的重点和难点

重点：

- 混凝土的强度和变形性能

难点：

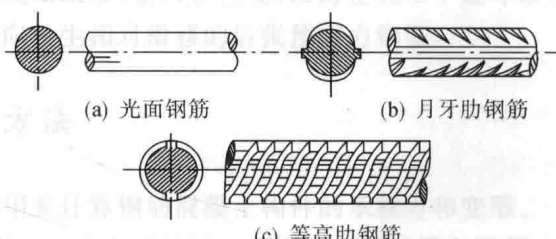
- 复杂受力状态下混凝土的强度
- 混凝土的变形和应力-应变关系

2.1 钢筋的基本性能

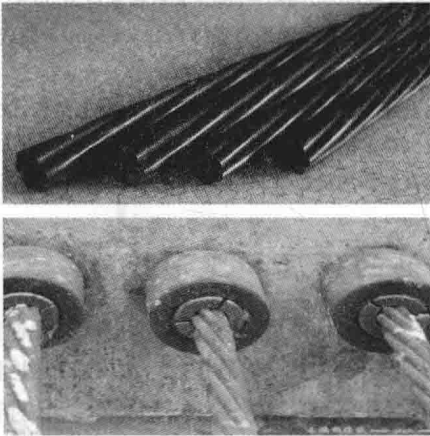
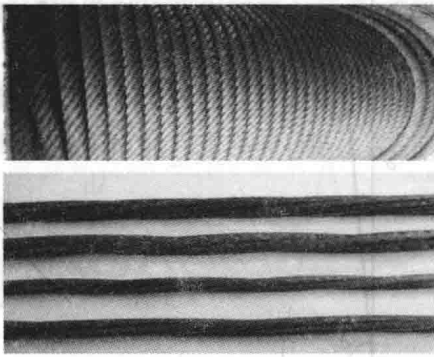
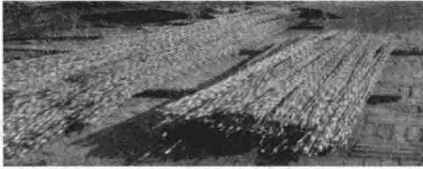
2.1.1 钢筋成分及品种

GB50010 — 2010《混凝土结构设计规范》(以下简称《砼规》)规定:钢筋混凝土梁柱构件可使用热轧钢筋,预应力混凝土钢筋宜采用预应力钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋,钢筋类别及种类见表 2-1。

表 2-1 钢筋类别及种类

钢筋名称	钢筋种类	图 示	备 注
热轧钢筋	HPB300 I 级钢筋 HRB335 II 级钢筋 HRB400 III 级钢筋 RRB400 III 级钢筋	 (a) 光面钢筋 (b) 月牙肋钢筋 (c) 等高肋钢筋	①~⑤

续表

钢筋名称	钢筋种类	图 示	备 注
预应力钢绞线	按一根钢绞线中的 钢丝数量分:2 丝钢 绞线、3 丝钢绞线、7 丝钢绞线及 19 丝钢 绞线。按表面形态可 以分:光面钢绞线、刻 痕钢绞线、模拔钢绞 线(compact)、涂环氧 树脂钢绞线等。还可 以按照直径、或强度 级别、或标准分类		⑥⑦⑧
消除应力钢丝	光面钢丝,螺旋肋钢 丝,刻痕钢丝光面钢 丝,螺旋肋钢丝,以上 两类按直径可分别划 分为 $\phi 4\phi 5\phi 6\phi 7\phi 8\phi 9$; 刻痕钢丝 $\varphi' 5\varphi' 7$		⑦⑧
热处理钢筋	40Si ₂ Mn 48Si ₂ Mn 45Si ₂ Cr		⑨⑩
冷加工钢筋	冷拔钢筋(提高抗 拉进和抗压强度),冷 拉钢筋(提高抗拉强 度)		⑩

注:①HPB—Hot rolled Plain steel Bars (热轧光面钢筋)。
②HRB—Hot rolled Ribbed steel Bars (热轧带肋钢筋)。
③RRB—Remained heat treatment Ribbed steel Bars(余热处理带肋筋)。
④H(R/P)B 分别表示:生产工艺,表面形状,钢筋(非钢丝)。数字 300 表示钢筋抗拉强度标准值为 300N/mm²。
⑤HPB300 级钢筋又称光面钢筋,常用于梁、柱板的箍筋。
⑥HRB335,HRB400 和 RRB400 级钢筋又称变形钢筋,一般用于构件的纵向受力钢筋。

⑦预应力钢绞线有 15-7 ϕ 5, 12-7 ϕ 5, 9-7 ϕ 5 等型号规格的预应力钢绞线。现以 15-7 ϕ 5 为例, 5 表示单根直径 5.0 mm 的钢丝, 7 ϕ 5 表示 7 条这种钢丝组成一根钢绞线, 而 15 表示每股钢绞线的直径为 15 mm, 总的含义就是“一束由直径 15 mm 的 7 丝(每根总直径约 15.24 mm, 尺寸偏差(+0.40, -0.20); 每丝直径约为 5.0 mm)钢绞线组成的钢筋”。一般截面积按 140 mm² 计算, 理论破断值 = 140 × 1860 = 260.4 kN, 按预应力 60%~65% 标准, 可承受拉力 156.24~169.26 kN。

⑧钢丝的直径为 4~9 mm, 钢绞线的直径 8.6~15.2 mm(3 股或 7 股钢丝), 热轧钢筋的直径为 6~30 mm(常用)。天津一工程最大 55 mm。

⑨钢丝和钢绞线以及热处理钢筋一般用于预应力混凝土结构, 故这些钢筋也成为预应力钢筋。

⑩热处理钢筋能较大幅度的提高钢筋强度, 同时塑性降低较小。

⑪冷拔可以同时提高钢筋的抗拉强度和抗压强度, 冷拉钢筋仅提高钢筋的抗拉强度。

2.1.2 钢筋的强度和变形性能

1. 钢筋的应力-应变曲线

(1) 软钢的应力-应变曲线如图 2-1 所示。

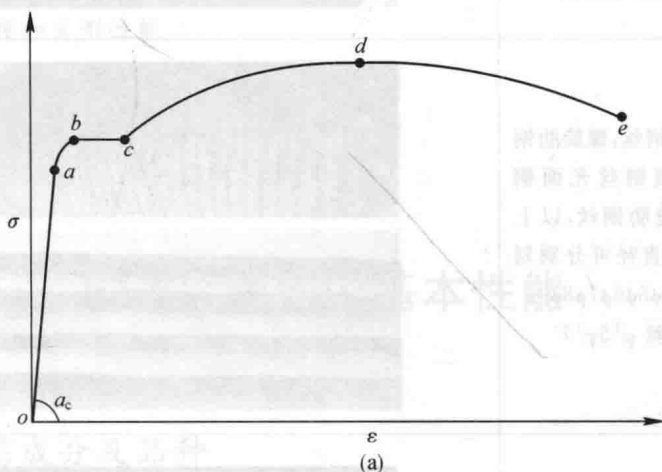


图 2-1 软钢的应力-应变曲线

(2) 硬钢的应力-应变曲线如图 2-2 所示。

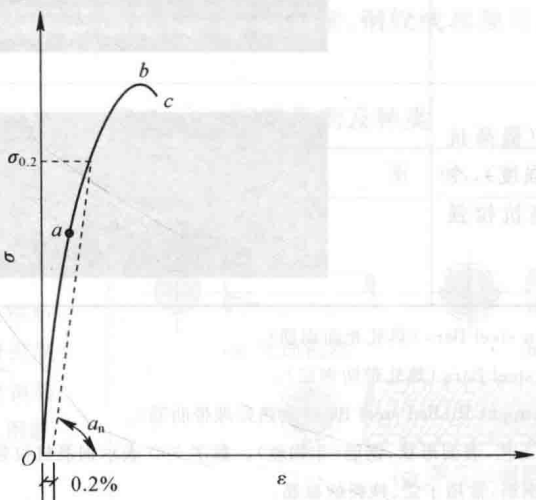


图 2-2 硬钢的应力-应变曲线

条件屈服强度取残余应变为 0.2% 所对应的应力作为无明显流幅钢筋的强度限值。

3) 钢筋的应力应变简化模型如图 2-3 所示。

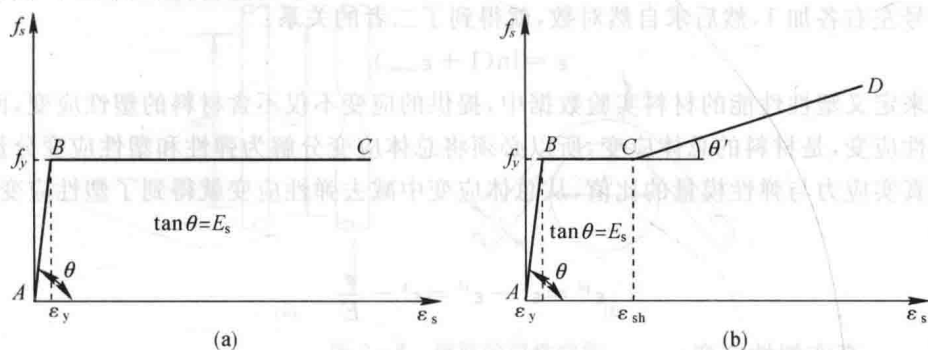


图 2-3 钢筋的应力应变简化模型

(a) 理想弹塑性模型; (b) 三段线性模型

(4) 钢筋的真实应力-应变关系。钢筋在小变形时具有良好的线性应力-应变关系,但在应变较大时材料会发生屈服特性,此时钢筋的响应变成了非线性和不可逆的,如图 2-1~图 2-3 所示。钢筋的工程应力(利用未变形平面计算得到的单位面积上的力)称为名义应力(工程应力),即 F/A_0 ,与之对应的为名义应变(工程应变,每单位未变形长度的伸长),即 $\Delta l/l_0$ 。在实验室通过单向拉伸/压缩试验中得到的数据通常是工程应力和应变。

在仅考虑 $\Delta l \rightarrow dl \rightarrow 0$ 的情况下,拉伸和压缩应变式相同的,即

$$d\epsilon = \frac{dl}{l}$$

$$\epsilon = \int_0^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

式中 l_0 ——原始长度;

l ——当前长度;

ϵ ——真实应变,与真实应变对应的真实应力为 $\sigma = \frac{F}{A}$ (其中 F 为材料受力, A 是当前面积)。

由于塑性变形的不可压缩性,真实应力与名义应力(工程应力)之间的关系

$$l_0 A_0 = lA$$

可以看出当前面积与原始面积的关系

$$A = \frac{l_0 A_0}{l}$$

将 A 的表达式代入真实应力的定义式中,得

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{l}{l_0} = \sigma_{\text{nom}} \left(\frac{l}{l_0} \right)$$

其中, $\frac{l}{l_0}$ 也可以写为 $1 + \epsilon_{\text{nom}}$ (对于拉伸试验, ϵ_{nom} 是正值;对于压缩试验 ϵ_{nom} 为负值)。

这样就得到了应力的真实值和名义值(工程值)之间的关系:

$$\sigma = \sigma_{\text{nom}} (1 + \epsilon_{\text{nom}})$$

此外,名义应变的推导:

$$\epsilon_{\text{nom}} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1$$

上式中等号左右各加 1, 然后求自然对数, 就得到了二者的关系:

$$\epsilon = \ln(1 + \epsilon_{\text{nom}})$$

在用来定义塑性性能的材料实验数据中, 提供的应变不仅不含材料的塑性应变, 而且包括材料的弹性应变, 是材料的总体应变, 所以必须将总体应变分解为弹性和塑性应变分量。弹性应变等于真实应力与弹性模量的比值, 从总体应变中减去弹性应变就得到了塑性应变, 其关系表达式为

$$\epsilon^{\text{pl}} = \epsilon^{\text{t}} - \epsilon^{\text{el}} = \epsilon^{\text{t}} - \frac{\sigma}{E}$$

式中 ϵ^{pl} —— 真实塑性应变;

ϵ^{t} —— 总体真实应变;

ϵ^{el} —— 真实弹性应变。

表 2-2 中的应力-应变数据用来示范如何将定义材料塑性特性的试验特性的数据转化为需要的真实塑性应变。

首先, 用公式将名义应力和名义应变转化为真实应力和应变。得到这些值后, 就可以用公式确定与屈服应力相关的塑性应变。转换后的数据见表 2-2, 可以看出: 在小应变时, 真实应变和名义应变间的差别很小; 而在大应变时, 二者间会有明显的差别。因此, 在实际工程计算中若应变比较大, 就需要使用真实的应力-应变数据。

表 2-2 应力-应变名义值与真实值的转化

名义应力/MPa	名义应变	真实应力/MPa	真实应变	塑性应变
200	0.000 95	200.2	0.000 95	0.0
240	0.025	246	0.024 7	0.023 5
280	0.050	294	0.048 8	0.047 4
340	0.100	374	0.095 3	0.093 5
380	0.150	437	0.139 8	0.137 7
400	0.200	480	0.182 3	0.180 0

2. 钢筋的塑性性能

(1) 延伸率。如图 2-4(a) 所示, 延伸率

$$\delta = \frac{l' - l}{l} \times 100\%$$

其中, $l = 5d$ (或 $10d$)。

延伸率越大, 钢筋的塑性和变形能力越好。

(2) 冷弯性能: 如图 2-4(b) 所示。弯心直径越小, 弯过的角度越大, 冷弯性能越好, 钢筋的塑性性能越好。