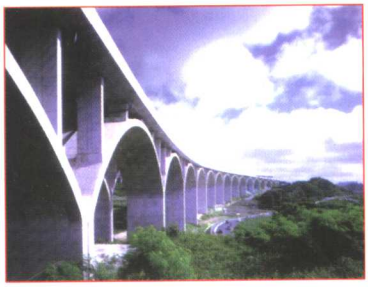
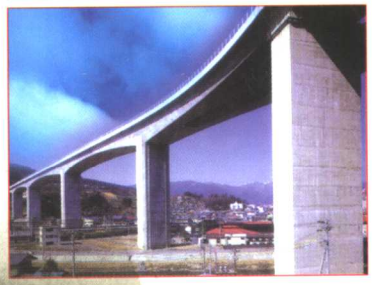
面向21世纪
交通版

高等学校教材

# 高等钢筋混凝土结构

周志祥　主编
徐　岳　主审





人民交通出版社
China Communications Press

高等学校教材

# Advanced Reinforced Concrete Structures

# 高等钢筋混凝土结构

周志祥　主编
徐　岳　主审

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本教材为面向21世纪交通版高等学校教材，共分12章，主要论述钢筋和混凝土的力学性能、钢筋混凝土构件正截面力学性能、斜截面抗剪强度、钢筋与混凝土的粘结、钢筋混凝土构件的裂缝、刚度和变形、混凝土结构的收缩、徐变及温度效应、结构的延性与抗震、结构设计方法和钢筋混凝土结构的有限元分析等内容。

本书在详细论述钢筋混凝土结构一般原理的基础上，注重阐述发现问题、分析问题和解决问题的思想方法。为在有限的篇幅中介绍较多的内容以及近期的研究成果，编者在写作中适时辅以简明型、条文型、解释型、图表型的编著方式，期望给读者在离开书本后留下较多的有关知识。

本书可作为桥梁及结构工程类专业的研究生教材，也可供相关专业的学生及技术人员学习参考。

**图书在版编目（CIP）数据**

高等钢筋混凝土结构／周志祥主编．—北京：人民交通出版社，2002

ISBN 7-114-04425-9

Ⅰ．高…　Ⅱ．周…　Ⅲ．钢筋混凝土结构　Ⅳ．TU375

中国版本图书馆CIP数据核字（2002）第062363号

高等学校教材

**高等钢筋混凝土结构**

Gaodeng Gangjin Hunningtu Jiegou

周志祥　主编

徐　岳　主审

正文设计：彭小秋　责任校对：刘高彤　责任印制：杨柏力

人民交通出版社出版发行

（100013　北京和平里东街10号　010　64216602）

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本：787×1092　1/16　印张：15.75　字数：376千

2002年11月　第1版

2002年11月　第1版　第1次印刷

印数：0001—4000册　定价：27.00元

ISBN 7-114-04425-9

U·03264

面向21世纪交通版

# 高等学校教材(公路与交通工程)编审委员会


**主 任 委 员**:王秉纲(长安大学)

**副主任委员**:胡长顺(长安大学)
陈艾荣(同济大学)
王　炜(东南大学)
杜　颖(人民交通出版社)

**委　　员**:周　伟(交通部交通科学研究院)
郑健龙(长沙交通学院)
张建仁(长沙交通学院)
刘小明(北京工业大学)
梁乃兴(重庆交通学院)
周志祥(重庆交通学院)
裴玉龙(哈尔滨工业大学)
黄　侨(哈尔滨工业大学)
钟　阳(哈尔滨工业大学)
黄晓明(东南大学)
叶见曙(东南大学)
赵明华(湖南大学)
郭忠印(同济大学)
杨晓光(同济大学)
王殿海(吉林大学)
徐　岳(长安大学)
符锌砂(华南理工大学)

**秘　书　长**:韩　敏(人民交通出版社)


TUA22/07 04

# 总　序

当今世界，科学技术突飞猛进，全球经济一体化趋势进一步加强，科技对于经济增长的作用日益显著，教育在国家经济与社会发展中所处的地位日益重要。进入新世纪，面对国际国内经济与社会发展所出现的新特点，我国的高等教育迎来了良好的发展机遇，同时也面临着巨大的挑战，高等教育的发展处在一个前所未有的重要时期。其一，加入 WTO，中国经济已融入到世界经济发展的进程之中，国家间的竞争更趋激烈，竞争的焦点已更多地体现在高素质人才的竞争上，因此，高等教育所面临的是全球化条件下的综合竞争。其二，我国正处在由计划经济向社会主义市场经济过渡的重要历史时期，这一时期，我国经济结构调整将进一步深化，对外开放将进一步扩大，改革与实践必将提出许多过去不曾遇到的新问题，高等教育面临加速改革以适应国民经济进一步发展的需要。面对这样的形势与要求，党中央国务院提出扩大高等教育规模，着力提高高等教育的水平与质量。这是为中华民族自立于世界民族之林而采取的极其重大的战略步骤，同时，也是为国家未来的发展提供基础性的保证。

为适应高等教育改革与发展的需要，早在 1998 年 7 月，教育部就对高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订。在新的专业目录中，土木工程专业扩大了涵盖面，原先的公路与城市道路工程，桥梁工程，隧道与地下工程等专业均纳入土木工程专业。本科专业目录的调整是为满足培养“宽口径”复合型人才的要求，对原有相关专业本科教学产生了积极的影响。这一调整是着眼于培养 21 世纪社会主义现代化建设人才的需要而进行的，面对新的变化，要求我们对人才的培养规格、培养模式、课程体系和内容都应作出适时调整，以适应要求。

根据形势的变化与高等教育所提出的新的要求，同时，也考虑到近些年来公路交通大发展所引发的需求，人民交通出版社通过对“八五”、“九五”期间的路桥及交通工程专业高校教材体系的分析，提出了组织编写一套面向 21 世纪的具有鲜明交通特色的高等学校教材的设想。这一设想，得到了原路桥教学指导委员会几乎所有成员学校的广泛响应与支持。2000 年 6 月，由人民交通出版社发起组织全国面向交通办学的 12 所高校的专家学者组成面向 21 世纪交通版高等学校教材(公路类)编审委员会，并召开第一次会议，会议决定着手组织编写土木工程专业具有交通特色的**道路专业方向、桥梁专业方向以及交通工程专业**教材。会议经过充分研讨，确定了包括**基本知识技能培养层次、知识技能拓宽与提高层次**以及**教学辅助层次**在内的约 130 种教材，范围涵盖**本科**与**研究生用**教材。会后，人民交通出版社开始了细致的教材编写组织工作，经过自由申报及专家推荐的方式，近 20 所高校的百余名教授承担约 130 种教材的主编工作。2001 年 6 月，教材编委会召开第二次会议，全面审定了各门教材主编院校提交的教学大纲，之后，编写工作全面展开。

面向 21 世纪交通版高等学校教材编写工作是在本科专业目录调整及交通大发展的背景下展开的。教材编写的基本思路是：(1)顺应高等教育改革的形势，专业基础课教学内容实现与土木工程专业打通，同时保留原专业的主干课程，既顺应向土木工程专业过渡的需要，又保持服务公路交通的特色，适应宽口径复合型人才培养的需要。(2)注重学生基本素质、基本能



试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

力的培养，将教材区分为二个主层次与一个辅助层次，即基本知识技能培养层次与知识技能拓宽与提高层次，辅助层次为教学参考用书。工作的着力点放在基本知识技能培养层次教材的编写上。(3)目前，中国的经济发展存在地区间的不平衡，各高校之间的发展也不平衡，因此，教材的编写要充分考虑各校人才培养规格及教学需求多样性的要求，尽可能为各校教学的开展提供一个多层次、系统而全面的教材供给平台。(4)教材的编写在总结“八五”、“九五”工作经验的基础上，注意体现原创性内容，把握好技术发展与教学需要的关系，努力体现教育面向现代化、面向世界、面向未来的要求，着力提高学生的创新思维能力，使所编教材达到先进性与实用性兼备。(5)配合现代化教学手段的发展，积极配套相应的教学辅件，便利教学。

教材建设是教学改革的重要环节之一，全面做好教材建设工作，是提高教学质量的重要保证。本套教材是由人民交通出版社组织，由原全国高等学校路桥与交通工程教学指导委员会成员学校相互协作编写的一套具有交通出版社品牌的教材，教材力求反映交通科技发展的先进水平，力求符合高等教育的基本规律。各门教材的主编均通过自由申报与专家推荐相结合的方式确定，他们都是各校相关学科的骨干，在长期的教学与科研实践中积累了丰富的经验。由他们担纲主编，能够充分体现教材的先进性与实用性。本套教材预计在二年内完全出齐，随后，将根据情况的变化而适时更新。相信这批教材的出版，对于土木工程框架下道路工程、桥梁工程专业方向与交通工程专业教材的建设将起到有力的促进作用，同时，也使各校在教材选用方面具有更大的空间。需要指出的是，该批教材中研究生教材占有较大比例，研究生教材多具有较高的理论水平，因此，该套教材不仅对在校学生，同时对于在职学习人员及工程技术人员也具有很好的参考价值。

21世纪初叶，是我国社会经济发展的重要时期，同时也是我国公路交通从紧张和制约状况实现全面改善的关键时期，公路基础设施的建设仍是今后一项重要而艰巨的任务，希望通过各相关院校及所有参编人员的共同努力，尽快使全套面向21世纪交通版高等学校教材(公路类)尽早面世，为我国交通事业的发展做出贡献。

面向21世纪交通版
高等学校教材(公路类)编审委员会
人民交通出版社
2001年12月

# 前　言

钢筋混凝土结构是土木工程专业研究生及本科生的重要技术基础课，本科生教材着重从设计规范应用角度介绍了钢筋混凝土结构的力学行为和设计计算方法，但对从事结构工程的研究者和高级技术人员，尚需从更深层次去认识钢筋混凝土结构的力学行为，把握结构的性能及其一般规律，掌握分析问题和解决问题的一般途径和合理方法。为此，在人民交通出版社的鼓励和支持下，编写了这本《高等钢筋混凝土结构》，作为桥梁及结构工程类专业的研究生教材，也可供相关专业的学生及技术人员参考。

本书共分十二章，先后论述了钢筋和混凝土的物理力学性能，压弯构件的正截面力学行为，钢筋混凝土构件的抗剪和抗扭强度，钢筋与混凝土的粘结，钢筋混凝土构件的裂缝、变形和刚度，钢筋混凝土有限元分析等内容，还介绍了结构的延性与抗震设计，以及钢筋混凝土结构设计方法。这些应是桥梁及结构工程类专业的研究者和高级技术人员所必备的基础知识。

科技在高速发展，知识在不断地更新和膨胀，人们的学习方法也应随之转变。编者赞同教育应从知识传授向能力培养转变。本书在论述钢筋混凝土结构一般原理的基础上，注重阐述发现问题、分析问题和解决问题的思想方法。故本书在注意论述系统性的同时，作了大量的精炼处理：略去了与本科教材大量重复的内容，增加了综合比较内容；注重计算理论的原理和建立方法，精简了繁琐的数据处理和数学推导过程；并适时辅以简明型、条文型、解释型、图表型、演示型的编著方式，期望使读者能够掌握较多的有关知识。

任何教材相对于使用时的科技发展水平总是滞后的，这与要求研究生了解本学科前沿研究状况的希望有较大的出入，为此，编者在数届的研究生教学中探索并实践了这样一种教学方式：即三分之二的时间讲授教材内容，当然每次课前要求学生预习，以系统学习本课程的知识；三分之一的时间让学生阅读中外相关文献后在课堂上介绍并共同讨论。这样既培养了学生的自学能力，又弥补了教材的局限性，达到了共同提高的目的。反馈意见表明效果较好，这里提出来供同行们参考、批评和改进。

本书由重庆交通学院周志祥教授主编，其中第一、五章由向阳开博士执笔，第二、十一章由涂凌副教授执笔，第三、十章由周志祥教授执笔，第四章由周志祥、杨丽梅执笔，第六、八章由杨丽梅副教授执笔，第七章由杨丽梅、周志祥执笔，第九章由肖光宏副教授执笔，第十二章由王家林副教授执笔，研究生范亮做了大量文稿整理工作，全书由长安大学徐岳教授主审。编写过程中，还得到众多专家、单位和部门的大力支持和帮助，在此，谨向所有关心、支持本书编写和出版的有关领导、专家、学者表示衷心的感谢。限于编者水平，书中遗漏及不足之处在所难免，恳请读者和专家们批评指正。

主编　周志祥

2002 年 4 月于重庆交通学院

# 目　　录


**第一章　钢筋的物理力学性能** …… 1
第一节　钢筋的分类和应力—应变曲线 …… 1
第二节　钢筋的锈蚀 …… 6
第三节　钢筋的疲劳 …… 9
第四节　钢筋的其他性能 …… 15
**第二章　混凝土的力学性能** …… 22
第一节　混凝土的变形及破坏机理 …… 22
第二节　混凝土的单轴受力强度 …… 31
第三节　混凝土的多轴强度及变形 …… 34
第四节　混凝土的疲劳性能 …… 39
第五节　混凝土的收缩 …… 41
第六节　混凝土的徐变 …… 44
第七节　高性能混凝土 …… 50
**第三章　压弯构件的力学性能** …… 56
第一节　截面分析的一般方法 …… 56
第二节　构件的力学行为研究 …… 58
第三节　长柱的纵向挠曲 …… 71
**第四章　斜截面抗剪强度** …… 75
第一节　斜截面破坏形态 …… 75
第二节　钢筋混凝土梁抗剪机理分析 …… 76
第三节　影响抗剪强度的主要因素 …… 79
第四节　抗剪强度分析方法 …… 80
第五节　其他构件的抗剪问题 …… 88
**第五章　钢筋混凝土受扭构件** …… 96
第一节　纯扭矩作用下的钢筋混凝土构件 …… 96
第二节　弯扭共同作用下的钢筋混凝土构件 …… 105
第三节　弯扭剪共同作用下的钢筋混凝土构件 …… 108
**第六章　钢筋与混凝土的粘结** …… 112
第一节　粘结试验 …… 112
第二节　粘结机理分析 …… 114
第三节　影响粘结的因素 …… 119
第四节　粘结应力的计算 …… 122
第五节　重复荷载和交变荷载作用下的粘结 …… 125
**第七章　钢筋混凝土构件的裂缝** …… 130

第一节　裂缝的成因及控制标准 …… 130
第二节　构件抗裂强度的近似计算 …… 133
第三节　裂缝机理的分析理论 …… 136
第四节　裂缝宽度的计算 …… 142
第五节　长期荷载及重复荷载对裂缝的影响 …… 147
第六节　裂缝与钢筋的锈蚀 …… 148
**第八章　钢筋混凝土构件的刚度和变形** …… 151
第一节　刚度和变形分析 …… 151
第二节　变形计算 …… 154
第三节　长期荷载作用下的挠度 …… 158
第四节　重复荷载下受弯构件的变形 …… 160
**第九章　混凝土结构的收缩、徐变和温度效应** …… 162
第一节　混凝土因收缩、徐变引起的截面应力重分布 …… 162
第二节　超静定结构因收缩徐变引起的内力重分布 …… 166
第三节　徐变对压杆稳定的影响 …… 170
第四节　混凝土结构的温度效应 …… 173
**第十章　结构的延性与抗震** …… 176
第一节　延性的基本概念 …… 176
第二节　单调荷载下的延性计算 …… 180
第三节　结构抗震及延性的试验研究 …… 183
第四节　桥梁抗震设计的考虑 …… 189
第五节　钢筋混凝土桥墩的延性 …… 193
**第十一章　钢筋混凝土结构设计方法** …… 198
第一节　结构可靠度理论的基本概念 …… 198
第二节　结构可靠度计算方法 …… 202
第三节　公路桥梁结构可靠度分析 …… 208
**第十二章　钢筋混凝土结构的有限元分析** …… 215
第一节　材料的本构关系 …… 215
第二节　混凝土的开裂及裂缝处理 …… 215
第三节　钢筋与混凝土的联结 …… 218
第四节　钢筋混凝土结构的有限元模型 …… 219
第五节　算例 …… 231
**主要参考文献** …… 233

# 第一章　钢筋的物理力学性能

## 第一节　钢筋的分类和应力—应变曲线

### 一、钢筋的分类

钢筋混凝土及预应力混凝土构件中所用的钢筋分为两类：普通钢筋和预应力钢筋。

普通钢筋系指钢筋混凝土构件中的钢筋和预应力混凝土构件中的非预应力钢筋，它分为R235(Q235)、HRB335、HRB400和KL400四种。前者为光圆钢筋，后三者为带肋钢筋。预应力混凝土构件中的箍筋应选用其中的带肋钢筋。

R235为光圆钢筋强度等级代号，Q235为牌号，即指原标准中的Ⅰ级钢筋；HRB335为钢筋牌号，相当于原标准Ⅱ级钢筋；HRB400也为钢筋牌号，相当于原标准的Ⅲ级钢筋；KL400钢筋为余热处理钢筋的强度等级代号，其强度相当于原标准的Ⅲ级钢筋。另外，原热轧Ⅳ级钢筋已不被列入现行国家标准和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(送审稿)。

普通钢筋的抗拉强度标准值 $f_{sk}$、抗拉强度设计值 $f_{sd}$ 和抗压强度设计值 $f'_{sd}$ 见表1-1所示。

普通钢筋的 $f_{sk}$、$f_{sd}$ 及 $f'_{sd}$ 值(MPa)　　表1-1

| 钢筋种类 | | 符号 | $f_{sk}$ | $f_{sd}$ | $f'_{sd}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| R235(Q235) | $d=8\sim20$ | $\phi$ | 235 | 195 | 195 |
| HRB335 | $d=6\sim50$ | $\Phi$ | 335 | 280 | 280 |
| HRB400 | $d=6\sim50$ | $\Phi$ | 400 | 330 | 330 |
| KL400 | $d=8\sim40$ | $\Phi^R$ | 400 | 330 | 330 |

注：1.表中 $d$ 指国家标准中的钢筋公称直径。

2.钢筋混凝土轴心受拉和小偏心受拉构件的钢筋抗拉强度设计值大于280MPa时，仍应按280MPa取用；其它构件的钢筋抗拉强度设计值大于330MPa时，仍应按330MPa取用。

3.构件中配有不同种类的钢筋时，每种钢筋应采用各自的强度设计值。

预应力钢筋系指预应力混凝土构件中的钢丝、钢绞线及高强度精轧螺纹钢筋。预应力钢丝系指国家标准《预应力混凝土用钢丝》(GB/T 5223—1995)及其第一号修改单中的三面刻痕钢丝、螺旋肋钢丝和消除应力光面钢丝。预应力钢绞线和钢丝分为Ⅰ级松弛和Ⅱ级松弛(低松弛)。

预应力钢筋的公称直径、抗拉强度标准值 $f_{pk}$、抗拉强度设计值 $f_{pd}$ 和抗压强度设计值 $f'_{pd}$ 等见表1-2所示。

预应力钢筋的 $f_{pk}$、$f_{pd}$ 及 $f'_{pd}$ 值(MPa)　　表1-2

| 钢筋种类 | 公称直径(mm) | 符号 | $f_{pk}$ | $f_{pd}$ | $f'_{pd}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 钢绞线 1×2(二股) | $d=8.01\backslash0.0\backslash12.0$ | $\phi^s$ | 1 470 | 1 000 | 390 |
| 1×3(三股) | $d=8.6\backslash10.8\backslash12.9$ | | 1 570 | 1 070 | |
| | | | 1 720 | 1 170 | |
| 1×7(七股) | $d=9.5\backslash11.1\backslash12.7\backslash15.2$ | | 1 860 | 1 260 | |

续上表

| 钢筋种类 | 公称直径(mm) | 符号 | $f_{pk}$ | $f_{pd}$ | $f'_{pd}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 消除应力光面钢丝和螺旋肋钢丝 | $d=4、5、6、7、8、9$ | $\phi^{w}$ | 1 470 | 1 000 | 410 |
| | | | 1 570 | 1 070 | |
| | | | 1 670 | 1 140 | |
| | | | 1 770 | 1 200 | |
| 消除应力刻痕钢丝 | $d=4\sim9$ | $\phi^{d}$ | 1 470 | 1 000 | 410 |
| | | | 1 570 | 1 070 | |
| 精轧螺旋钢筋 | $d=18、25、32、40$ | JL | 540 | 450 | 400 |
| | | | 785 | 650 | |
| | | | 930 | 770 | |

注:表中 $d$ 系指国家标准和企业标准中的钢绞线、钢丝和精轧螺纹钢筋的公称直径。

普通钢筋的弹性模量 $E_s$ 和预应力钢筋的弹性模量 $E_p$ 如表 1-3 所示。

**钢筋的弹性模量(MPa)** 表 1-3

| 钢筋种类 | $E_s$ 或 $E_p$ | 钢筋种类 | $E_s$ 或 $E_p$ |
|---|---|---|---|
| R235(Q235) | $2.1\times10^5$ | 消除应力钢丝、螺旋肋钢丝、刻痕钢丝 | $2.05\times10^5$ |
| HRB335、HRB400、KL400、精轧螺纹钢筋 | $2.0\times10^5$ | 钢绞线 | $1.95\times10^5$ |

## 二、钢筋的基本力学性能及微观分析

钢筋的应力—应变关系,一般采用原钢筋、表面不经切削加工的试件进行拉伸试验加以测定。一般认为,钢筋的受压应力—应变曲线与受拉曲线相同,至少在屈服前和屈服台阶相同。故钢材的抗压(屈服)强度和弹性模量都采用受拉试验测得的相同值。

习惯上根据钢筋抗拉强度标准值的大小或应力—应变曲线上有无明显的屈服台阶,将钢材分成两大类,分别称为软钢和硬钢。属于软钢的有 R235(Q235)、HRB335、HRB400 和 KL400 四种钢筋,属于硬钢的有钢丝、钢绞线及高强度精轧螺纹钢筋。

1.软钢的基本力学性能

钢筋开始受力后(见图 1-1 所示),应力与应变成比例增长,至比例极限($P$ 点)为止。之后,应变比应力增长稍快,应力—应变关系线微曲。但在弹性极限($E$ 点)前,试件卸载后,应变仍沿加载线返回原点,无残余变形,故 $PE$ 段为非线性弹性变形区。

超过弹性极限后应变增长加快,曲线斜率稍减。到达上屈服点 $Y_u$ 后,应力迅速跌落,出现一个小尖峰;继续增大应变,应力经过下屈服点 $Y_l$ 后有少量回升。此后,曲线进入屈服段,应力虽有上下波动,但渐趋稳定,形成明显的台阶。上屈服点 $Y_u$ 取决于试件的形状和加载速度而在一

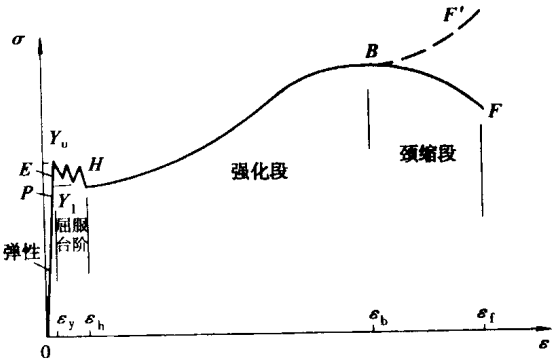



图 1-1 热轧钢筋拉伸曲线



试读结束:需要全本请在线购买: www.ertongbook.com

定范围内变动，下屈服点则相对稳定。

钢筋在屈服段经历了较大的塑性变形后，进入强化段（$H$），应力再次稳步增大，直至极限强度点 $B$。此后，应变继续增大，而拉力明显减小，试件的一处截面逐渐减小，出现颈缩现象。最终，试件在颈缩段的中间拉断（$F$）。颈缩段应力—应变曲线（$BF$）下降是按钢筋原截面积计算的结果，若将拉力除以当时颈缩段的最小截面积，则得持续上升段 $BF'$。拉断后试件的伸长变形除以试件原长（取直径的 5 倍或 10 倍）称为极限延伸率（$\delta_5$ 或 $\delta_{10}$）。

从工程应用的观点，将上、下屈服点合并为一个屈服点，一般取为数值较稳定、且偏低的下屈服点 $b$（见图 1-2 所示的典型热轧钢筋拉伸曲线），相应的应力值称为屈服强度。相应于破坏阶段 $d$ 点的强度，称为钢筋的抗拉强度，又称为钢筋的极限强度。

钢筋的应力—应变现象可以用位错滑移理论得到解释。

钢是一种微细晶体的结合，并按一定规律排列。在比例极限以内时，弹性变形主要取决于晶体阵上原子间的相互作用力。在弹性变形阶段，主要是金属内部原子间距离改变，如图 1-3a）为弹性拉伸金属原子间距离改变示意图。

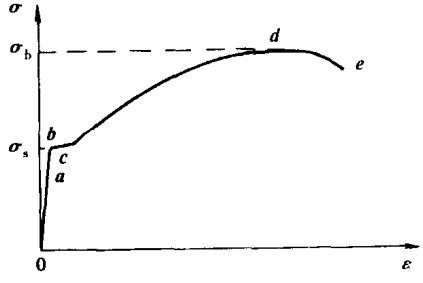



图 1-2　典型热轧钢筋拉伸曲线

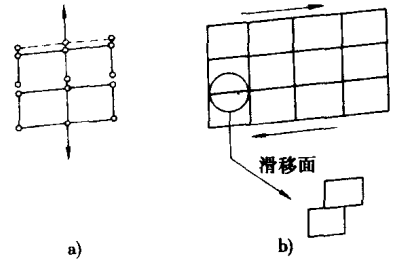



图 1-3　晶粒变形弹塑性情况示意

塑性变形就是金属晶体顺某些结晶面发生滑移的结果，也就是说顺晶体的某个结晶面所施加的剪应力超过了晶体临界切应力而产生滑移，如图 1-3b）所示。金属内部无数晶粒的滑移量总和，就构成了宏观的塑性变形。从理论上计算完整单晶体中某个晶面的临界切应力，要比实测值大 2～3 个数量级。出现这种现象的原因，是实际晶体中有缺陷——位错。位错理论认为金属晶体中原子排列不是想象的那样整齐，发生塑性变形时，滑移面不是整排原子一起移动，而是通过缺陷的移动去完成晶面间的相对滑移。考虑位错后，计算值符合实测值；电子显微镜的观察也证实了晶体的不完整性。可见金属晶体塑性变形，实质上就是位错的移动形成晶面滑移所造成的。

至于某些金属中出现屈服上下限，Cottrel 认为，溶解于钢中的原子或离子态的氧、氮、碳等杂质原子处于位错中心，起了钉扎作用。这些溶解杂质原子称为 Cottrel 气团，Cottrel 气团增加了位错运动的阻力，宏观反应可提高屈服限值，这就形成单轴拉伸时屈服上限。但当位错在应力作用下，一旦发生运动，杂质原子的运动跟不上位错，位错就脱锚，于是发生低应力下的滑移，这就是屈服下限。

晶体中位错运动发生滑移时，一方面是晶粒变形，另一方面位错会发生繁殖，使晶体内位错数量增多。当位错密度大量增加后，由于位错运动时发生交割等现象，位错运动阻力同样增加，这就导致发生塑性变形后的变化。钢筋拉伸超过屈服后的强化现象就是这种情况。

2.硬钢的基本力学性能

硬钢通常没有明显的屈服台阶，为了便于应用，通常取残余变形的 0.1%处应力作为弹性

极限强度，取残余变形的0.2%处的应力作为钢筋的条件屈服强度(图1-4)。硬钢的抗拉强度比软钢大得多，但延伸率(伸长率)却小得多，一般呈脆性破坏。

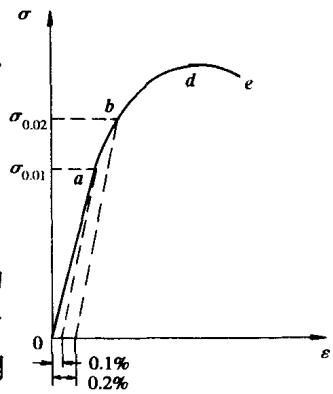


图1-4 硬钢的应力—应变曲线

## 三、钢筋应力—应变曲线的数学描述

要建立钢筋应力—应变曲线的数学描述，首先要通过钢筋的拉伸试验正确计算每一点的应变及相对应的应力，并绘制钢筋的应力—应变曲线；然后，根据实际工程的精度要求，对钢筋的应力—应变曲线进行适当简化，选择相应的力学计算模型，从而建立钢筋的应力—应变关系式。

1.钢筋应力—应变曲线的绘制

钢筋的应力—应变曲线是由该材料制成的标准拉伸试件经拉伸试验得出的。从前面的阐述中可知，在应力—应变曲线上，当应力增至最高点后，如继续增加变形，应力反而下降。这个阶段通常称为颈缩(拉伸失稳)。但从实际情况分析，真实的应力并不一定下降，这是因为，此时虽然试件出现了颈缩，但相应地截面面积减小了，如能考虑到截面积减小这一真实情况，真实应力是增加而不是减小。

事实上，钢筋试件在拉伸过程中其截面是不断变化的，在出现塑性变形以后，这种变化带来的影响更加显著。有时，为了反映这一现象，应力的计算不能再笼统地用力与钢筋初始截面积之比来获得，而必须采用真实应力这一概念，如下式所示：

$$\sigma = P/A = 4P/\pi d^2 \tag{1-1}$$

式中：$\sigma$——真实应力；

$P$——试样承受的瞬时载荷；

$A$——试样的瞬时截面积；

$d$——圆截面试件的直径。

在试件出现塑性变形以后，由于虎克定律不再适用，真实应变的计算可按如下公式进行。

用试件的瞬时长度 $l$ 来表示应变，则每一瞬时的应变增量为：

$$\mathrm{d}\varepsilon = \mathrm{d}l/l \tag{1-2}$$

从 $l_0$ 开始变形所累积的应变该是：

$$e = \int_{l_0}^{l} \mathrm{d}\varepsilon = \int_{l_0}^{l} \frac{\mathrm{d}l}{l} = \ln\frac{l}{l_0} \tag{1-3}$$

式(1-3)为对数应变，在考虑大变形时用这种形式表示应变更为合理。

利用体积不变的原理有：

$$A_0 l_0 = Al \tag{1-4}$$

式中下标“0”表示试件的原始状态，于是，式(1-3)可写为：

$$e = \ln\frac{l_0 + \Delta_0}{l_0} = \ln(1+\varepsilon) = \ln\frac{A_0}{A} = \ln\frac{d_0^2}{d^2} \tag{1-5}$$

在试件出现颈缩之前的均匀拉伸阶段，由式(1-1)表示的真实应力及由式(1-5)表示的真实应变是正确的。为了测定试件均匀变形阶段的真实应力—应变关系，只须测出瞬时载荷与试件的瞬时直径(或瞬时长度)，即可用(1-1)和(1-5)两式进行计算。而颈缩以后由于变形局部集中，使得试件工作部分的直径不是处处相等，这时真实应变只能通过测出颈缩处最小直径，用

公式(1-5)来计算。此时的真实应力,由于颈缩处已不是简单轴向拉伸状态,而变成了复杂的三向应力状态,必须用八面体切应力理论求出等效应力来修正。目前常用的修正公式是由伯瑞吉曼(Bridgman)提出的,他假设颈缩处试件的外形轮廓在最小截面处是一个圆,如图 1-5 所示,修正公式为:

$$\sigma_B = \sigma \Big/ \left(1 + \frac{2R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right) \tag{1-6}$$

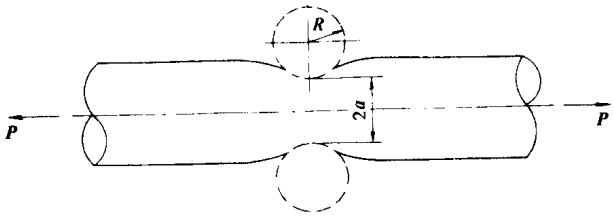



图 1-5　颈缩分析图式

也有学者通过对拉伸试样的颈缩部位应力分析认为,试件在颈缩处外形轮廓更接近于双曲线,按此假设,有修正公式:

$$\sigma_C = \sigma \Big/ \frac{1}{2}\left[1 + \left(1 + \frac{R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{R}\right)\right] \tag{1-7}$$

在式(1-6)和式(1-7)中 $\sigma$ 由式(1-1)表示。其它符号见图 1-5 所示。

计算发现,公式(1-6)和(1-7)计算结果相差很小,但式(1-7)更接近真实情况。这样,通过公式(1-6)(或式(1-7))及公式(1-5)计算出真实应力和真实应变,便可绘制成真实应力—应变曲线(如图 1-1 中虚线段所示)。

2.钢筋应力—应变曲线的数学描述

根据实际工程或分析研究的精度要求,可对钢筋的应力—应变关系进行不同的简化,即选用不同的力学计算模型。

对于软钢,其应力—应变曲线有明显的屈服台阶,通常其计算模型有以下几种:

(1)理想弹塑性模型认为钢筋材料在屈服以前为线弹性,一旦屈服则为理想塑性状态,应力不再增加(图 1-6),因此,其应力—应变关系为两个在屈服点处相连的直线方程。一般结构破坏时钢筋的应变($\not>1\%$)尚未进入强化段,此模型适用。

(2)弹性—强化模型为二折线,屈服后的应力—应变关系简化为很平缓的斜直线,可取 $E'_s = 0.01E_s$(图 1-7),其优点是应力—应变关系在屈服后仍保持唯一性。

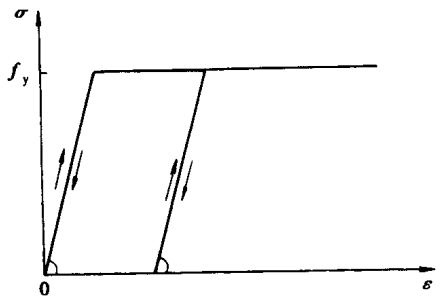



图 1-6　理想弹塑性

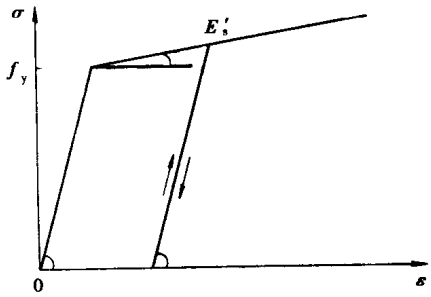



图 1-7　弹性—强化

(3)三折线(图 1-8)或曲线的弹—塑性强化模型(图 1-9)较为复杂些,但可以较准确地描述钢筋的大变形性能。

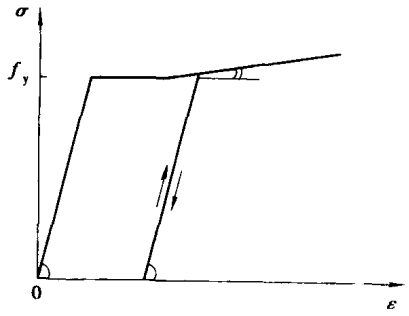



图 1-8　弹塑性强化

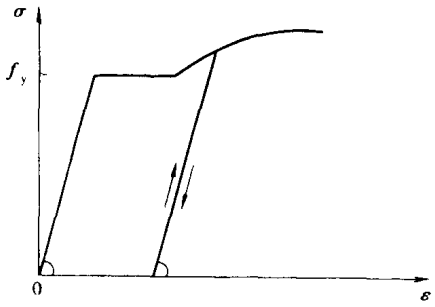



图 1-9　弹塑性强化

对于硬钢，拉伸曲线上没有明显的屈服台阶。其比例极限约为抗拉极限强度的 0.75，即 $\sigma_e = 0.75 f_b$。当曲线成水平时达到抗拉极限强度 $f_b$，随后，曲线稍有下降，出现少量颈缩后立刻被拉断。极限延伸率较小，约为 5% ~ 7%。结构设计时，需对这类钢材定义一个名义的屈服强度作为设计值。我国和其它许多国家一样，将对应于残余应变为 0.002 时的应力 $f_{0.2}$ 作为屈服点 $Y$，根据试验结果得：

$$f_{0.2} = (0.8 \sim 0.9) f_b \tag{1-8}$$

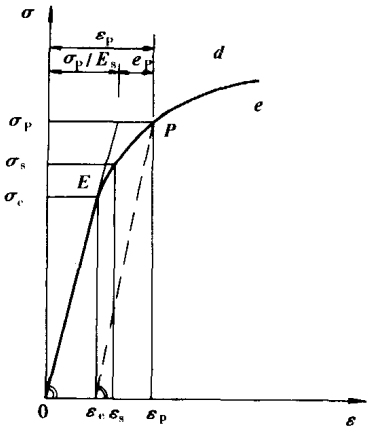



图 1-10　硬钢本构模型

硬钢的应力—应变关系的力学计算模型为直线—曲线模型（如图 1-10），已知弹性模量 $E_s$、弹性极限点 $E$ 处的应力和应变（$\sigma_e, \varepsilon_e$）和曲线上一个参考点 $P$ 处的应力和应变（$\sigma_P, \varepsilon_P$；其应变由弹性和塑性两部分组成，即 $\varepsilon_P = \sigma_P / E_s + e_P$），则曲线上应力为 $\sigma_k$ 的任一点 $k$ 的应变为：

$$\varepsilon_k = \frac{\sigma_k}{E_s} + e_P \left( \frac{\sigma_k - \sigma_e}{\sigma_P - \sigma_e} \right)^n \tag{1-9}$$

式中，参数 $n = 7 \sim 30$，取决于钢材的种类。

于是，硬钢应力—应变曲线的数学描述为：

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon_k &= \frac{\sigma_k}{E_s} & 0 \leqslant \sigma_k \leqslant \sigma_e \\ \varepsilon_k &= \frac{\sigma_k}{E_s} + e_P \left( \frac{\sigma_k - \sigma_e}{\sigma_P - \sigma_e} \right)^n & \sigma_e \leqslant \sigma_k \leqslant \sigma_P \end{aligned}\right\} \tag{1-10}$$

以上即为 Ramberg - Osgood 模型。

## 第二节　钢筋的锈蚀

### 一、钢筋锈蚀及其机理

钢筋的锈蚀使受力截面积减小，锈蚀层膨胀使混凝土保护层沿钢筋方向开裂，尔后脱落，不仅影响了钢筋混凝土结构的正常工作，而且大大影响了它们的耐久性。

在日本大约有 21.4% 的钢筋混凝土结构损坏实例是因钢筋锈蚀引起的，如果再加上混凝土碳化引起的损坏则所占比例更高。前苏联有关资料统计，仅工业厂房受腐蚀损坏的总额就占其固定资产的 16%，有些厂房的钢筋混凝土结构使用 10 年左右即严重损坏，需要经常维修，有些建

筑物的维修费用已超过其原造价。另外，钢筋锈蚀还常引起一些建(构)筑物的倒塌事故。

因此，钢筋锈蚀已越来越引起人们的注意，许多国家都十分重视研究混凝土结构中钢筋的锈蚀与防护问题，不断推出新的检测评价方法与监控防护措施。

钢筋的锈蚀过程是一个电化学反应过程。混凝土空隙中的水分通常以饱和的氢氧化钙溶液形式存在，其中还含有一些氢氧化钠和氢氧化钾，pH 值约为 12.5。在这样强碱性的环境中，钢筋表面形成钝化膜，它是厚度为 20Å ~ 60Å 的水化氧化物($nFe_2O_3 \cdot mH_2O$)，阻止钢筋进一步腐蚀。因此，施工质量良好、没有裂缝的钢筋混凝土结构，即使处在海洋环境中，钢筋基本上也不会发生锈蚀。但是，一旦由于某些原因使钢筋表面的钝化膜受到破坏，成为活化态时，钢筋就容易锈蚀。

呈活化态的钢筋表面所进行的锈蚀反应的电化学机理是：当钢筋表面有水分存在时，就发生铁电离的阳极反应和溶解态氧还原的阴极反应，相互以等速度进行，其反应式如下：

阳极反应 $$2Fe - 4e^- \rightarrow 2Fe^{2+} \quad (1\text{-}11)$$

阴极反应 $$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \quad (1\text{-}12)$$

锈蚀过程的全反应是阳极反应和阴极反应的组合，在钢筋表面析出氢氧化亚铁(图 1-11)，其反应式为：

$$2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4OH^- \rightarrow 2Fe(OH)_2 \quad (1\text{-}13)$$

该化合物被溶解氧化后生成氢氧化铁 $Fe(OH)_3$，并进一步生成 $nFe_2O_3 \cdot mH_2O$(红锈)，一部分氧化不完全的变成 $Fe_3O_4$(黑锈)，在钢筋表面形成锈层。红锈体积可大到原来体积的四倍，黑锈体积可大到原来的二倍。铁锈体积膨胀，对周围混凝土产生压力，将使混凝土沿钢筋方向开裂，进而使保护层成片脱落，而裂缝及保护层的剥落又进一步导致更剧烈的锈蚀。

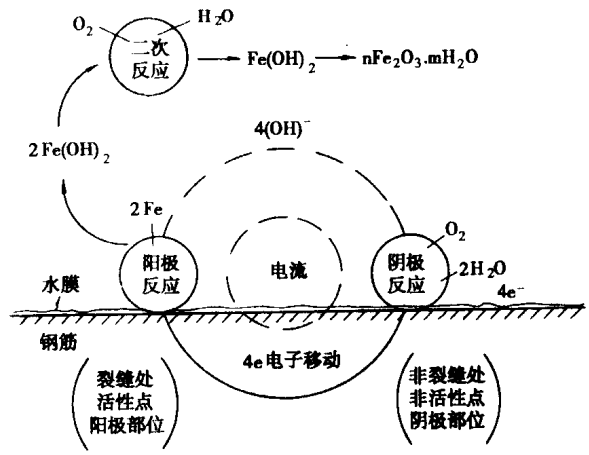



图 1-11 锈蚀反应

## 二、混凝土中钢筋锈蚀的主要因素

### 1.普通钢筋混凝土中的钢筋

普通钢筋混凝土中钢筋锈蚀的因素是多方面的，它们之间的相互关系也很复杂，其中主要因素有以下几方面：

(1)碱度和氯化物浓度

混凝土中的碱性成分在钢筋表面形成钝化膜，其可靠性和保护能力取决于混凝土的碱度。碱度越高，即 pH 值越大，钝化膜的保护作用越强。但当碱性成分被融出和碳化作用产生影响，使混凝土的碱度降低或存在有害成分时，则钝化膜被破坏而引起钢筋锈蚀。破坏钢筋钝化膜的有害成分有卤素离子($Cl^-$、$Br^-$、$J^-$)、硫酸根($SO_4^{2-}$)及硫离子($S^{2-}$)等，其中氯离子的破坏作用最强，且对钝化膜产生局部性的破坏，使钢筋表面产生点状腐蚀。由于使用含氯化物的早强剂或海砂，使混凝土中掺入氯离子，或在海洋环境中因海水和海风作用使氯离子渗入混凝土也是常有的情况，因此，对混凝土中氯化物的含量应加以限制。

(2)氧

钢筋锈蚀的最基本因素是，存在氧化物、pH 值低以及钢筋表面有氧和水存在等。例如，当海水浸入到钢筋表面时，即使氯化物中的氯离子破坏了钝化膜，但只要氧达不到钢筋表面，钢

筋锈蚀也不会发生。氧是以溶解态存在于海水中的，但其扩散速度很慢。因此，浸没在海水中的钢筋混凝土结构，钢筋不易锈蚀。而处于海面上的浪花飞溅带的钢筋混凝土结构，因有充足的氧，该部位的钢筋就特别容易锈蚀。但若混凝土密实性好，渗透性低，则可抑制氧的进入，防止钢筋锈蚀。混凝土中氧的扩散性能随其质量及保护层厚度而异。一般认为，钢筋表面的钝化膜要比混凝土本身阻止扩散的能力大。

(3)透水性

存在水分是钢筋锈蚀的基本条件。因此，混凝土的透水性能越强，水分越易进入混凝土，钢筋就越容易锈蚀。水灰比对混凝土的透水性影响很大。降低水灰比，可提高钢筋的抗蚀性。此外，保护层厚度对透水性有影响，从而对钢筋抗蚀性也有影响。

(4)碳化

混凝土中的氢氧化钙和二氧化碳反应生成碳酸钙，所以，处于空气或含有二氧化碳环境中的混凝土，其表面将逐渐失去碱性。当混凝土与水接触时，其中的氢氧化钙会析出。混凝土在这些化学反应作用下，由于高碱性而在钢筋表面形成的钝化膜遭到破坏，从而加速了钢筋的锈蚀。通常混凝土的碳化速度较慢，碳化层厚度往往在 2cm ~ 3cm 以下。

(5)电池效应

混凝土中钢筋的锈蚀不仅是由于钝化膜破坏所致，有时也因为混凝土内部或外部环境的不均匀的电池效应而产生。这类电池效应有以下两种情况：

①异种金属接触作用。若在混凝土中存在两种相互接触的异种金属，则在两种金属之间形成“电池”，低电位一方的金属成为阳极而引起锈蚀。在潮湿环境或有氯化物存在时，必须避免使用异种金属。由于异种金属接触引起的电池效应的强弱和影响范围，由两种金属间的电位差、形状、面积比、混凝土含水量、孔隙率等因素所决定，所以，即使是同一种金属，有时也会形成类似的电池作用。例如，混凝土中钢筋的一部分未用混凝土覆盖而裸露在外面，则在由混凝土覆盖部分的钢筋和裸露部分的钢筋之间便形成了活化—碳化电池。这种电池可产生数百 mV 的电位差，使裸露部分的钢筋剧烈锈蚀。

②浓差电池作用。当混凝土中各部分的氧浓度、氯化物浓度或碱浓度不同时，则在低浓度处的钢筋成为阳极，高浓度处的钢筋成为阴极，形成浓差电池，从而促使阳极部分钢筋锈蚀。其中氧浓差电池对钢筋锈蚀的影响尤其显著。

(6)漏泄电流引起的电锈蚀

一般交流电在混凝土结构中危害不大，但有直流电通过时，若有漏泄的电流产生，就会使钢筋剧烈锈蚀。在优质混凝土中，即使有少量的漏泄电流，也不会破坏钢筋的钝化，不致引起电腐蚀。但是，已碳化部分的钢筋容易引起电锈蚀。

2.预应力混凝土中的钢筋

对于预应力混凝土中的预应力高强钢筋(钢丝、钢绞线等)，因其工作应力比普通钢筋混凝土中钢筋的工作应力高，而截面却小得多，所以预应力钢筋遭受锈蚀后的影响比普通钢筋混凝土严重得多。国外文献中报道过不少因预应力钢筋锈蚀造成预应力混凝土结构损坏的事例。预应力钢筋的锈蚀主要有下述三种情况：

(1)锈坑腐蚀

导致锈坑腐蚀的原因和普通混凝土的电化学作用相同，但就预应力钢筋而言，锈坑腐蚀比均匀腐蚀更为危险。因为锈坑产生的槽口效应会引起应力集中，严重降低钢筋的延性和疲劳强度，将严重影响结构的安全。



试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com