

交通科技丛书  
JTKJCS

# 钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁 结构设计原理

Design of Reinforced and Prestressed  
Concrete Bridge Structure

按新编《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTGD60—2004)编写

张树仁 郑绍珪 黄 侨 鲍卫刚 编著



人民交通出版社

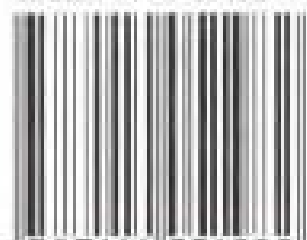
China Communications Press

责任编辑 韩 敏  
文字编辑 王 霞 岑 瑜 龙海燕  
美术编辑 彭小秋



# 钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁 结构设计原理

ISBN 7-114-05198-0



9 787114 051982 >

ISBN 7-114-05198-0

定价：45.00 元

# 钢筋混凝土及 预应力混凝土桥梁结构设计原理

Gangjin Hunningtu Ji Yuyingli Hunningtu  
Qiaoliang Jiegou Sheji Yuanli

按新颁《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)编写

张树仁 郑绍珪 黄 侨 鲍卫刚 编著

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书参照高等学校交通土建、桥梁工程和道路工程专业结构设计原理(钢筋混凝土及预应力混凝土结构部分)课程教学大纲,结合新颁桥梁设计规范编写而成,该书系统地阐述了钢筋混凝土及预应力混凝土结构设计的基本原理和方法。书中对新规范有关条文和计算公式的背景及应用注意事项作了解释性阐述,以使读者能准确理解规范的原意,正确应用规范进行桥梁工程结构的设计。

本书可作为高等院校交通土建、桥梁工程和道路工程专业《结构设计原理》课的教材,同时可作为从事公路及城市桥梁设计、科研、施工及管理人员学习和应用新规范的辅导材料。

### 图书在版编目(CIP)数据

桥梁钢筋混凝土及预应力混凝土结构设计原理/张树仁等编著. —北京:人民交通出版社,2004.8  
(交通科技丛书)  
ISBN 7-114-05198-0

I. 桥... II. 张... III. ①钢筋混凝土桥-桥梁结构-结构设计-高等学校-教材 ②预应力混凝土桥-桥梁结构-结构设计-高等学校-教材 IV. ①U448.33  
②U448.35

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第083957号

### 交通科技丛书

书 名: 钢筋混凝土及预应力混凝土桥梁结构设计原理  
著 者: 张树仁 郑绍珪 黄 桥 鲍卫刚 编著  
责任编辑: 韩 敏  
出版发行: 人民交通出版社  
地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号  
网 址: <http://www.ccpres.com.cn>  
销售电话: (010)85285656,85285838,85285995  
总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司  
经 销: 各地新华书店  
印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司  
开 本: 787×960 1/16  
印 张: 28  
字 数: 432千  
版 次: 2004年9月第1版  
印 次: 2004年9月第1版第1次印刷  
书 号: ISBN 7-114-05198-0  
印 数: 0001—6000册  
定 价: 45.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

## 前 言

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)的修订工作前后历时6年多,将于2004年10月1日正式实施。在规范修订过程中,规范修订组会同哈尔滨工业大学、同济大学和湖南大学等单位进行了专题科研,并吸收借鉴了国内其他单位的相关科研成果和工程实践经验,借鉴了国际先进的标准规范,与国内相关规范进行了比较和协调。按《公路工程结构可靠度设计统一标准》(GB/T 50283—1999)的规定,新规范采用了以概率理论为基础的极限状态设计方法;改进了材料强度取值原则;增加了有关结构耐久性的规定;全面改进和补充了各种构件的承载力计算内容;改善了预应力混凝土受弯构件的抗裂限值、裂缝宽度及构件刚度的计算方法;对各种构件的构造要求也作了较全面的补充和完善。

为适应桥梁设计规范的变化,及时地更新教学内容是教学改革的核心。《结构设计原理》是交通土建、桥梁工程及道路工程专业的重要专业基础课,其内容应以我国现行桥梁设计规范为依据,反映桥梁及结构工程科研和工程实践的最新成果。

本书主要面向高等学校交通土建、桥梁工程及道路工程专业学生,其主要内容是根据结构设计原理(钢筋混凝土及预应力混凝土结构部分)课程教学大纲编排的。书中结合新规范系统地叙述了钢筋混凝土及预应力混凝土结构设计的基本原理和方法;重点阐述了受弯构件、轴心受压构件、偏心受压构件、偏心受拉构件和受扭及弯扭构件的承载力、抗裂性、裂缝宽度和变形计算的基本原理和方法,并列举了大量的计算实例加以应用说明。本书可作为高等院校相关专业的本科生教材。

本书也可作为从事公路与城市桥梁设计、科研、施工及管理人员学习和应用新规范的辅导材料。笔者试图用浅显的文字,对新规范的有关条文和计算公式的背景及应用注意事项作解释性阐述,使读者准确理解规范的原意,正确地应用规范进行设计。

本书由哈尔滨工业大学张树仁、黄侨和新规范主要起草人 中交公路规

划设计院郑绍珪、鲍卫刚共同编写,张树仁主编,郑绍珪主审。哈尔滨工业大学王宗林参与了第十五章综合例题的计算和编写工作,研究生马亮、宋建永、任远参与了部分例题计算和绘图工作。在本书编写过程得到了哈尔滨工业大学及中交公路规划设计院领导的关心和支持。人民交通出版社公路图书部韩敏、王霞等同志付出了辛勤的劳动,在此一并表示谢意。由于编者水平所限,书中难免有不妥或疏漏之处,敬请读者批评指正。

张树仁

2004年8月于哈尔滨

## 目 录

总论	1
第一章 钢筋混凝土结构材料的物理力学性能	6
§ 1-1 混凝土的物理力学性能	6
§ 1-2 钢筋的物理力学性能	24
§ 1-3 钢筋与混凝土之间的粘结	35
第二章 钢筋混凝土结构设计基本原理	39
§ 2-1 结构的可靠性概念	39
§ 2-2 极限状态与极限状态方程	41
§ 2-3 概率极限状态设计原理	44
§ 2-4 承载能力极限状态设计原则	49
§ 2-5 正常使用极限状态设计原则	57
§ 2-6 混凝土结构的耐久性设计	59
第三章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	66
§ 3-1 钢筋混凝土受弯构件构造要点	66
§ 3-2 钢筋混凝土梁正截面破坏状态分析	72
§ 3-3 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力极限状态 计算的一般问题	75
§ 3-4 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	80
§ 3-5 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	87
§ 3-6 T形截面受弯构件正截面承载力计算	91
§ 3-7 在正截面承载力计算中引入纵向受拉钢筋极限拉应变限制的 物理意义及控制方法	105
第四章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	109
§ 4-1 概述	109
§ 4-2 斜截面剪切破坏状态分析	110

§ 4-3	斜截面抗剪承载力计算	112
§ 4-4	变高度梁斜截面抗剪承载力计算	122
§ 4-5	斜截面抗弯承载力计算	127
§ 4-6	全梁承载能力校核	129
§ 4-7	综合例题:装配式钢筋混凝土简支 T 形梁设计	132
<b>第五章</b>	<b>钢筋混凝土受压构件承载力计算</b>	<b>143</b>
§ 5-1	轴心受压构件承载力计算	143
§ 5-2	偏心受压构件承载力计算的一般问题	152
§ 5-3	矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	159
§ 5-4	I 形(或箱形)截面偏心受压构件正截面承载力计算	174
§ 5-5	圆形截面偏心受压构件正截面承载力计算	183
§ 5-6	双向偏心受压构件正截面承载力计算	192
<b>第六章</b>	<b>钢筋混凝土受拉构件承载力计算</b>	<b>196</b>
§ 6-1	轴心受拉构件承载力计算	196
§ 6-2	偏心受拉构件承载力计算	197
<b>第七章</b>	<b>钢筋混凝土受扭及弯扭构件承载力计算</b>	<b>200</b>
§ 7-1	概述	200
§ 7-2	钢筋混凝土纯扭构件的承载力计算	202
§ 7-3	受弯、剪、扭共同作用的钢筋混凝土矩形截面构件的承载力计算	212
§ 7-4	复杂形式截面受扭构件的承载力计算	225
<b>第八章</b>	<b>钢筋混凝土构件持久状况正常使用极限状态计算</b>	<b>230</b>
§ 8-1	钢筋混凝土构件裂缝宽度计算	230
§ 8-2	钢筋混凝土受弯构件变形计算	236
<b>第九章</b>	<b>钢筋混凝土结构短暂状况应力验算</b>	<b>240</b>
§ 9-1	钢筋混凝土受弯构件短暂状况正截面应力验算	241
§ 9-2	钢筋混凝土受弯构件短暂状况斜截面应力验算	243
<b>第十章</b>	<b>钢筋混凝土深受弯构件承载能力极限状态计算</b>	<b>251</b>
§ 10-1	深受弯构件的受力性能	251
§ 10-2	深梁的配筋及构造要求	254
§ 10-3	深梁的内力计算	256

§ 10-4	深受弯构件的承载力计算 .....	258
§ 10-5	钢筋混凝土盖梁(短梁)的承载力计算 .....	259
<b>第十一章</b>	<b>预应力混凝土结构的一般问题 .....</b>	<b>265</b>
§ 11-1	预应力混凝土的基本原理 .....	265
§ 11-2	预加力的实施方法 .....	268
§ 11-3	预应力钢筋的锚固 .....	271
§ 11-4	预应力损失 .....	276
§ 11-5	预应力混凝土受弯构件各受力阶段分析 .....	290
§ 11-6	预应力混凝土结构设计计算的主要内容 .....	293
<b>第十二章</b>	<b>预应力混凝土结构持久状况承载能力极限状态计算 .....</b>	<b>295</b>
§ 12-1	预应力混凝土受弯构件正截面承载力计算 .....	295
§ 12-2	预应力混凝土受弯构件斜截面承载力计算 .....	302
§ 12-3	预应力混凝土偏心受压构件正截面承载力计算 .....	306
§ 12-4	预应力混凝土受扭及弯扭构件承载力计算 .....	310
§ 12-5	锚下局部承压承载力计算 .....	311
<b>第十三章</b>	<b>预应力混凝土结构持久状况正常使用极限状态计算 .....</b>	<b>318</b>
§ 13-1	预应力混凝土受弯构件的抗裂性验算 .....	318
§ 13-2	部分预应力混凝土 B 类构件的裂缝宽度计算 .....	325
§ 13-3	预应力混凝土受弯构件的变形计算 .....	327
<b>第十四章</b>	<b>预应力混凝土结构持久状况和短暂状况构件 的应力计算 .....</b>	<b>331</b>
§ 14-1	全预应力混凝土及部分预应力混凝土 A 类构件使用荷 载作用阶段的应力验算 .....	331
§ 14-2	部分预应力混凝土 B 类构件开裂后的应力验算 .....	334
§ 14-3	预应力混凝土受弯构件短暂状况应力验算 .....	339
<b>第十五章</b>	<b>预应力混凝土简支梁设计 .....</b>	<b>342</b>
§ 15-1	预应力混凝土简支梁设计的主要内容和计算步骤 .....	342
§ 15-2	预应力混凝土简支梁的截面设计 .....	343
§ 15-3	预应力混凝土简支梁的配筋设计 .....	346
§ 15-4	组合式受弯构件设计特点 .....	356
§ 15-5	综合例题:预应力混凝土简支梁设计 .....	366
<b>附录:</b>	.....	417
附表 1:	混凝土强度 .....	417

附表 2:混凝土的弹性模量 .....	418
附表 3:普通钢筋强度 .....	418
附表 4:预应力钢筋抗拉强度标准值 .....	418
附表 5:预应力钢筋抗拉、抗压强度设计值 .....	419
附表 6:钢筋的弹性模量 .....	419
附表 7:混凝土相对界限受压区高度(受压区高度界限系数) .....	420
附表 8:普通钢筋和预应力直线形钢筋最小混凝土保护层厚度 .....	420
附表 9:钢筋的计算截面面积及理论质量 .....	420
附表 10:每米板宽内的钢筋截面面积 .....	421
附表 11:预应力钢筋公称截面面积和公称质量 .....	422
附表 12:圆形截面钢筋混凝土偏心受压构件正截面抗压 承载力计算系数 .....	424
附图 1~7:圆形截面钢筋混凝土偏心构件正截面 承载力计算诺模图 .....	427
参考文献 .....	434

# 总 论

## 一、钢筋混凝土的基本概念

钢筋混凝土是由两种力学性能截然不同的材料——钢筋和混凝土结合成整体,共同发挥作用的一种建筑材料。

众所周知,混凝土是一种典型的脆性材料,其抗压强度很高,但抗拉强度很低(约为抗压强度的  $1/18 \sim 1/8$ )。图 1a)所示为一根素混凝土梁的受力情况,在两个对称的集中力  $P_1$  的作用下,梁的上部受压、下部受拉。取跨中纯弯曲段为研究对象,随着荷载  $P_1$  的增加,梁下部受拉区的拉应变(拉应力)和上部受压区的压应变(压应力)不断增大。当下部受拉区边缘的拉应变达到混凝土极限拉应变时,下缘即出现竖直的裂缝。在裂缝截面处受拉区混凝土退出工作,受压区高度减小,即使荷载不再增加,竖向裂缝也会急速向上发展,导致梁的突然断裂[图 1a)]。对应于下部受拉区边缘拉应变等于混凝土极限拉应变的荷载  $P_c$  为素混凝土梁受拉区出现裂缝的荷载,一般称为素混凝土梁的开裂荷载,也就是素混凝土梁的破坏荷载。换句话说,素混凝土梁的承载力是由混凝土的抗拉强度控制的,而混凝土所具有的优越抗压性能则远远未能充分利用。

为了提高混凝土梁的承载力,充分发挥混凝土优越的抗压作用,可采用以下两个解决办法:

(1)在梁的受拉区配置适量的纵向钢筋,构成钢筋混凝土梁[图 1b)]。

在梁的受拉区配置纵向钢筋,以承担拉力,混凝土承担压力,两者结合为整体共同工作。钢筋混凝土梁的试验研究表明,钢筋混凝土梁与截面尺寸相同的素混凝土梁的开裂荷载  $P_c$  基本相同。当荷载略大于开裂荷载  $P_c$  时,梁的受拉区仍会出现裂缝,裂缝处截面受拉区的混凝土逐渐退出工作,拉力转由钢筋承担。随着荷载的增加,钢筋的拉应力和受压区混凝土的压应力将不断增大,直至钢筋的拉应力达到其屈服强度,继而受压区混凝土被压碎,梁才宣告破坏。由此可见,在钢筋混凝土梁中混凝土的抗压强度和钢筋的抗拉强度都得到了充分发挥,因而,其承载力可较素混凝土梁有较大提高。

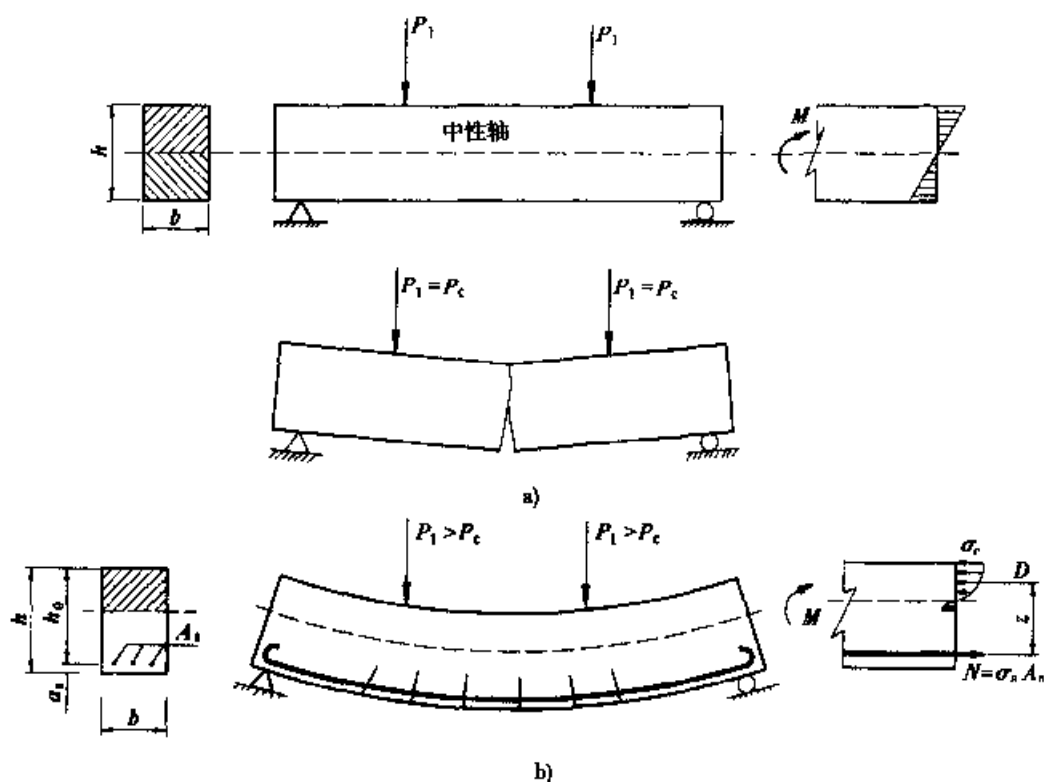


图1 素混凝土和钢筋混凝土梁

(2)对混凝土梁施加预压应力,形成预应力混凝土梁(图2),使混凝土储备一定的压应力,用以抵消或减小外荷载产生的拉应力。

以图2所示的混凝土梁为例,为防止承受荷载后梁的下部出现过大的拉应力而开裂,在荷载作用之前对混凝土梁的受拉区施加一对预加力  $N_p$ ,使得混凝土获得一定的预压应力  $\sigma_{pc}$ 。在外荷载作用下,梁的下部将产生拉应力  $\sigma_t$ ,上部将产生压应力  $\sigma_c$ 。于是梁内任意一点的合成应力为:

$$\sigma_{ce} = \sigma_{pc} - \sigma_t$$

或

$$\sigma_{ce} = \sigma_{pc} + \sigma_c$$

如果预先储备的预压应力  $\sigma_{pc}$ ,足以抵消外荷载产生的拉应力  $\sigma_t$ ,即控制受拉边缘的合成应力满足下列条件:

$$\sigma_{ce} = \sigma_{pc} - \sigma_t \geq 0$$

在荷载作用后,梁的下缘就不会出现拉应力,全梁均处于受压状态。

工程上通常是采用张拉钢筋的办法对混凝土施加预压应力。这从施工工艺上有先张法和后张法之分。钢筋张拉后通过与混凝土间的粘结力或专

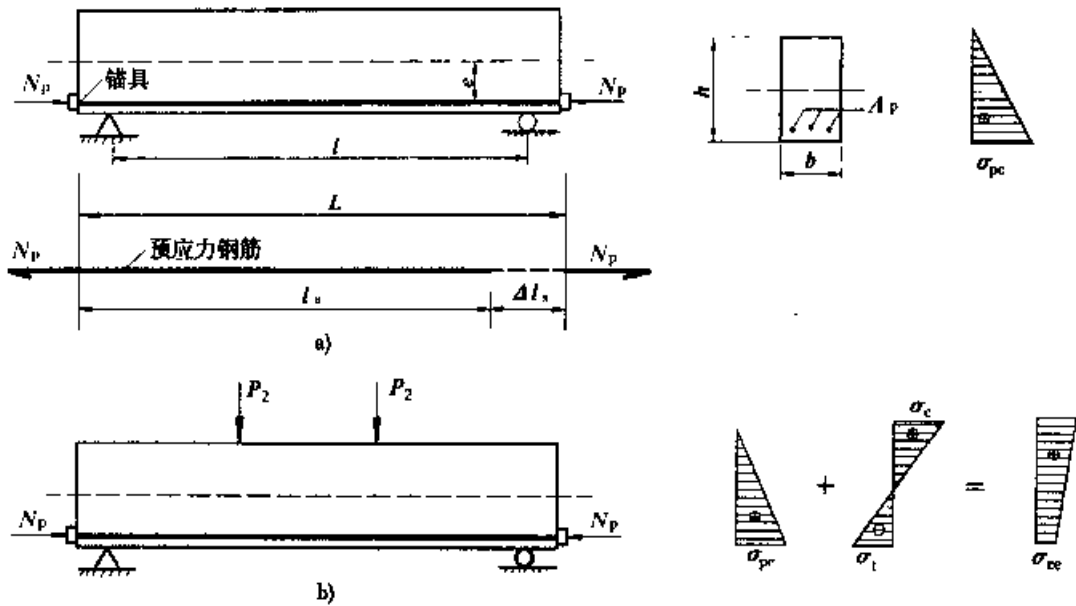


图2 预应力混凝土工作原理

门的锚具将其锚固,传力于混凝土,使混凝土获得预压应力。

从组成材料来看,钢筋混凝土和预应力混凝土同属配筋混凝土的范畴,都是由钢筋和混凝土两种力学性能不同的材料组成的复合结构。尽管其工作原理不同,但作为配筋混凝土结构有很多共同的特性,钢筋和混凝土结合为一个整体共同受力。

钢筋和混凝土两种力学性能不同的材料,结合在一起之所以能有效地共同工作,是基于以下理由:

(1)混凝土干缩硬化后能产生较大的粘结力(或称握裹力),使钢筋与混凝土能很好地结合为一个整体,从而在荷载作用下能共同变形;

(2)钢筋与混凝土具有大致相同的温度膨胀系数,钢材为  $1.2 \times 10^{-5}$ ,混凝土为  $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}$ 。这样,当温度变化时,不致因产生过大的温度应力而破坏两者之间的粘结力,可以保证两者的共同工作;

(3)包裹在钢筋外围的混凝土,可以保护钢筋免于锈蚀,保证结构具有良好的耐久性,这是因为水泥水化作用后,产生碱性反应,在钢筋表面产生一种水泥石质薄膜,可以防止有害介质的直接侵蚀;因此,为了保证结构的耐久性,混凝土应具有较好的密实度,并留有足够厚度的保护层。

## 二、钢筋混凝土结构的优缺点

钢筋混凝土结构问世大约已有一百年,在世界各国的土木工程中得到了广泛的应用,其主要原因在于它具有下述一系列优点。

### 1. 经济性

作为钢筋混凝土的主要材料之一的混凝土,其主要成分为砂和石子,一般均较易就地取材,且价格便宜。水泥用量所占比例一般为 12% ~ 15%,其价格也比钢材、木材便宜。钢材虽价格较高,但用量很小,一般只占混凝土截面面积的 0.3% ~ 3% 左右。因而,经济性较好。

### 2. 耐久性

混凝土的强度随时间的增加而增长,且钢筋受到混凝土的保护而不易锈蚀,所以钢筋混凝土结构具有较好的耐久性。

### 3. 整体性

钢筋混凝土结构(特别是整体浇筑的结构)构件之间是通过钢筋和混凝土的一次性浇筑连接为整体的,其整体性好,对于结构的空间受力、抵抗风振、地震及强烈冲击作用都具有较好的工作性能。

### 4. 可模性

钢筋混凝土可以根据设计需要,浇筑成各种形状和尺寸的构件。只要模板设计成型,结构的外形尺寸也随之而定,具有可模性。特别适合于结构形状复杂或对建筑造型有较高要求的建筑物。

### 5. 耐火性

混凝土热惰性大,传热慢,对包围在其中的钢筋有防火保护作用。实践表明,对有足够厚度混凝土保护层的钢筋混凝土结构,火灾持续时间不长时,不致因钢筋受热软化而造成结构的整体坍落破坏。

同时也应看到,钢筋混凝土存在以下缺点。

#### 1. 自重大

钢筋混凝土结构本身自重大。设计结构物时,若结构本身自重过大,则结构抗力大部分用来承受恒载,这样是不经济的。为了改善混凝土结构自重大的缺点,世界各国都大力发展轻质、高强度混凝土。轻质混凝土制成的结构自重较普通混凝土可减少 20% ~ 30%。

#### 2. 抗裂性差

混凝土的抗拉强度低,钢筋混凝土结构容易出现裂缝。实践表明,只要将裂缝宽度控制在允许宽度(一般规定为 0.15 ~ 0.2mm)之内,裂缝对混凝土的耐久性影响不大。

#### 3. 施工受季节性气候影响大

在冬季和雨季现场就地浇筑混凝土时,须采取必要的防护措施,增加了施工费用,且质量也不易得到保证。因此,钢筋混凝土的发展方向之一,就

是要大量发展工业化、工厂化的装配式结构。

预应力混凝土结构是为了解决钢筋混凝土结构抗裂性的矛盾而发展起来的新型结构,其主要优点是:

(1)由于预加力的作用,较好地解决了钢筋混凝土结构的裂缝问题。可以根据构件的受力特点和使用条件,控制裂缝的出现或裂缝开展宽度。预加应力的作用,还改善了构件的受力性能,提高了构件的刚度,减小了构件的变形。

(2)预应力混凝土结构可以合理地利用高强度材料(高强度混凝土和高强度钢筋),使构件的截面尺寸减小,自重减轻,增大结构的跨越能力。

(3)提高结构的耐久性。预加力能有效地控制混凝土的开裂或裂缝的开展宽度,减小了有害介质对钢筋的侵蚀;另一方面由于高强度混凝土密实度的提高也提高了结构的耐久性,延长了结构的使用年限。

预应力混凝土成功的历史,至今不到70年,但是由于它具有许多优点,使其在国内外土木工程中得到广泛的应用。在桥梁工程中,预应力混凝土仍然是重要的建桥材料之一。

预应力混凝土结构是一种先进的结构形式,预应力混凝土技术作为工程建设领域内的一项高新技术,标志着一个国家的建筑技术水平。我国预应力混凝土技术从20世纪50年代起步后发展迅速,目前已进入高效预应力混凝土结构的新阶段。我们深信随着人们对结构性能要求的提高和科研工作的不断深入,以及大量工程实践的经验积累,作为工程结构最主要建筑材料的钢筋混凝土和预应力混凝土必将有一个新的发展。

# 第一章 钢筋混凝土结构材料的物理力学性能

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种力学性能截然不同的材料组成的复合结构。正确合理地进行钢筋混凝土结构设计,必须掌握钢筋混凝土结构材料的物理力学性能。钢筋混凝土结构材料的物理力学性能是指钢筋混凝土组成材料——混凝土和钢筋各自的强度及变形的变化规律,以及两者结合组成钢筋混凝土材料后的共同工作性能。这些都是建立钢筋混凝土结构设计计算理论的基础,是学习和掌握钢筋混凝土结构构件工作性能应必备的基本知识。

## § 1-1 混凝土的物理力学性能

### 一、混凝土强度

混凝土强度是混凝土的重要力学性能,是设计钢筋混凝土结构的重要依据,它直接影响结构的安全和耐久性。

混凝土的强度是指混凝土抵抗外力产生的某种应力的能力,即混凝土材料达到破坏或开裂极限状态时所能承受的应力。混凝土的强度除受材料组成、养护条件及龄期等因素影响外,还与受力状态有关。

#### (一)混凝土的抗压强度

在混凝土及钢筋混凝土结构中,混凝土主要用以承受压力,因而研究混凝土的抗压强度是十分必要的。

试验研究表明,混凝土的抗压强度除受组成材料的性质、配合比、养护环境、施工方法等因素影响外,还与试验方法及试件的尺寸和形状有关。

混凝土抗压强度与试验方法有着密切的关系。如果在试件的表面和压力机的压盘之间涂一层油脂,其抗压强度比不涂油脂的试件低很多,破坏形式也不相同(图 1-1-1)。

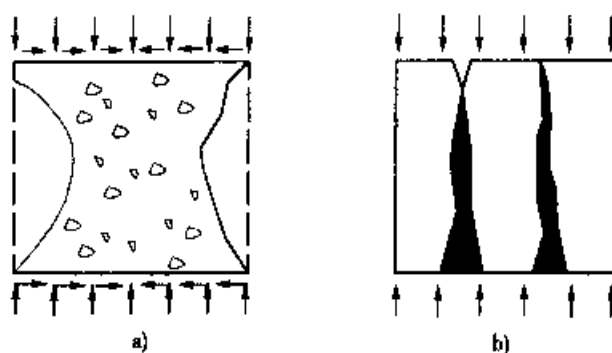


图 1-1-1 混凝土试件的破坏形态

a)不涂润滑剂;b)涂润滑剂

未加油脂的试件表面与压力机压盘之间存在向内的摩阻力,摩阻力像箍圈一样,对混凝土试件的横向变形产生约束,延缓了裂缝的开展,提高了试件的抗压极限强度。当压力达到极限值时,试件在竖向压力和水平摩阻力的共同作用下沿斜向破坏,形成两个对称的角锥形破坏面。如果在试件表面涂抹一层油脂,试件表面与压力机压盘之间的摩阻力将大大减小,对混凝土试件横向变形的约束作用几乎没有。最后,试件由于形成了与压力方向平行的裂缝而破坏,所测得的抗压极限强度较不加油脂者低很多。

混凝土的抗压强度还与试件的形状有关。试验表明,试件的高宽比  $h/b$  越大,所测得的强度越低。当高宽比  $h/b \geq 3$  时,强度变化就很小了。这反映了试件两端与压力机压盘之间存在的摩阻力,对不同高宽比的试件混凝土横向变形的约束影响程度不同。试件的高宽比  $h/b$  越大,支端摩阻力对试件中部的横向变形的约束影响程度就越小,所测得的强度也越低。当高宽比  $h/b \geq 3$  时,支端摩阻力对混凝土横向变形的约束作用就影响不到试件的中部,所测得的强度基本上保持一个定值。

此外,试件的尺寸对抗压强度也有一定影响。试件的尺寸越大,实测强度越低,这种现象称为尺寸效应。一般认为这是由混凝土内部缺陷和试件承压面摩阻力影响等因素造成的。试件尺寸大,内部缺陷(微裂缝,气泡等)相对较多,端部摩阻力影响相对较小,故实测强度较低。根据我国的试验结果,若以  $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$  的立方体试件的强度为准,对  $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 200\text{mm}$  立方体试件的实测强度应乘以尺寸修正系数 1.05;对  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$  立方体试件的实测强度应乘以尺寸修正系数 0.95。

为此,我们在定义混凝土抗压强度指标时,必须把试验方法、试件形状及尺寸等因素确定下来,在统一基准上建立的强度指标才有可比性。

混凝土抗压强度有两种表示方法:

### 1. 立方体抗压强度

我国规范习惯于用立方体抗压强度作为混凝土强度的基本指标。新修订的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62)(以下简称《桥规》(JTG D62))规定的立方体抗压强度标准值系指采用按标准方法制作、养护至 28d 龄期的边长为 150mm 立方体试件,以标准试验方法(试件支承面不涂油脂)测得的具有 95% 保证率的抗压强度(以 MPa 计),记为  $f_{cu,k}$ 。

$$f_{cu,k} = \mu_{\bar{n}_{150}}^s - 1.645\sigma_{n_{150}} = \mu_{\bar{n}_{150}}^s(1 - 1.645\delta_{n_{150}}) \quad (1-1-1)$$

式中:  $f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值(MPa);

$\mu_{\bar{n}_{150}}^s$ ——混凝土立方体抗压强度平均值(MPa);

$\sigma_{n_{150}}$ ——混凝土立方体抗压强度的标准差(MPa);

$\delta_{n_{150}}$ ——混凝土立方体抗压强度的变异系数,  $\delta_{n_{150}} = \sigma_{n_{150}}/\mu_{\bar{n}_{150}}^s$ 。其数值可按表 1-1-1 采用。

混凝土强度变异系数

表 1-1-1

$C_{cu,k}$	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
$\delta_{n_{150}}$	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10

《桥规》(JTG D62)规定的混凝土强度等级按边长为 150mm 的立方体抗压强度标准值确定,并冠以 C 表示,如 C30 表示 30 级混凝土。

应该指出,世界各国规范中用以确定混凝土强度等级的试件形状和尺寸不尽相同,有采用立方体试件,也有采用圆柱体试件。采用立方体强度划分混凝土强度等级的国家除中国外,尚有德国(200mm 立方体)、俄罗斯(150mm 立方体)和英国(150mm 立方体)等;采用圆柱体强度的有美国、日本等,CEB-FIP 制订的《国际标准规范》亦采用圆柱体强度,试件的尺寸为直径 6 in(约为 150mm),高度 12in(约为 300mm),其标准强度称为特征强度。根据我国的试验资料,圆柱体强度与 150mm 立方体强度之比为 0.83 ~ 1.04,平均值为 0.94;但过去我国习惯于按与 200mm 立方体强度之比为 0.85 进行换算。考虑到新旧规范立方体强度试件尺寸和取值保证率的不同,圆柱体强度与《桥规》(JTG D62)规定的边长为 150mm 立方体强度之比,可近似地按 0.85 换算。

公路桥涵受力构件的混凝土强度等级可采用 C20 ~ C80,中间以 5MPa 进级。C50 以下为普通强度混凝土,C50 及以上为高强度混凝土。

公路桥涵混凝土强度等级的选择应按下列规定采用:

(1)钢筋混凝土构件不应低于 C20,当采用 HRB400、KL400 级钢筋配筋

时,不应低于 C25;

(2) 预应力混凝土构件不应低于 C40。

应该指出,近几年来关于混凝土结构的耐久性问题,引起了国内外的广泛关注,高强混凝土和高性能混凝土的研究取得了突破性进展。从解决混凝土结构的耐久性需要出发,采用高性能混凝土,提高混凝土的密实度是十分必要的。另外,由于采用高强度混凝土,减轻了结构的自重,扩大了结构的适用跨度,收到的经济效益也是十分显著的。因此,在混凝土施工技术有保证的前提下,设计时宜适当地提高混凝土的强度等级。

## 2. 柱体抗压强度

用高宽比  $h/b \geq 3$  的柱体试件所测得的抗压强度称为柱体抗压强度(或称为轴心抗压强度)。在实际结构中,绝大多数受压构件的高度比其支承面的边长要大得多。所以,采用柱体抗压强度能更好地反映混凝土的实际受力状态。同时,由于试件的高宽比较大( $h/b \geq 3$ ),可摆脱端部摩阻力的影响,所测强度趋于稳定。我国采用  $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 450\text{mm}$  的柱体作为混凝土轴心抗压试验的标准试件,按与上述立方体试件相同的制作、养护条件和标准试验方法测得的具有 95% 保证率的抗压强度称轴心抗压(或柱体抗压)强度标准值(以 MPa 计),记为  $f_{\text{cu},k}$ 。

根据我国所进行的柱体抗压强度试验,柱体抗压强度试验统计平均值  $\mu_{\text{fc}}^s$  与 150mm 立方体抗压强度试验统计平均值  $\mu_{\text{f150}}^s$  呈线性关系:

$$\mu_{\text{fc}}^s = \alpha \mu_{\text{f150}}^s \quad (1-1-2)$$

式中:  $\alpha$ ——与混凝土强度等级有关,对 C50 及以下混凝土,取  $\alpha = 0.76$ ; C55 ~ C80 混凝土,取  $\alpha = 0.77 \sim 0.82$ 。

在实际工程中,考虑到构件混凝土与试件混凝土因制作工艺、养护条件、受荷情况和环境条件等不同,按《公路工程结构可靠度统一设计标准》(GB/T 50283—1999)条文说明建议,其抗压强度平均换算系数  $\mu_{\Omega\alpha} = 0.88$ , 则构件混凝土柱体抗压强度的平均值为:

$$\mu_{\text{fc}} = \mu_{\Omega\alpha} \mu_{\text{fc}}^s = 0.88 \alpha \mu_{\text{f150}}^s \quad (1-1-3)$$

假定构件混凝土柱体抗压强度的变异系数与立方体抗压强度的变异系数相同,则构件混凝土柱体抗压强度标准值为:

$$f_{\text{ck}} = \mu_{\text{fc}} (1 - 1.645 \delta_{\text{fc}}) = 0.88 \alpha \mu_{\text{f150}}^s (1 - 1.645 \delta_{\text{f150}}) = 0.88 \alpha f_{\text{cu},k} \quad (1-1-4)$$

另外,考虑到 C40 以上混凝土具有脆性,按公式(1-1-4)求得的柱体抗

压强度标准值尚须乘以脆性折减系数  $\beta$ , 对 C40 和 C80 混凝土取分别  $\beta = 1.0$  和  $0.87$ , 中间值按线性插入求得。

## (二) 混凝土抗拉强度

混凝土的抗拉强度是混凝土的基本力学特征之一, 其值约为立方体抗压强度的  $1/8 \sim 1/18$ 。混凝土抗拉强度的测试方法各国不尽相同。我国较多采用的测试方法是用钢模浇筑成型的  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 500\text{mm}$  的柱体试件, 通过预埋在试件轴线两端的钢筋, 对试件施加拉力, 试件破坏时的平均应力即为混凝土的轴心抗拉强度  $f_t$  (图 1-1-2)。

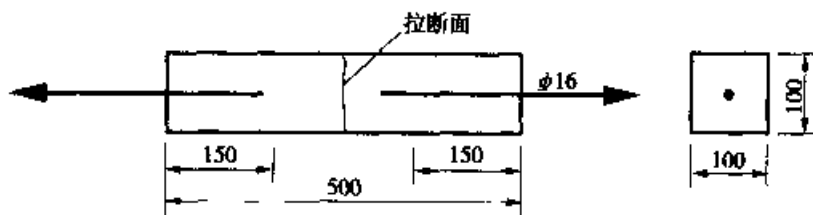


图 1-1-2 混凝土直接受拉试验(尺寸单位:mm)

根据我国进行的混凝土直接受拉试验结果, 混凝土轴心抗拉强度的试验统计平均值  $\mu_{ft}^s$  与立方体抗压强度的试验统计平均值  $\mu_{fcu50}^s$  之间的关系为:

$$\mu_{ft}^s = 0.395(\mu_{fcu50}^s)^{0.55} \quad (1-1-5)$$

构件混凝土轴心抗拉强度的平均值为:

$$\mu_{ft} = \mu_{\Omega_0} \mu_{ft}^s = 0.88 \times 0.395(\mu_{fcu50}^s)^{0.55} \quad (1-1-6)$$

构件混凝土轴心抗拉强度的标准值(保证率为 95%)为:

$$f_{tk} = \mu_{ft}(1 - 1.645\delta_{ft}) = 0.88 \times 0.395(\mu_{fcu50}^s)^{0.55}(1 - 1.645\delta_{ft})$$

将式(1-1-1)变为  $\mu_{fcu50}^s = \frac{f_{cu,k}}{1 - 1.645\delta_{fcu50}}$  代入, 并取  $\delta_{ft} = \delta_{fcu50}$ , 则得:

$$f_{tk} = 0.88 \times 0.395 f_{cu,k}^{0.55} (1 - 1.645\delta_{fcu50})^{0.45} \quad (1-1-7)$$

同样, 考虑 C40 以上混凝土的脆性, 按公式(1-1-7)求得轴心抗拉强度标准值, 亦应乘以脆性系数 ( $\beta = 1.0 \sim 0.87$ )。

应该指出, 用上述直接受拉试验测定混凝土抗拉强度时, 试件的对中比较困难, 稍有偏差就可能引起偏心受拉破坏, 影响试验结果。因此, 目前国外常采用劈裂试验间接测定混凝土抗拉强度。

劈裂试验可用立方体或圆柱体试件进行, 在试件上下支承面与压力机压板之间加一条垫条, 使试件上下形成对应的条形加载, 造成沿立方体中心或圆柱体直径切面的劈裂破坏(图 1-1-3)。

由弹性力学可知, 在上下对称的条形荷载作用下, 在试件的竖直中面

上,除两端加载点附近的局部区域产生压应力外,其余部分将产生均匀的水平拉应力,当拉应力达到混凝土的抗拉强度时,试件将沿竖直中面产生劈裂破坏。混凝土的劈裂强度可按下式计算:

$$f_t^s = \frac{2P}{\pi dL} \quad (1-1-8)$$

式中: $P$ ——竖向破坏荷载;  
 $d$ ——圆柱体试件的直径、立方体试件的边长;  
 $L$ ——试件的长度。

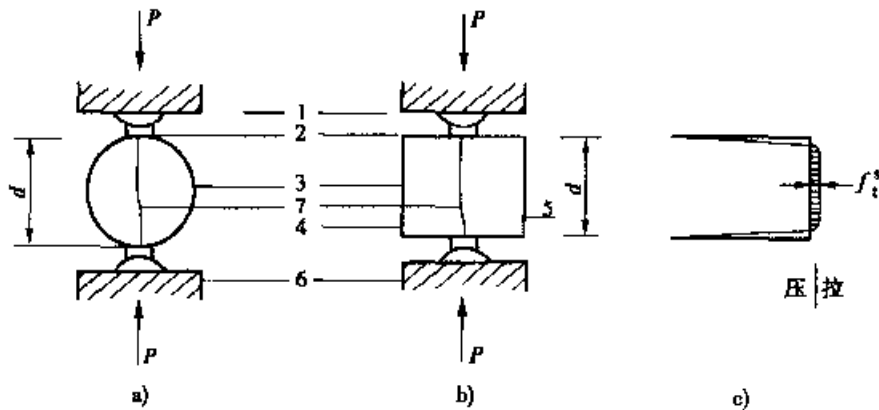


图 1-1-3 混凝土劈裂试验及其应力分布

a)用圆柱体进行劈裂试验;b)用立方体进行劈裂试验;c)劈裂面中水平应力分布

1-压力机上压板;2-垫条;3-试件;4-试件浇筑顶面;5-试件浇筑底面;6-压力机下压板;7-试件破裂线

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。加大垫条宽度可使实测劈裂强度提高,一般认为垫条宽度应不小于立方体试件边长或圆柱体试件直径的  $1/10$ 。

国外的大多数试验资料表明,混凝土的劈裂强度略高于轴心抗拉强度。我国的一些试验资料则表明,混凝土的轴心抗拉强度略高于劈裂强度,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,通常认为混凝土的轴心抗拉强度与劈裂强度基本相同。

### (三)混凝土的抗剪强度

抗剪强度是混凝土的基本力学特性,是强度理论研究和有限元分析的重要数据。目前常用的混凝土抗剪强度的试件和加载方式有图 1-1-4 所示的三种情况。

混凝土的抗剪强度因试验方法不同,所得结果差异很大,很难在实践中应用。

对于混凝土抗剪强度与抗压、抗拉强度的关系,德国学者 Mörsh 由理

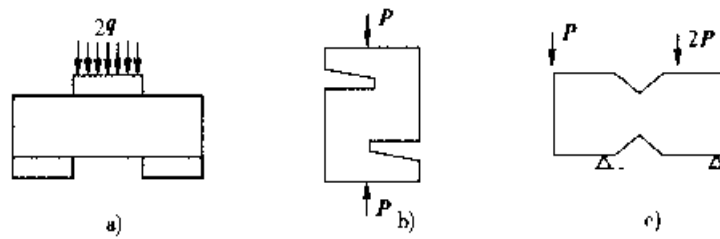


图 1-1-4 混凝土抗剪强度试件及加载方式

a) 矩形梁双剪面试件; b) “Z”形试件; c) “8”形试件

论分析求出纯剪强度公式为:

$$f_v^s = \sqrt{f_c^s f_t^s} \quad (1-1-9)$$

试验表明,由上式求得的  $f_v^s$  值偏高,后来修正为:

$$f_v^s = 0.75 \sqrt{f_c^s f_t^s} \quad (1-1-10)$$

式中:  $f_c^s$ 、 $f_t^s$ ——分别表示混凝土的轴心抗压和轴心抗拉强度。

近几年,我国学者提出用四点加载的等高度变宽梁进行抗剪强度试验,求得的抗剪强度与立方体抗压强度的关系为:

$$f_v^s = (0.38 \sim 0.42)(f_{cu}^s)^{0.57}$$

$$f_v^s \approx (1.13 \sim 1.04)f_t^s \quad (1-1-11)$$

#### (四) 复合应力状态下混凝土的强度

在钢筋混凝土结构中,构件通常受到轴力、弯矩、剪力及扭矩等不同内力组合的作用,因此,混凝土一般都是处于复合应力状态。在复合应力状态下,混凝土的强度有明显变化。复合应力状态下混凝土的强度是钢筋混凝土结构研究的基本理论问题,但是,由于混凝土材料的特点,至今尚未建立起完善的强度理论。目前仍然只是借助有限的试验资料,推荐一些近似计算方法。

##### 1. 双向应力状态

对于双向应力状态,即在两个相互垂直的平面上,作用着法向应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ ,第三平面上应力为零的情况,混凝土强度变化曲线如图 1-1-5 所示,其强度变化特点如下:

(1) 第一象限为双向受拉区:  $\sigma_1$  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单向抗拉强度。

(2) 第三象限为双向受压区:大体上是一向的混凝土强度随另一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一定的约束作用,限制了试件内部混凝土微裂缝的扩展,故而提

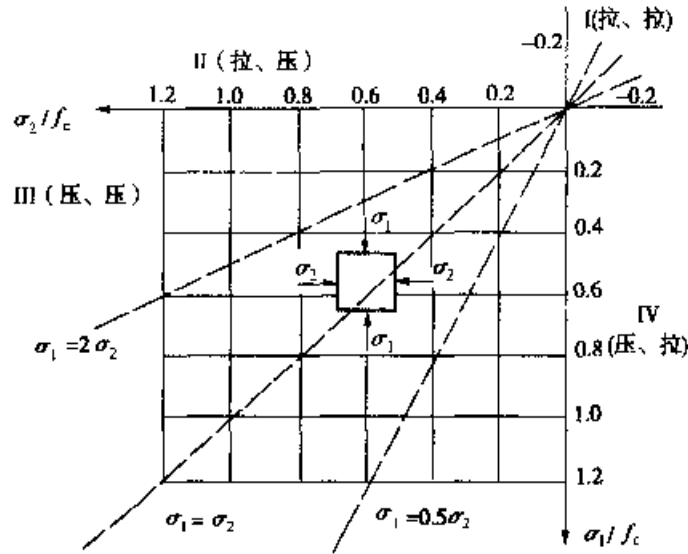


图 1-1-5 双向应力状态下混凝土强度变化曲线

高了混凝土的抗压强度。双向受压状态下混凝土强度提高的幅度与双向应力比  $\sigma_1/\sigma_2$  有关。当  $\sigma_1/\sigma_2$  约等于 2 或 0.5 时,双向抗压强度比单向抗压强度提高约为 25% 左右;当  $\sigma_1/\sigma_2 = 1$  时,仅提高 16% 左右。

(3)第二、四象限为拉—压应力状态:此时混凝土的强度均低于单轴受力(拉或压)强度,这是由于两个方向同时受拉、压时,相互助长了试件在另一个方向的受拉变形,加速了混凝土内部微裂缝的发展,使混凝土的强度降低。

### 2. 剪压或剪拉复合应力状态

如果在单元体上,除作用有剪应力  $\tau$  外,在一个面上同时作用有法向应力  $\sigma$ ,即形成剪拉或剪压复合应力状态。由图 1-1-6 所示的法向应力和剪应力组合时混凝土强度变化曲线可以看出,在剪拉应力状态下,随着拉应力绝对值的增加,混凝土抗剪强度降低,当拉应力约为  $0.1 f_c$  时,混凝土受拉开裂,抗剪强度降低到零。在剪压力状态下,随着压应力的增大,混凝土的抗剪强度逐渐增大,并在压应力达到某一数值时,抗剪强度达到最大值,此后,由于混凝土内部微裂缝的发展,抗剪强度随压应力的增加反而减小,当应力达到混凝土轴心抗压强度时,抗剪强度为零。

### 3. 三向受压应力状态

在钢筋混凝土结构中,为了进一步提高混凝土的抗压强度,常采用横向钢筋约束混凝土变形。例如,螺旋箍筋柱(见第五章 § 5-1)和钢管混凝土等,它们都是用螺旋形箍筋和钢管来约束混凝土的横向变形,使混凝土处于三向受压应力状态,从而使混凝土强度有所提高。

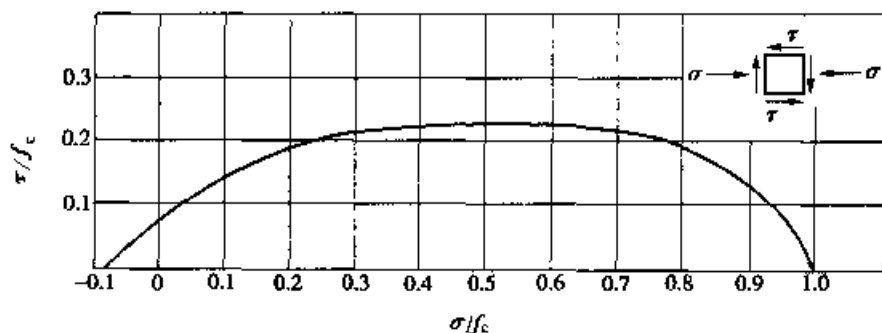


图 1-1-6 法向应力和剪应力组合时混凝土强度变化曲线

试验研究表明,混凝土三向受压时,最大主压应力轴的极限强度有很大程度的增长,其变化规律随其他两侧向应力的比值和大小而异。常规三向受压是两侧等压,最大主压应力轴的极限强度随侧向压力的增大而提高。

混凝土圆柱体三向受压的轴向抗压强度与侧压力之间的关系可用下列经验公式表示:

$$f_{cc} = f_c + K\sigma_r \quad (1-1-12)$$

式中:  $f_{cc}$ ——三向受压时的混凝土轴向抗压强度;

$f_c$ ——单向受压时混凝土柱体抗压强度;

$\sigma_r$ ——侧向压应力;

$K$ ——侧向应力系数,侧向压力较低时,其数值较大,为简化计算,可取为常数。较早的试验资料给出  $K = 4.1$ ,后来的试验资料给出  $K = 4.5 \sim 7.0$ 。

根据近年来大量的特别是在高侧压下的试验资料,我国学者蔡绍怀建议采用下列公式:

$$f_{cc} = f_c \left( 1 + 1.5 \sqrt{\frac{\sigma_r}{f_c}} + 2 \frac{\sigma_r}{f_c} \right) \quad (1-1-13)$$

## 二、混凝土的变形性能

混凝土的变形可分为两类:一类是荷载作用下产生的受力变形,其数值和变化规律与加载方式及荷载作用持续时间有关,包括单调短期加载、多次重复加载以及荷载长期作用下的变形等;另一类是体积变形,包括混凝土收缩、膨胀和由于温度、湿度变化产生的变形。

### (一)混凝土在一次短期加载时的应力—应变曲线

混凝土受压的应力—应变曲线(图 1-1-7),通常采用  $h/b = 3 \sim 4$  的棱柱

体试件来测定。

从试验分析得知：

(1) 当应力小于其极限强度 30%~40% (*a* 点) 时, 应力—应变关系接近直线;

(2) 当应力继续增大时, 应力—应变曲线就逐渐向下弯曲, 呈现出塑性性质; 当应力增大到接近极限强度的 80% 左右 (*b* 点) 时, 应变增加得更快;

(3) 当应力达到极限强度 (*c* 点) 时, 试件表面出现与压力方向平行的纵向裂缝, 试件开始破坏, 这时达到的最大应力  $\sigma_0$  称为混凝土轴心抗压强度  $f_c$ , 相应的应变为  $\epsilon_0$ , 一般为 0.002 左右;

(4) 试件在普通材料试验机上进行抗压试验时, 达到最大应力后试件就立即崩碎, 呈脆性破坏特征, 所得的应力—应变曲线如图 1-1-7 中的曲线段 *oabcd*, 下降段曲线 *cd* 无一定规律, 这种突然性破坏是由于试验机的刚度不足所造成的, 因为试验机在加载过程中产生变形, 试件受到试验机的冲击而急速破坏;

(5) 如果在普通压力机上用高强弹簧(或油压千斤顶)与试件共同受压, 用以吸收试验机内所积蓄的应变能, 防止试验机的回弹对试件的冲击造成的突然破坏, 达到最大应力后, 随试件变形的增大, 高强弹簧承受的压力所占的比例增大, 对试件起到卸载作用, 使试件受的压力稳定下降, 就可以测出混凝土的应力—应变全过程曲线, 如图 1-1-7 中的曲线段 *oabcd'*; 曲线中 *oc* 段称为上升段, *cd'* 段称为下降段; 相应于曲线末端的应变称为混凝土的极限压应变  $\epsilon_{cu}$ ,  $\epsilon_{cu}$  越大, 表示塑性变形能力大, 也就是延性越好。

混凝土受压时应力—应变曲线的形态与混凝土强度等级和加载速度等因素有关。

图 1-1-8 所示为不同强度等级混凝土的应力—应变曲线。不同强度等级混凝土的应力—应变曲线有着相似的形态, 但也有实质性区别。试验结果表明, 随着混凝土强度等级的提高, 相应的峰值应变  $\epsilon_0$  也略有增加, 曲线的上升段形状相似, 但下降段的形状有明显不同。强度等级较低的混凝土下降段较长, 顶部较平缓; 强度等级较高的混凝土下降段顶部陡峭, 曲线较

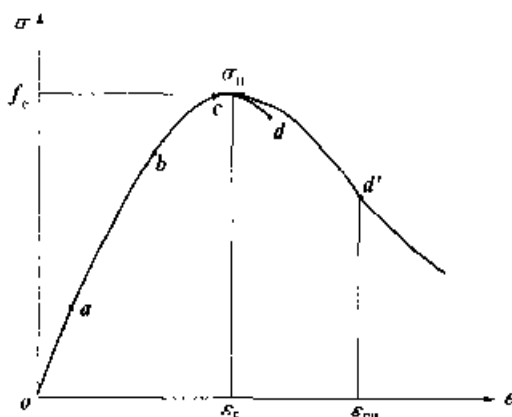


图 1-1-7 实测的混凝土受压应力—应变曲线

短。这表明强度等级低的混凝土受压时的延性比强度等级高的要好。

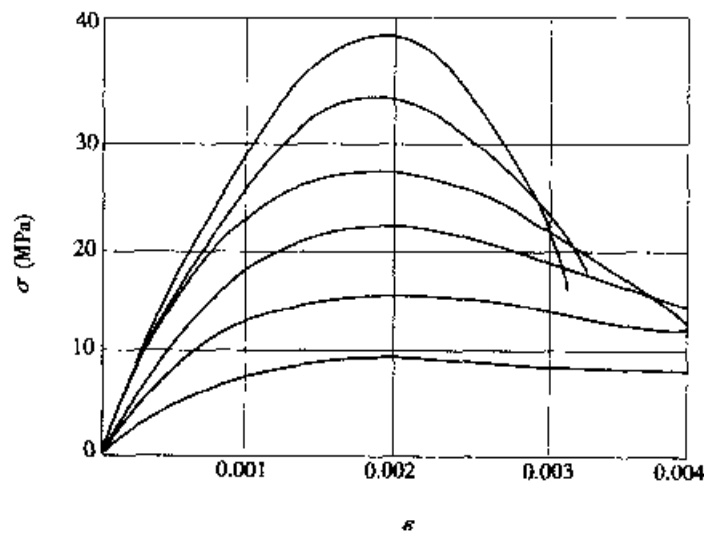


图 1-1-8 不同强度等级混凝土的应力—应变曲线

图 1-1-9 所示为相同强度等级的混凝土在不同应变速度下的应力—应变曲线。加荷速度影响混凝土应力—应变曲线的形状。应变速度越大,下降段越陡;反之,下降段要平缓些。

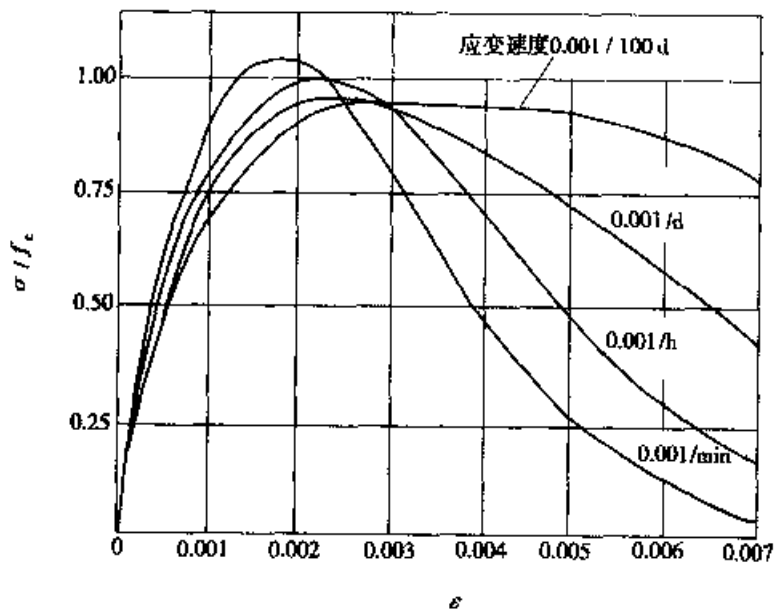


图 1-1-9 相同强度等级混凝土在不同应变速度下的应力—应变曲线

## (二)混凝土受压应力—应变曲线的数学模型

混凝土的应力—应变曲线是混凝土力学特征的一个重要方面,是研究和建立混凝土结构强度、裂缝和变形计算理论,进行结构全过程分析的必要

依据。国内外很多学者对混凝土应力—应变曲线进行了大量的研究,并试图在试验研究的基础上,建立混凝土应力—应变曲线数学模型,给出了一些经验公式。下面仅介绍两种国内外采用最广泛的模式。

### 1. 美国 E. Hognestad 建议的模型

该模型的上升段为二次抛物线,下降段为斜直线(图 1-1-10)

$$\text{当 } \epsilon_c \leq \epsilon_0 \text{ 时(上升段): } \sigma_c = \sigma_0 \left[ 2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1-1-14)$$

$$\text{当 } \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \text{ 时(下降段): } \sigma_c = \sigma_0 \left[ 1 - 0.15 \frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0} \right] \quad (1-1-15)$$

### 2. 德国 Rüschi 建议的模型

该模型的上升段与 Hognestad 建议的模型相同,但下降段采用水平线(图 1-1-11)。

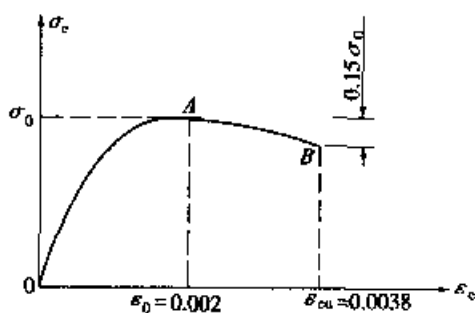


图 1-1-10 Hognestad 建议的混凝土应力—应变曲线

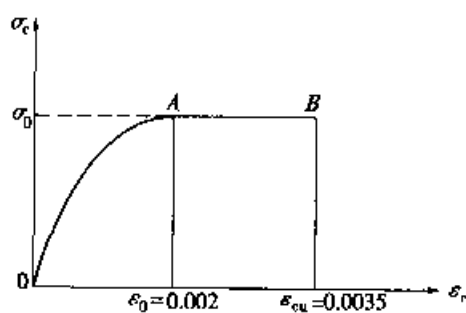


图 1-1-11 Rüschi 建议的混凝土应力—应变曲线

$$\text{当 } \epsilon_c \leq \epsilon_0 \text{ 时(上升段): } \sigma_c = \sigma_0 \left[ 2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1-1-16)$$

$$\text{当 } \epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \text{ 时(水平段): } \sigma_c = \sigma_0 \quad (1-1-17)$$

式中:  $\sigma_0$ ——峰值应力,取  $\sigma_0 = 0.85f'_c$ ,  $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度;

$\epsilon_0$ ——对应于峰值应力的应变,取  $\epsilon_0 = 0.002$ ;

$\epsilon_{cu}$ ——混凝土的极限压应变, Hognestad 取  $\epsilon_{cu} = 0.0038$ ; Rüschi 取  $\epsilon_{cu} = 0.0035$ 。

Rüschi 建议的模型因其形式简单,已被欧洲国际混凝土协会和国际预应力协会(CEB—FIP)所采用。我国采用较多的也是 Rüschi 建议的模型,对中、低强度混凝土习惯于取  $\epsilon_0 = 0.002$ ,  $\epsilon_{cu} = 0.0033$ ,并将峰值应力  $\sigma_0 = 0.85f'_c$ 。按我国混凝土强度标准进行换算,大致相当于  $\sigma_0 = f_c$ ,  $f_c$  为混凝土轴心抗压强度。

近年来开展的高强度混凝土研究表明,随着混凝土强度的提高,混凝土

受压时的应力—应变曲线将逐渐变化,其上升段近似线性关系,对应峰值应力的应变稍有提高,下降段变陡,极限应变有所减少。为了综合反映低、中强度混凝土及高强度混凝土特征,新修订的《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)(以下简称《建混规》)(GB 50010)将原规范的混凝土应力—应变曲线改写为下列通用式:

$$\sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^n \right] \quad (1-1-18)$$

当  $\epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$  时(水平段):

$$\sigma_c = f_{cd} \quad (1-1-19)$$

根据国内 64 根高强度混凝土偏心受压试验结果,给出的  $n$ 、 $\epsilon_0$  和  $\epsilon_{cu}$  值为:

$$n = 2 - \frac{1}{60} [f_{cu,k} - 50] \quad (1-1-20)$$

$$\epsilon_0 = 0.002 + 0.5 [f_{cu,k} - 50] \times 10^{-5} \quad (1-1-21)$$

$$\epsilon_{cu} = 0.0033 - [f_{cu,k} - 50] \times 10^{-5} \quad (1-1-22)$$

式中:  $\sigma_c$ ——对应于混凝土应变为  $\epsilon_c$  时的混凝土压应力;

$f_{cd}$ ——混凝土轴心抗压强度设计值;

$\epsilon_0$ ——对应于混凝土压应力达到  $f_{cd}$  时的混凝土压应变,当按公式(1-1-21)计算的  $\epsilon_0$  值小于 0.002 时,应取为 0.002;

$\epsilon_{cu}$ ——正截面处于非均匀受压时混凝土极限压应变,按公式(1-1-22)的  $\epsilon_{cu}$  值大于 0.0033 时,应取为 0.0033;正截面处于轴心受压时的混凝土极限压应变应取为 0.002;

$f_{cu,k}$ ——混凝土的立方体抗压强度标准值;

$n$ ——系数,当按公式(1-1-20)计算的  $n$  值大于 2.0 时,应取为 2.0。

### (三)混凝土的变形模量

在钢筋混凝土结构的内力分析及构件的变形计算中,混凝土的弹性模量是不可缺少的基础资料之一。前已指出,混凝土的应力—应变关系是一条曲线,只是在应力较小时才接近于直线。因此,在不同的应力阶段反映应力—应变关系的变形模量是一个变数。

图 1-1-12 所示为混凝土应力—应变的典型曲线,图中  $\epsilon_c$  为当混凝土压应力为  $\sigma_c$  时的总应变,其中包括弹性应变和塑性应变两部分,即:

$$\epsilon_c = \epsilon_{ela} + \epsilon_{pla} \quad (1-1-23)$$

式中： $\epsilon_{ela}$ ——混凝土的弹性应变；

$\epsilon_{pla}$ ——混凝土的塑性应变。

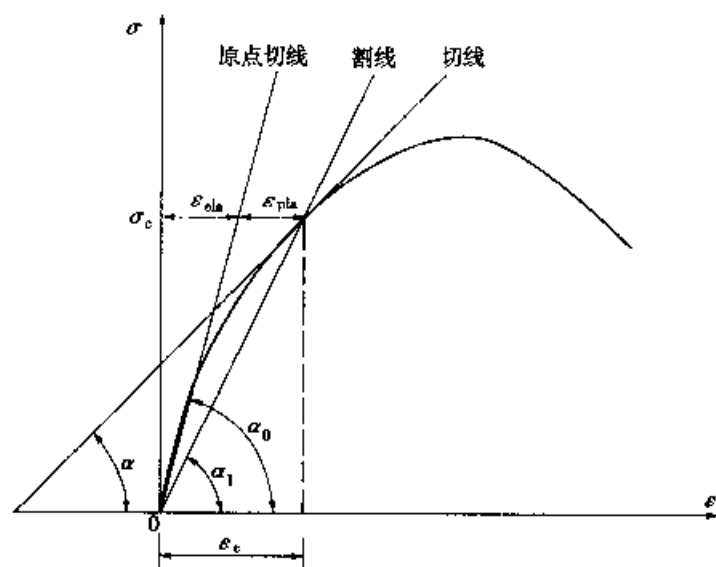


图 1-1-12 混凝土变形模量的表示方法

混凝土的变形模量有三种表示方法。

### 1. 原点弹性模量, 简称弹性模量 $E_c$

混凝土的弹性模量, 相当于应力—应变图上过原点  $O$ , 所作的切线的斜率(正切值), 其表达式为:

$$E_c = \sigma_c / \epsilon_{ela} = \tan \alpha_0 \quad (1-1-24)$$

式中： $\alpha_0$ ——应力应变图上原点处的切线与横坐标轴的夹角。

### 2. 割线模量 $E'_c$

混凝土的割线模量相当于应力—应变图上连接原点  $O$  至任意应力  $\sigma_c$  相对应的曲线点处割线的斜率(正切值), 其表达式为:

$$E'_c = \sigma_c / \epsilon_c = \tan \alpha_1 \quad (1-1-25)$$

式中： $\alpha_1$ ——对应于应力  $\sigma_c$  处的割线与横坐标轴的夹角。

由于总应变  $\epsilon_c$  中包含弹性应变  $\epsilon_{ela}$  和塑性应变  $\epsilon_{pla}$  两部分, 由此所确定的模量又称为弹塑性模量。

混凝土的割线模量与弹性模量的关系, 可由下式求得:

$$E'_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\epsilon_{ela}}{\epsilon_c} \cdot \frac{\sigma_c}{\epsilon_{ela}} = \gamma E_c \quad (1-1-26)$$

式中： $\gamma$ —— $\gamma = \epsilon_{ela} / \epsilon_c$ , 弹性应变与总应变的比值, 称为弹性特征系数。

显然, 公式(1-1-26)给出的混凝土割线模量  $E'_c$  不是常数, 弹性特征系

数  $\gamma$  与应力大小有关。应力较小时,弹性应变所占总应变的比例较大,  $\gamma$  值接近于 1; 应力增高时,塑性应变加大,  $\gamma$  值逐渐减小。试验资料给出,当  $\sigma_c = 0.5f_c$  时,  $\gamma = 0.8 \sim 0.9$ ; 当  $\sigma_c = 0.9f_c$  时,  $\gamma = 0.4 \sim 0.8$ 。此外,  $\gamma$  值还与混凝土的强度等级有关,混凝土强度等级越高,  $\gamma$  值越大,弹性特征较为显著,塑性性能越差。

### 3. 切线模量 $E'_c$

混凝土的切线模量相当于应力—应变曲线上某一应力  $\sigma_c$  处所作切线的斜率(正切值),即应力增量与应变增量的比值,其表达式为

$$E'_c = d\sigma_c / d\varepsilon_c = \tan\alpha \quad (1-1-27)$$

式中:  $\alpha$ ——某点应力  $\sigma_c$  处的切线与横坐标轴的夹角。

由于混凝土塑性变形的发展,混凝土的切线模量也是一个变数,它随着混凝土应力的增大而减小。

在实际工作中应用最多的还是原点弹性模量,即弹性模量。按照原点弹性模量的定义,直接在应力—应变曲线的原点作切线,找出  $\alpha_0$  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。我国的通用作法是对棱柱体试件先加荷至  $\sigma_c = 0.5f_c$ , 然后卸荷至零,再重复加荷卸荷 5~10 次。基本上可以消除大部分塑性变形,于是应力—应变曲线接近直线,这条直线的斜率即是规范中所规定的混凝土弹性模量,它比原点弹性模量小,但比割线模量大。

按照上述方法,对不同强度等级的混凝土测得的弹性模量,经统计分析得下列经验公式:

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.74}{f_{cu,k}}} \text{ (MPa)} \quad (1-1-28)$$

式中:  $f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值。

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 0.82~1.12,平均值为 0.995。计算中受拉和受压弹性模量可取同一值。

混凝土的剪切变形模量很难用试验方法确定。一般是根据弹性理论分析公式,由实测的弹性模量  $E_c$  和泊松比  $\nu_c$  按下式确定:

$$G_c = \frac{E_c}{2(1 + \nu_c)} \quad (1-1-29)$$

式中:  $\nu_c$ ——混凝土的泊松比,即混凝土横向应变与纵向应变之比。

试验研究表明,混凝土的泊松比  $\nu_c$  随应力大小而变化,并非是常数。

但是在应力不大于  $0.5f_c$  时,可以认为  $\nu_c$  为一定值。《桥规》(JTG D62)规定混凝土的泊松比  $\nu_c = 0.2$ 。

当取泊松比  $\nu_c = 0.2$ ,由公式(1-1-29)求得  $G_c = 0.417E_c$ ,《桥规》(JTG D62)规定混凝土的剪变模量  $G_c = 0.4E_c$ 。

#### (四)混凝土在重复荷载作用下的应力—应变曲线

混凝土在多次重复荷载作用下,其应力、应变性质与短期一次加载情况有显著不同。由于混凝土是弹塑性材料,初次卸载至应力为零时,应变不可能全部恢复。可恢复的那部分称之为弹性应变  $\epsilon_e$ ,弹性应变包括卸载时瞬时恢复的应变和卸载后弹性后效两部分;不可恢复的部分称之为残余应变 [图 1-1-13a)]。因此在一次加载卸载过程中,混凝土的应力—应变曲线形成一个环状。

混凝土在多次重复荷载作用下的应力—应变曲线示于图 1.1-13b)。当加载应力相对较小(一般认为  $\sigma_1$  或  $\sigma_2 < 0.5f_c$ )时,随着加载卸载重复次数的增加,残余应变会逐渐减小,一般重复 5~10 次后,加载和卸载应力—应变曲线环就越来越闭合,并接近一直线,混凝土呈现弹性工作性质。

如果加载应力超过某一个限值(如图中  $\sigma_3 \geq 0.5f_c$ ,但仍小于  $f_c$ )时,经过几次重复加载卸载,应力—应变曲线就变成直线,再经过多次重复加载卸载后,应力—应变曲线出现反向弯曲,逐渐凸向应变轴,斜率变小,变形加大,重复加载卸载到一定次数时,混凝土试件将因严重开裂或变形过大而破坏,这种因荷载多次重复作用而引起的破坏称为疲劳破坏。

桥梁工程中,通常要求能承受 200 万次以上反复荷载并不得产生疲劳破坏,这一强度称为混凝土的疲劳强度  $f_c^f$ ,一般取  $f_c^f \approx 0.5f_c$ 。

#### (五)混凝土在荷载长期作用下的变形性能

在不变的应力长期持续作用下,混凝土的变形随时间而不断增长的现象,称为混凝土的徐变(图 1-1-14)。混凝土的徐变对结构构件的变形、承载力以及预应力钢筋的应力损失都将产生重要的影响。

图 1-1-14 所示为我国铁道部科学院所做的混凝土棱柱体试件徐变的试验曲线,试件加载至应力达  $0.5f_c$  时,保持应力不变。由图可见,混凝土的总应变由两部分组成,即加载过程中完成的瞬时应变  $\epsilon_{\text{ela}}$  和荷载持续作用下逐渐完成的徐变应变  $\epsilon_{\text{cr}}$ 。徐变开始增长较快,以后逐渐减慢,经过长时间后基本趋于稳定。通常在前 4 个月内增长较快,半年内可完成总徐变量的 70%~80%,第一年内可完成 90% 左右,其余部分持续几年才能完成。最终总徐变量约为瞬时应变的 2~4 倍。此外,图中还表示了两年后卸载时

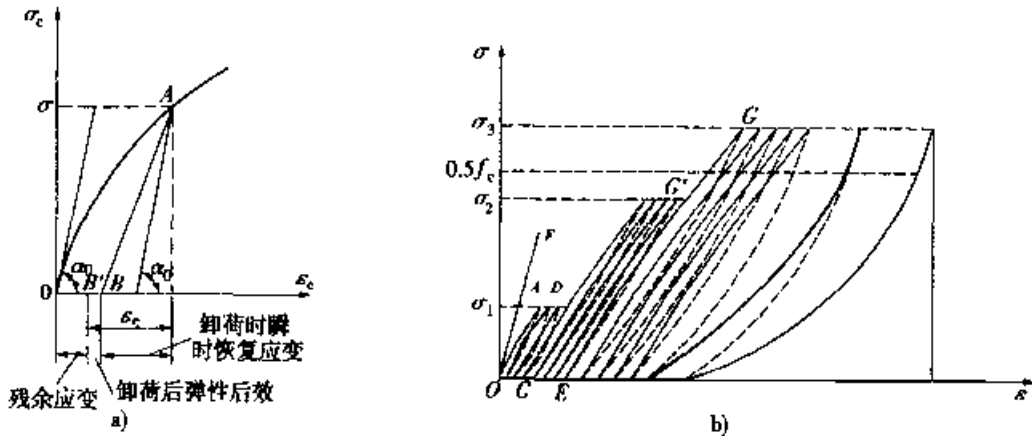


图 1-1-13 混凝土在重复荷载作用下的应力—应变曲线

a)一次加载;b)多次重复加载

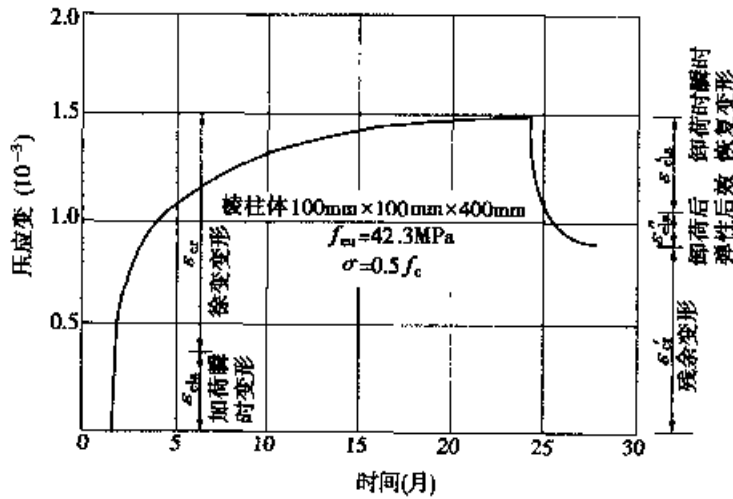


图 1-1-14 混凝土的徐变(加载卸载应变与时间关系曲线)

应变的恢复情况,其中  $\epsilon'_{e,ia}$  为卸载时瞬时恢复的应变,其值略小于加载时的瞬时应变  $\epsilon_{e,ia}$ ,  $\epsilon''_{e,ia}$  为卸载后的弹性后效,即卸载后经过 20d 左右又恢复的一部分应变,其值约为总徐变量的 1/12,其余很大一部分应变是不可恢复的,称为残余应变  $\epsilon'_{cr,0}$ 。

关于徐变产生的原因,目前尚无统一的解释,通常可这样理解:一是混凝土中水泥凝胶体在荷载作用下产生粘性流动,并把它所承受的压力逐渐转给集料颗粒,使集料压力增大,试件变形也随之增大;二是混凝土内部的微裂缝在荷载长期作用下不断发展和增加,也使应变增大。当应力不大时,徐变的发展以第一种原因为主;当应力较大时,以第二种原因为主。

影响混凝土徐变的因素很多,除了受材料组成及养护和使用环境条件等客观因素影响外,从结构角度分析,持续应力的的大小和受荷时混凝土的龄

期(即硬化强度)是影响混凝土徐变的主要因素。

试验表明,混凝土的徐变与持续应力的大小有着密切关系,持续应力越大,徐变也越大。当持续应力较小时:例如, $\sigma_c < 0.5f_c$ ,徐变与应力成正比,这种情况称为线性徐变。通常将线性徐变用徐变系数 $\phi_{(t,t_0)}$ 乘以瞬时应变(即弹性应变) $\epsilon_{ela}$ 表示:

$$\epsilon_{cr} = \phi_{(t,t_0)} \cdot \epsilon_{ela} \quad (1-1-30)$$

式中: $\phi_{(t,t_0)}$ ——加载龄期为 $t_0$ ,计算考虑的龄期为 $t$ 时的徐变系数。

当持续应力较大时(例如, $\sigma_c > 0.5f_c$ ),徐变与应力不成正比,徐变比应力增长更快,称为非线性徐变。因此,如果构件在使用期间长时间处于高应力状态是不安全的。

试验表明,受荷时混凝土的龄期(即硬化程度)对混凝土的徐变有重要影响。受荷时混凝土的龄期越短,混凝土中尚未完全结硬的水泥凝胶体越多,徐变也越大。因此,混凝土结构过早地受荷(即过早的拆除底模板),将产生较大的徐变,对结构是不利的。

此外,混凝土的组成对混凝土的徐变也有很大影响。水灰比越大,水泥水化后残存的游离水越多,徐变也越大;水泥用量越多,水泥凝胶体在混凝土中所占比重也越大,徐变也越大;集料越坚硬,弹性模量越高,以及集料所占体积比越大,则由水泥凝胶体流动后转给集料的压力所引起的变形也越小。

外部环境对混凝土的徐变亦有重要影响。养护环境湿度越大,温度越高,水泥水化作用越充分,则徐变就越小。混凝土在使用期间处于高温、干燥条件下所产生的徐变比低温、潮湿环境下明显增大。此外,由于混凝土中水分的挥发逸散与构件的体积与表面积比有关,这些因素都对徐变有所影响。

#### (六)混凝土的收缩和膨胀

混凝土在空气中结硬时其体积会缩小,这种现象称为混凝土收缩;混凝土在水中结硬时体积会膨胀,称为混凝土的膨胀。一般来说,混凝土的收缩值比膨胀值大得多(图 1-1-15)。

混凝土产生收缩的原因,一般认为是由水泥凝胶体本身的体积收缩(凝缩)以及混凝土因失水产生的体积收缩(干缩)共同造成的。

图 1-1-15 所示为我国铁道部科学研究所作混凝土自由收缩的试验曲线。由图可见收缩应变也是随时间而增长的。结硬初期收缩应变发展很

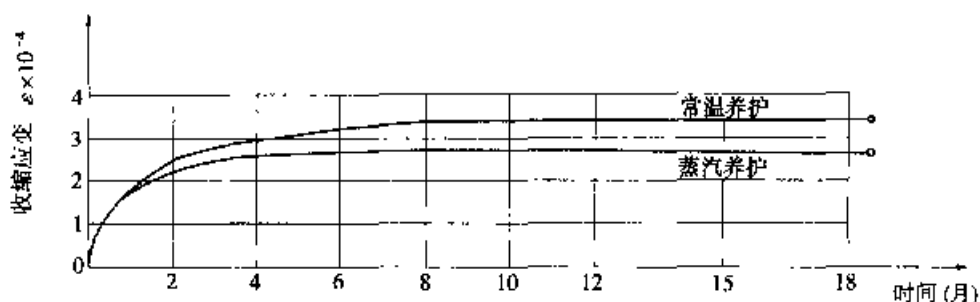


图 1-1-15 混凝土的收缩

快,以后逐渐减慢,整个收缩过程可延续两年左右。蒸气养护时,由于高温高湿条件能加速混凝土的凝结和结硬过程,减少混凝土的水分蒸发,因而混凝土的收缩值要比常温养护时小。一般情况下,混凝土的收缩应变终值约为  $(2 \sim 5) \times 10^{-4}$ 。

影响混凝土收缩的因素很多,如混凝土的组成、外部环境等因素对收缩和徐变有类似的影响。

当混凝土受到各种制约不能自由收缩时,将在混凝土中产生拉应力,甚至导致混凝土产生收缩裂缝。在钢筋混凝土构件中,钢筋因受到混凝土收缩影响产生压应力,而混凝土则产生拉应力,如果构件截面配筋过多,构件就可能产生收缩裂缝。在预应力混凝土构件中,混凝土收缩将引起预应力损失。收缩对某些钢筋混凝土超静定结构也将产生不利影响。

## § 1-2 钢筋的物理力学性能

### 一、钢筋的成分、级别、品种

钢筋混凝土结构所采用的钢筋按其化学成分,可分为碳素钢及普通低合金钢两大类。

碳素钢除了铁、碳两种基本元素外,还含有少量硅、锰、硫、磷等元素。根据含碳量的多少又可分为低碳钢(含碳量  $< 0.25\%$ ),中碳钢(含碳量  $0.25\% \sim 0.6\%$ )及高碳钢(含碳量  $0.6\% \sim 1.4\%$ )。含碳量越高则强度越高,但塑性和可焊性降低。

普通低合金钢除碳素钢中已有的成分外,再加入少量(一般总量不超过  $3\%$ )的合金元素如硅、锰、钛、钒和铬等,可有效地提高钢材的强度和改善钢材的性能。

按钢筋的加工方法,钢筋可分为热轧钢筋、冷拉钢筋、冷轧带肋钢筋、热处理钢筋和钢丝五大类。《桥规》(JTG D62)推荐,用于钢筋混凝土桥梁结构的钢筋主要选取**热轧钢筋、碳素钢丝和精轧螺纹钢**等三大类。

热轧钢筋是将钢材在高于再结晶温度状态下,用机械方法轧制成不同外形的钢筋。

热轧钢筋按外形可分为光面钢筋和带肋钢筋两大类。

光面钢筋的强度等级代号为 R235,相当于原标准的 I 级钢筋,厂家生产的公称直径范围为 8~20mm。R235 钢筋属于低碳钢,其强度较低,但塑性和可焊性能较好,广泛用于钢筋混凝土结构中。

带肋钢筋按强度分为 HRB335 和 HRB400、KL400 两个等级。HRB335 钢筋相当于原标准的 II 级钢筋,厂家生产的公称直径范围为 6~50mm,推荐采用直径一般不超过 32mm。HRB335 钢筋属于普通低合金钢,强度、塑性和可焊性等综合性能都较好,钢筋表面带肋与混凝土粘结性能也较好。HRB400 和 KL400 钢筋相当于原标准的 III 级钢筋。其中 HRB400 为按国家标准《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》(GB 1499—1998)生产的热轧钢筋,公称直径范围为 6~50mm;KL400 为按国家标准《钢筋混凝土用余热处理钢筋》(GB 13014—1991)生产的余热处理钢筋,即在钢筋经过热轧后立即穿水,进行表面冷却,然后利用心部余热自身完成回火处理,厂家生产的公称直径范围为 8~40mm。

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 850~950℃,并经过 500~600℃ 的铅浴中淬火,使其具有较高的塑性,然后再经酸洗、镀铜、拉拔、矫直、回火、卷盘等工艺生产而成。

碳素钢丝具有强度高、无需焊接、使用方便等优点,广泛应用于预应力混凝土结构。

碳素钢丝按其外形分为光面钢丝、螺旋肋钢丝和刻痕钢丝等三种类型。

光面钢丝一般以多根钢丝组成钢丝束或由若干根钢丝扭结成钢绞线的形式应用。桥梁工程中常用的钢绞线有:1×2(二股)、1×3(三股)、1×7(七股)。其中采用最多的是七股钢绞线,由于组成钢绞线的钢丝直径不同,其公称直径为 9.5mm、11.1mm、12.7mm 和 15.2mm 四种规格。钢绞线截面集中,盘卷运输方便,与混凝土粘结性能良好,现场配束方便,是预应力混凝土桥梁广泛采用的钢筋。

螺旋肋钢丝和刻痕钢丝,与混凝土之间的粘结性能好,适用于先张法预应力混凝土结构,目前我国生产的螺旋肋钢丝和刻痕钢丝的规格有  $d = 4 \sim$

9mm。

精轧螺纹钢是按企业标准(Q/YB-3125—96)和(Q/ASB 116-1997)生产的高强度钢筋,供货规格有  $d = 18\text{mm}$ 、 $25\text{mm}$ 、 $32\text{mm}$  和  $40\text{mm}$  四种。精轧螺纹钢的强度较高,主要用于中小跨径的预应力混凝土桥梁构件。

此外,冷轧带肋钢筋和冷轧扭钢筋是近年来在建筑工程中应用的新钢种。冷轧带肋钢筋是用热轧圆盘条经冷轧或冷拔减小直径后,冷轧成表面有肋的钢筋。冷轧带肋钢筋按抗拉强度分为三个等级:LL550、LL650 和 LL800。LL550 的供应规格为  $d = 4 \sim 12\text{mm}$ , LL650 的供应规格为  $d = 4 \sim 6\text{mm}$ , LL800 的供应规格为  $d = 5\text{mm}$ 。冷轧扭钢筋是用低碳钢轧圆盘条经专用钢筋冷轧扭机调直、冷轧并冷扭一次成型,具有规定截面形状和节距的连续螺旋状钢筋。按原材料(母材)冷扭前的截面形状分为 I 型和 II 型两种类别:I 型冷扭前为矩形截面,按标志直径(即冷扭前的公称直径)分为  $6.5\text{mm}$ 、 $8.0\text{mm}$ 、 $10.0\text{mm}$ 、 $12.0\text{mm}$  和  $14.0\text{mm}$  等五种规格,冷扭后的等效直径相应为  $6.1\text{mm}$ 、 $7.6\text{mm}$ 、 $9.2\text{mm}$ 、 $10.9\text{mm}$  和  $13.0\text{mm}$ ; II 型冷扭前为菱形截面,标志直径为  $12.0\text{mm}$ ,冷扭后的等效直径为  $11.2\text{mm}$ ,冷轧扭钢筋的抗拉强度标准值  $f_{tk} \geq 580\text{MPa}$ 。冷轧带肋钢筋和冷轧扭钢筋在桥梁中的应用尚无明确规定,使用时可分别参照建设部标准《冷轧带肋钢筋混凝土结构技术规程》(JGJ 95—95)和《冷轧扭钢筋混凝土构件技术规程》(JGJ 115—97)执行。

## 二、钢筋的强度和变形

### (一)钢筋的应力—应变曲线

根据钢筋在单向受拉时的应力—应变曲线特点,可将钢筋分为有明显屈服点和无明显屈服点两类。

#### 1. 有明显屈服点的钢筋应力—应变曲线

一般热轧钢筋属于有明显屈服点的钢筋,工程上习惯称为软钢,其拉伸试验的典型应力—应变曲线如图 1-2-1 所示。

从图 1-2-1 可以看出,软钢从加载到拉断,共经历四个阶段。自开始加载至应力达到  $a$  点以前,应力—应变呈线性关系, $a$  点应力称为比例极限, $oa$  段属于弹性工作阶段;过  $a$  点后,应变的增长速度略快于应力,应力达到  $b$  点后,钢筋进入屈服阶段,产生很大的塑性变形,在应力—应变图上呈现一水平段,称为屈服台阶或流幅, $b$  点应力称为屈服强度或流限;过  $c$  点后,钢筋应力开始重新增长,应力—应变关系表现为上升的曲线,曲线最高点  $d$  的应力称为极限抗拉强度,曲线  $cd$  段通常称为强化阶段;超过  $d$  点后,在

试件内部某个薄弱部分,截面将突然急剧缩小,发生局部颈缩现象,应力—应变关系呈下降曲线,应变继续增加,直到  $e$  点试件断裂, $e$  点所对应的应变称为钢筋极限拉应变,曲线  $de$  段称为破坏阶段。

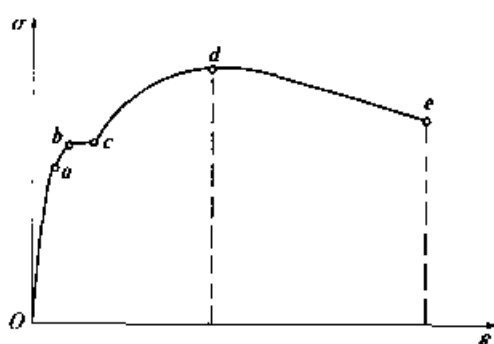


图 1-2-1 有明显屈服点的钢筋应力—应变曲线

有明显屈服点的钢筋有两个强度指标:一是  $b$  点所对应的屈服强度,另一个是  $d$  点对应的极限强度。

工程上取屈服强度作为钢筋强度取值的依据,因为钢筋屈服后产生了较大的塑性变形,将使构件变形和裂缝宽度大大增加,以致无法使用。钢筋的极限强度是钢筋的实际破坏强度,不能作为设计中钢筋强度取值的依据。

## 2. 无明显屈服点的钢筋应力—应变曲线

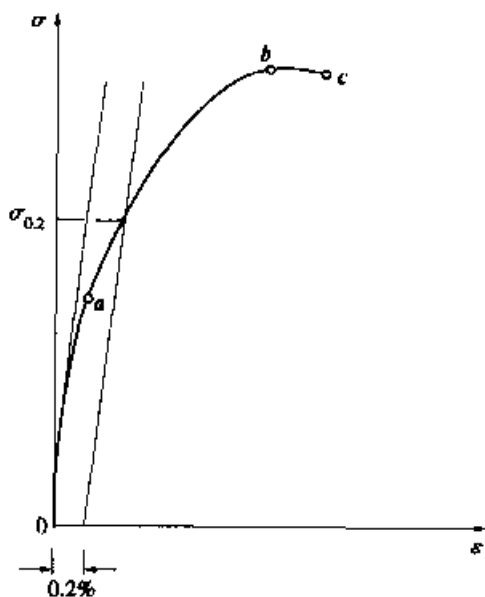


图 1-2-2 无明显屈服点的钢筋应力—应变曲线

各种类型的钢丝属于无明显屈服点的钢筋,工程上习惯称为硬钢。硬钢拉伸试验时的典型应力—应变曲线示于图 1-2-2。

从图 1-2-2 可以看出,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性质。超过  $a$  点之后,钢筋表现出越来越明显的塑性性质,但应力、应变均持续增长,应力—应变曲线无明显的屈服点,到达极限抗拉强度  $b$  点后,同样出现钢筋的颈缩现象,应力—应变曲线表现为下降段,至  $c$  点钢筋被拉断。

无明显屈服点的钢筋(硬钢)只有一个强度指标,即  $b$  点所对应的极限抗拉强度。在工程设计中,极限抗拉强度不能作为钢筋强度取值的依据,一般取残余应变为 0.2% 所对应的应力  $\sigma_{0.2}$  作为无明显屈服点钢筋的强度限值,通常称为条件屈服强度。对高强钢丝,条件屈服强度不小于极限抗拉强度的 0.85 倍。为简化计算《桥规》(JTG D62)取  $\sigma_{0.2} = 0.85\sigma_b$ ,其中  $\sigma_b$  为无

明显屈服点钢筋的抗拉极限强度。

### 3. 钢筋应力—应变曲线的数学模型

在钢筋混凝土结构设计和理论分析中,常需将钢筋的应力—应变曲线理想化,对不同性质的钢筋建立不同的应力—应变曲线数学模型。

#### (1) 双直线模型(完全弹塑性模型)

将钢筋视为理想的弹塑性体,应力—应变曲线简化为两根直线,不考虑由于应变硬化而增加的应力[图 1-2-3a]。图中  $OB$  段为完全弹性阶段,  $B$  点为屈服上限,相应的应力及应变分别为  $f_y$  和  $\epsilon_y$ ,弹性模量  $E_s$  即为  $OB$  段的斜率; $BC$  段为完全塑性阶段,  $C$  点为应力强化的起点,对应的应变为  $\epsilon_{sh}$ 。过  $C$  点后,认为钢筋变形过大不能正常使用。此模型适用于屈服台阶宽度较长强度等级较低的软钢,其数学表达式为:

$$\begin{aligned}\sigma_s &= E_s \epsilon_s & (\epsilon_s \leq \epsilon_y) \\ \sigma_s &= f_y & (\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sh})\end{aligned}\quad (1-2-1)$$

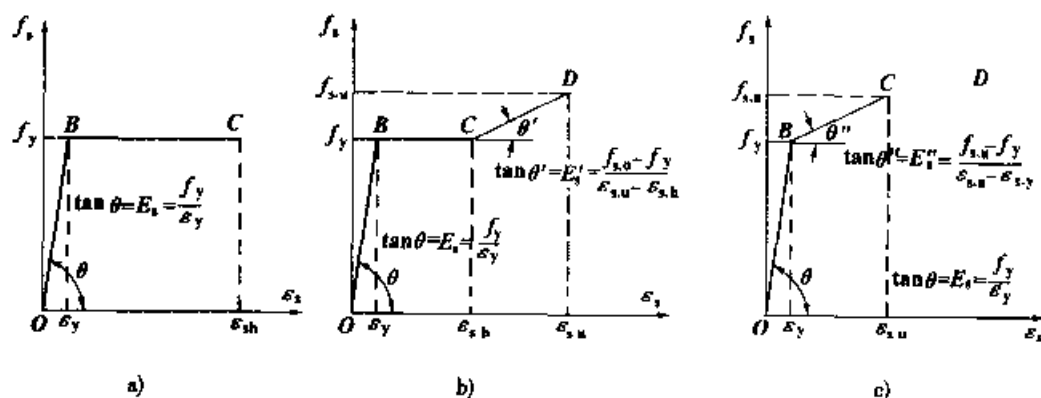


图 1-2-3 钢筋应力—应变曲线的数学模型

#### (2) 三折线模型(完全弹塑性硬化模型)

对于屈服后立即发生应变硬化(应力强化)的钢材,为了正确地估计高出屈服应变后的应力,可采用三折线模型[图 1-2-3b]。图中  $OB$  段为完全弹性阶段,  $BC$  段为完全塑性阶段,  $C$  点为硬化的起点,  $CD$  段为硬化阶段,到  $D$  点时拉应力达到极限值  $f_{s,u}$ ,相应的应变为  $\epsilon_{s,u}$ ,即认为钢筋破坏。三折线模型适用于屈服台阶长度较短的软钢。其数学表达式为:

$$\begin{aligned}\sigma_s &= E_s \epsilon_s & (\epsilon_s \leq \epsilon_y) \\ \sigma_s &= f_y & (\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s,h}) \\ \sigma_s &= f_y + (\epsilon_s - \epsilon_{s,h}) \tan \theta' & (\epsilon_{s,h} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s,u})\end{aligned}\quad (1-2-2)$$

式中:  $\tan\theta' = E'_s = 0.01 E_s$

### (3) 双斜线模型

对于无明显屈服点的高强钢筋或钢丝的应力—应变曲线可采用双斜线模型[图 1-2-3c]。图中  $B$  点为条件屈服点,  $C$  点的应力达到极限值  $f_{s,u}$ , 相应的应变为  $\epsilon_{s,u}$ 。双斜线模型的数学表达式为:

$$\begin{aligned}\sigma_s &= E_s \epsilon_s & (\epsilon_s \leq \epsilon_y) \\ \sigma_s &= f_y + (\epsilon_s - \epsilon_y) \tan\theta' & (\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s,u})\end{aligned}\quad (1-2-3)$$

式中:  $\tan\theta'' = E''_s = (f_{s,u} - f_y) / (\epsilon_{s,u} - \epsilon_y)$ 。

### (二) 钢筋的塑性性能

钢筋除应具有足够的强度外,还应具有一定的塑性变形能力。钢筋的塑性性能通常用延伸率和冷弯性能两个指标来衡量。

钢筋延伸率是指钢筋试件上标距为  $10d$  或  $5d$  ( $d$  为钢筋试件直径)范围内的极限伸长率,记为  $\delta_{10}$  或  $\delta_5$ 。钢筋的延伸率越大,表明钢筋的塑性越好。

冷弯是将直径为  $d$  的钢筋围绕某个规定直径  $D$  (规定  $D$  为  $1d, 2d, 3d, 4d, 5d$ ) 的辊轴弯曲成一定的角度 ( $90^\circ$  或  $180^\circ$ ), 弯曲后钢筋应无裂纹、鳞落或断裂现象(图 1-2-4)。弯心(辊轴)的直径越小,弯转角越大,说明钢筋的塑性越好。

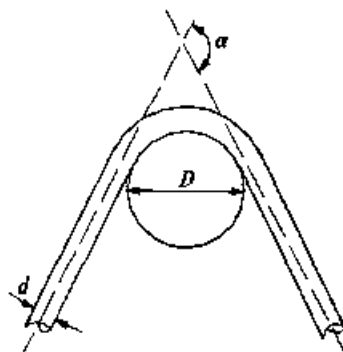


图 1-2-4 钢筋的冷弯

### (三) 钢筋的松弛

钢筋受力长度保持不变的情况下,应力随时间增长而降低的现象称为松弛(又称为徐舒)。预应力混凝土结构中,预应力钢筋张拉后长度基本保持不变,将产生松弛现象,从而引起预应力损失。

钢筋的松弛随时间增长而加大,总的趋势是初期发展较快,  $10 \sim 20d$  完成大部分,  $1 \sim 2$  个月基本完成。《桥规》(JTG 062)给出的钢筋松弛损失中间值与终极值的比值见表 1-2-1。

钢筋松弛与时间的关系

表 1-2-1

时间(天)	2	10	20	30	40
比值	0.5	0.61	0.74	0.87	1.0

钢筋的松弛还与初始应力大小、温度和钢筋品种等因素有关。初始应力越大则松弛也越大。温度对松弛也有很大影响,应力松弛值随温度的升高而增加,同时这种影响还会长期存在。因此,对蒸气养生的预应力混凝土构件应考虑温度对钢筋松弛的影响。不同钢种的钢筋松弛值差异很大。低合金钢热轧钢筋的松弛值相对较小,热处理钢筋次之,高强钢丝和钢绞线的松弛值相对较大。目前我国生产的高强钢丝和钢绞线按其生产工艺不同分为 I 级松弛(普通松弛)和 II 级松弛(低松弛)两种类型。低松弛钢丝和钢绞线的松弛值,约为普通松弛值的  $1/3$ 。

#### (四) 钢筋的冷加工

为了节省钢筋和扩大钢筋的应用范围,常对热轧钢筋进行冷拉、冷拔等机械冷加工。经冷加工后,钢筋的力学性能发生了很大的变化,故需对这类钢筋进行研究分析。

冷拉是在常温下用机械方法将具有明显屈服点的钢筋拉到超过屈服强度,即强化阶段中的某一个应力值(如图 1-2-5 的  $k$  点),然后卸截至零。由于  $k$  点的应力已超过弹性极限,因而卸载至应力为零时,应变并不为零,其残余应变为  $oo'$ 。若卸载后立即重新加载,应力—应变关系将沿着曲线  $o'kde$  变化。 $k$  点为新的屈服点,这表明钢筋经冷拉后,屈服强度提高,但塑性降低,这种现象称为冷拉硬化。

如果卸去荷载后,在自然条件下放置一段时间或进行人工加热后,再重新进行拉伸,其应力—应变关系将沿着曲线  $o'k'd'e'$  变化,屈服强度提高到  $k'$  点,并恢复了屈服台阶,这种现象称为时效硬化。时效硬化和温度有很大关系,例如:R235 钢筋时效硬化在常温时需 20d,若温度为  $100^{\circ}\text{C}$  时,仅需 2h 即可完成。但继续提高温度有可能得到相反的效果,如加温到  $450^{\circ}\text{C}$  时强度反而有可能降低,当加温到  $700^{\circ}\text{C}$  时钢材会恢复到冷拉前的力学性能。因此,为避免出现冷拉钢筋在焊接时由于温度过高使其软化,需要焊接的冷拉钢筋都是先焊好后再进行冷拉。

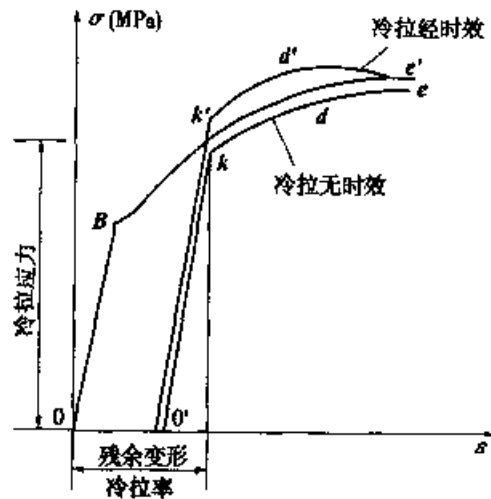


图 1-2-5 钢筋冷拉后的应力—应变曲线

经过冷拉的钢筋,其抗拉屈服强度比原来有所提高,但屈服台阶的长度

缩短,材料的塑性性能有所降低。冷拉后屈服强度提高和塑性性能降低的程度与冷拉控制应力的大小有关。冷拉控制应力越高,屈服强度提高的幅度越大,随之而来的塑性性能降低得也越多。因此,对钢筋进行冷拉时,必须合理地选择冷拉控制点(即图 1-2-5 中的  $k$  点),兼顾屈服强度提高和塑性性能降低两个方面的要求,使得既能适当提高屈服强度,又使塑性性能不致降低太多。冷拉控制点  $k$  所对应的应力和应变称为冷拉参数。

冷拉钢筋过去曾广泛用于建筑工程,在桥梁工程中也有所应用。在新修订的《建混规》(GB 500/0)和《桥规》(JTGD62)中未将其列入,但是不等于禁止使用。考虑到作为过渡时期,库存的 IV 级钢筋,有可能被冷拉用作预应力钢筋,《桥规》(JGD62)在条文说明中,对冷拉 IV 级钢筋的应用作了补充说明。当采用控制应力方法冷拉钢筋时,冷拉控制应力取强度标准值  $f_{pk} = 700\text{MPa}$ ;当采用控制应变(冷频率)方法冷拉钢筋时,冷拉控制应力取强度标准值加  $30\text{MPa}$ ,即取  $730\text{MPa}$ ,并按此应力确定相应的冷拉率。

### 三、钢筋的接头、弯钩和弯折

#### (一)钢筋的接头

为了运输方便,工厂生产的钢筋除小直径钢筋按盘圆供应外,一般长度为  $10 \sim 12\text{m}$ 。因此,在使用时就需要用钢筋接头接长至设计长度。钢筋接头有焊接接头、绑扎接头和机械连接接头等三种形式。钢筋接头宜优先采用焊接接头和机械连接接头。当施工或构造条件有困难时,也可采用绑扎接头。

##### 1. 焊接接头

焊接接头是钢筋混凝土结构中采用最多的接头。钢筋焊接方法很多,工程上应用最多的是闪光接触对焊和电弧搭接焊。

闪光接触对焊[图 1-2-6a)]是将两根钢筋安放成对接形式,利用电阻热使接触点金属熔化,产生强烈飞溅,形成闪光,迅速施加顶锻力完成的一种压焊方法。闪光接触对焊质量高,加工简单。

钢筋电弧焊[图 1-2-6b)、

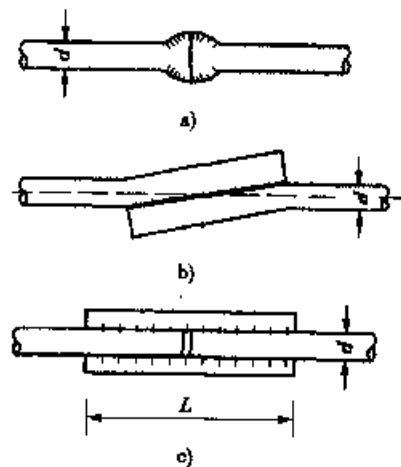


图 1-2-6 钢筋的焊接接头

c)]是以焊条作为一极,钢筋为另一极,利用焊接电流,通过产生的电弧热进行焊接的一种熔焊方法。钢筋电弧焊可采用搭接焊和帮条焊两种形式。搭接焊[图 1-2-6b)]是将端部预先折向一侧的两根钢筋搭接并焊在一起。帮条焊[图 1-2-6c)]是用短钢筋或短角钢等作为帮条,将两根钢筋对接拼焊,帮条的总截面面积不应小于被焊钢筋的截面面积。电弧焊一般应采用双面焊缝,施工有困难时亦可采用单面焊缝。电弧焊接头的焊缝长度,双面焊缝不应小于  $5d$ ,单面焊缝不应小于  $10d$ ( $d$  为钢筋直径)。

在任一焊接接头中心至长度为钢筋直径的 35 倍,且不小于 500mm 的区段内,同一根钢筋不得有两个接头。在该区段内位于受拉区的有接头的受力钢筋的截面面积占受力钢筋总截面面积的比例应不超过 50%,对受压区的钢筋可不受此限。

帮条焊或搭接焊接头部分钢筋的横向净距不应小于钢筋直径,且不小于 25mm。

## 2. 机械连接接头

钢筋机械连接接头是近年来我国所研制开发的钢筋连接新技术。钢筋机械连接接头与传统的焊接头和绑扎接头相比较,具有接头性能可靠、质量稳定、不受气候及焊工技术水平的影响,连接速度快、安全、无明火、不需要大功率电源,可焊与不可焊钢筋均能可靠连接等优点。《桥规》(JTG D62)推荐采用套筒挤压接头和镦粗直螺纹接头。

### (1) 套筒挤压接头

套筒挤压接头是将两根待连接的带肋钢筋用钢套筒作为连接体,套于钢筋端部,使用挤压设备沿套筒径向挤压,使钢套筒产生塑性变形,依靠变形的钢套筒与钢筋紧密结合为一个整体。套筒挤压接头适用于直径为 16 ~ 40mm 的 HRB335 和 HRB400 带肋钢筋,其性能及质量检验标准应符合国家行业标准《带肋钢筋挤压连接技术规程》(JGJ 108)的要求。

### (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,再加工出圆柱螺纹,并用连接套筒连接的钢筋接头。镦粗直螺纹接头适用于直径为 18 ~ 40mm 的 HRB335 和 HRB400 钢筋的连接,其性能和质量检验标准应符合国家行业标准《镦粗直螺纹钢筋接头》(JG/T 3057)的要求。

## 3. 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粘结力传递内力。绑扎接头是过去的传统作法,为了保证接头处传递

内力的可靠性,连接钢筋必须具有足够的搭接长度。为此,《桥规》(JTG D62)对绑扎接头的应用范围、搭接长度及接头布置都作了严格的规定。

绑扎接头的钢筋直径不宜大于 28mm,但轴心受压和偏心受压构件中的受压钢筋,可不大于 32mm。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 1-2-2 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。

受拉钢筋绑扎接头搭接长度

表 1-2-2

钢筋种类	混凝土强度等级		
	C20	C25	> C25
R235	35d	30d	25d
HRB335	45d	40d	35d
HRB400、KL400		50d	45d

注:1.当带肋钢筋直径  $d$  大于 25mm 时,其受拉钢筋的搭接长度应按表值增加  $5d$  采用;当带肋钢筋直径小于 25mm 时,搭接长度应按表值减少  $5d$  采用。

2.当混凝土在凝固过程中受力钢筋易受扰动时,其搭接长度应增加  $5d$ 。

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

4.环氧树脂涂层钢筋的绑扎接头搭接长度,受拉钢筋按表值的 1.5 倍采用。

5.受拉区段内,R235(Q235)钢筋绑扎接头的末端应做成弯钩,HRB335、HRB400 和 KL400 钢筋的末端可不做成弯钩。

在任一绑扎接头中心至搭接长度的 1.3 倍长度区段内,同一根钢筋不得有两个接头;在该区段内有绑扎接头的受力钢筋截面面积占受力钢筋总截面面积的百分数,受拉区不应超过 25%,受压区不应超过 50%。当绑扎接头的受力钢筋截面面积占受力总截面面积超过上述规定时,表 1-2-2 给出的受拉钢筋绑扎搭接长度值,应乘以下列系数:当受拉钢筋绑扎接头截面面积大于 25%,但不大于 50%时,乘以 1.4,当大于 50%时,乘以 1.6;当受压钢筋绑扎接头截面面积大于 50%时,乘以 1.4(受压钢筋绑扎接头长度仍为表中受拉绑扎接头长度的 0.7 倍)。

## (二)钢筋的弯钩和弯折

为了防止钢筋在混凝土中的滑动,对于承受拉力的光面钢筋,需在端头设置半圆弯钩;受压的光面钢筋可不设弯钩,这是因为受压时钢筋横向产生变形,使直径加大,提高了握裹力。带肋钢筋握裹力好,可不设半圆形弯钩,

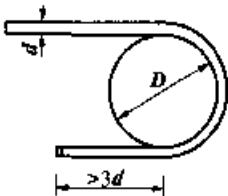
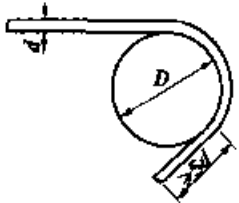
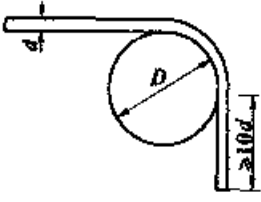
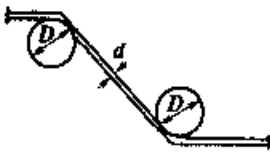
而改用直角形弯钩。弯钩的内侧弯曲直径  $D$  不宜过小,对光面钢筋  $D$  一般应大于  $2.5d$ ;带肋钢筋  $D$  一般应大于  $(4 \sim 5)d$  ( $d$  为钢筋的直径)。

按照受力的要求,钢筋有时需按设计要求弯转方向,为了避免在弯转处混凝土局部压碎,在弯折处钢筋内侧弯曲直径  $D$  不得小于  $20d$ 。

受力钢筋端部弯钩和中间弯折应符合表 1-2-3 的要求。

受拉钢筋端部弯钩及弯折

表 1-2-3

弯曲部位	弯曲角度	形状	钢筋	弯曲直径 ( $D$ )	平直段长度
末端弯钩	180°		R235	$\geq 2.5d$ ( $d \leq 20\text{mm}$ )	$\geq 3d$
	135°		HRB335	$\geq 4d$	$\geq 5d$
			HRB400 KL400	$\geq 5d$	
	90°		HRB335	$\geq 4d$	$\geq 10d$
			HRB400 KL400	$\geq 5d$	
	$\leq 90^\circ$		各种钢筋	$\geq 20d$	—

注:采用环氧树脂涂层钢筋时,除应满足表内规定外,当钢筋直径  $d \leq 20\text{mm}$  时,弯钩内直径  $D$  不应小于  $4d$ ;当  $d > 20\text{mm}$  时,弯钩内直径  $D$  不应小于  $6d$ ;直线段长度不应小于  $5d$ 。

## § 1-3 钢筋与混凝土之间的粘结

### 一、钢筋与混凝土之间的粘结破坏机理

钢筋与混凝土之间之所以能有效地共同工作,是两者之间具有很好的握裹力,又称为粘结力。钢筋与混凝土间的粘结力由三部分组成:(1)混凝土中水泥凝胶体与钢筋表面的化学胶结力;(2)混凝土结硬时,体积收缩产生的摩擦力;(3)钢筋表面粗糙不平或带肋钢筋的表面凸出肋条产生的机械咬合力。

光面钢筋的粘结力作用,在钢筋与混凝土间尚未出现相对滑移前主要取决于化学胶结力,发生滑移后则由摩擦力和钢筋表面粗糙不平产生的机械咬合力提供。光面钢筋拔出试验的破坏形态是钢筋从混凝土中被拔出的剪切破坏,其破坏面就是钢筋与混凝土的接触面。

带肋钢筋的粘结作用主要由钢筋表面凸起产生的机械咬合力提供,化学胶结力和摩擦力占的比重很小。带肋钢筋的肋条对混凝土的斜向挤压力形成了滑移阻力,斜向挤压力的轴向分力使肋间混凝土像悬臂梁那样承受弯、剪,而径向分力使钢筋周围的混凝土犹如受内压的管壁,产生环向拉力(图 1-3-1)。因此,带肋钢筋的外围混凝土处于复杂的三向受力状态,剪应力及纵向拉应力使横肋间混凝土产生内部斜裂缝,环向拉应力使钢筋附近的混凝土产生径向裂缝。裂缝出现后,随着荷载的增大,肋条前方混凝土逐渐被压碎,钢筋连同被压碎的混凝土由试件中被拔出,这种破坏称为剪切粘结破坏。如果钢筋外围混凝土很薄,且没有设置环向箍筋,径向裂缝将达到构件表面,形成沿钢筋的纵向劈裂裂缝,造成混凝土层的劈裂破坏,这种破坏称为劈裂粘结破坏。劈裂粘结破坏强度要低于剪切破坏粘结强度。

### 二、钢筋与混凝土的粘结强度

钢筋与混凝土间的粘结强度主要受下列因素影响:

#### 1. 混凝土强度等级

试验表明,粘结强度随混凝土强度等级提高而增大,大体上与混凝土的抗拉强度成正比关系。

#### 2. 钢筋的表面形状

带肋钢筋的粘结强度比光面钢筋高出 1~2 倍。带肋钢筋的肋条形式

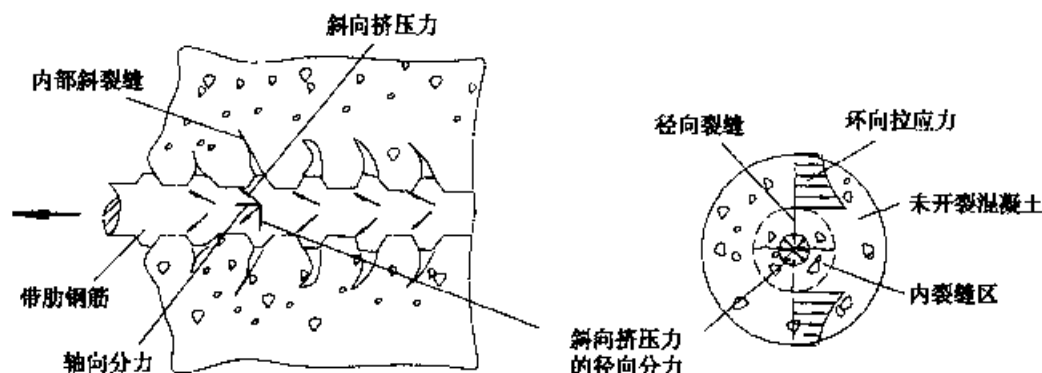


图 1-3-1 带肋钢筋横肋处的挤压力和内部裂缝

不同,其粘结强度也略有差异,月牙纹钢筋的粘结强度比螺纹钢筋低 5% ~ 15%。带肋钢筋的肋高随钢筋直径的增大相对变矮,所以粘结强度下降。试验表明,新轧制或经除锈处理的钢筋,其粘结强度比具有轻度锈蚀钢筋的粘结强度要低。

### 3. 混凝土保护层厚度和钢筋间的净距

试验表明,混凝土保护层厚度对光面钢筋的粘结强度没有明显影响,但对带肋钢筋的影响却十分明显。当保护层厚度  $c/d > 5 \sim 6$  ( $c$  为混凝土保护层厚度,  $d$  为钢筋直径)时,带肋钢筋将不会发生强度较低的劈裂粘结破坏。同样,保持一定的钢筋间距,可以提高钢筋周围混凝土的抗劈裂能力,从而提高钢筋与混凝土之间的粘结强度。

### 4. 横向配筋

设置螺旋筋或箍筋可以提高混凝土的侧向约束,延缓或阻止劈裂裂缝的发展,从而提高了粘结强度。

此外,粘结强度与浇筑混凝土时钢筋所处的相对位置有关。处于水平位置的钢筋粘结强度比竖直钢筋要低,这是由于位于水平钢筋下而的混凝土下沉及泌水的影响,钢筋与混凝土不能紧密接触,削弱了钢筋与混凝土之间的粘结强度。同样是水平钢筋,钢筋下面混凝土浇筑深度越大,粘结强度降低得也越多。

粘结强度一般通过试验方法确定,图 1-3-2 为钢筋拔出试验示意图。

试验研究表明,钢筋与混凝土间粘结应力的分布呈曲线形,且光面钢筋与带肋钢筋的粘结应力分布图形状有明显不同。

在实际工程中,通常以拔出试验中粘结失效(钢筋被拔出或混凝土被劈裂)时的最大平均粘结应力,作为钢筋和混凝土的粘结强度。平均粘结应力按下式计算:

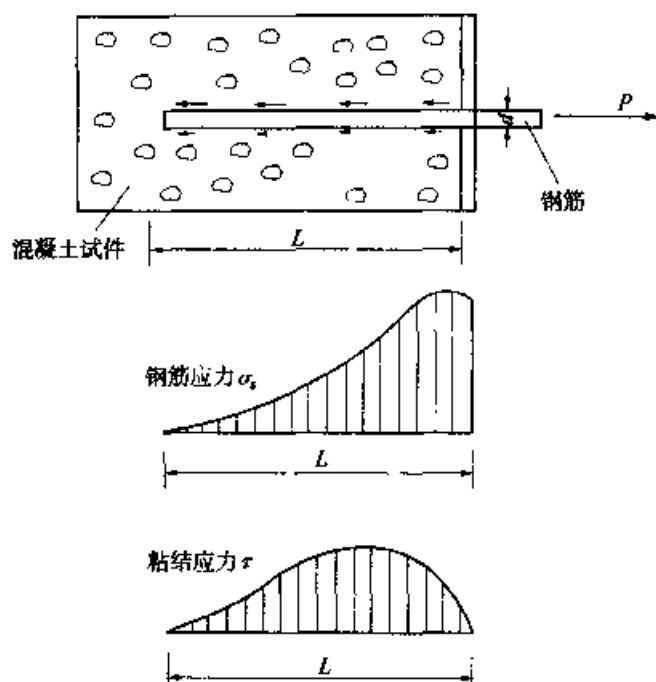


图 1-3-2 光面钢筋的拔出试验

$$\tau_u = \frac{P}{\pi d L} \quad (1-3-1)$$

式中： $P$ ——拉拔力；

$d$ ——钢筋直径；

$L$ ——钢筋埋置长度。

实测的粘结强度极限值变化范围很大，光面钢筋约为 1.5 ~ 3.5MPa；带肋钢筋约为 2.5 ~ 6.0MPa；

### 三、钢筋的锚固

钢筋的锚固是指通过混凝土中设置埋置段(又称为锚固长度)或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而不滑出。

钢筋的锚固长度按粘结破坏极限状态平衡条件确定：

$$\pi d L_a \tau_u \geq \frac{\pi d^2}{4} f_y$$

即：

$$L_a/d \geq \frac{f_y}{4\tau_u} \quad (1-3-2)$$