

建筑结构基本知识丛书

预应力混凝土 结构设计计算

(第三版)

焦彬如



中国建筑工业出版社

建筑结构基本知识丛书

预应力混凝土 结构设计计算

(第 三 版)

焦彬如 编著

中国建筑工业出版社

(京) 新登字035号

本书主要介绍预应力混凝土基本构件的计算方法。全书共十章，材料的力学性能和变形；钢筋混凝土和预应力混凝土结构的基本设计原理；预加应力方法、应力阶段及计算内容；预加应力的计算；预应力混凝土受弯构件正截面的设计计算；受弯构件斜截面设计计算；后张法预应力混凝土构件的设计；其他受力构件的设计计算；超静定预应力混凝土结构设计计算方法；若干构造处理的说明以及附录。

这套丛书包括建筑力学、建筑结构和构件计算等方面的基本知识，按专题分册出版，每册力求重点突出，并有一定的独立性，以便读者根据需要选读。

本书可供具有初中以上文化水平的基本建设部门职工和青年自学参考，也可作为职工培训用书。

建筑结构基本知识丛书
预应力混凝土结构设计计算
(第三版)
焦彬如 编著

中国建筑工业出版社出版、发行（北京西郊百万庄）

新华书店经销

北京密云华都印刷厂印刷

开本：787×1092毫米 1/32 印张：9¹/₂；字数：213千字

1993年12月第三版 1993年12月第六次印刷

印数：216,351—220,950册 定价：4.95元

ISBN 7-112-02122-7/TU·1625

(7142)

丛书第三版出版说明

为满足广大建筑职工自学的需要，我社1976年组织出版了一套《建筑结构基本知识丛书》包括建筑力学、建筑结构和构件计算等方面的知识，按专题分册出版，共十三分册，每册力求重点突出，并有一定独立性，读者可根据需要选读。丛书自出版以来，深受广大读者的欢迎和关怀，各分册先后重印四、五次，有的印数达30多万册。

随着经济建设和建筑技术的发展，广大建筑职工和青年学习建筑结构知识的要求进一步提高。原《建筑结构基本知识丛书》的内容，虽经1980年间修订一次，但目前已不能满足读者的需要。为此，我们组织力量对“丛书”再次修订。这次修订，一方面保持原来的编写目的和原则，另一方面根据建筑技术发展和读者要求，深度起点不变，仍以适合初中毕业文化程度的读者能读懂为基础，而对原丛书的内容加以扩展、提高和调整，使读者学完后、能基本上达到中专毕业水平。同时，丛书以1989年新颁布的各种建筑结构规范为依据，并采用国务院颁布的“法定计量单位。”为了增强便于自学的特点，并适应广大乡镇建筑职工学以致用的需要，各分册中均加强概念和例题的联系，尽量补充应用实例，并注意某些带有专题性内容的介绍。这次第三版丛书新增加了“烟囱”、“水池”、“多层框架结构”、“结构的力学基础”等分册。今后将根据需要与可能，再作适当补充。

丛书的修订工作绝非尽善尽美，一定有不少缺点错误，望读者提出意见，以助不断完善。

目 录

前言

绪论.....(1)

第一章 钢筋和混凝土材料的力学和变形性能.....(5)

1-1 材料的应力-应变特性曲线.....(5)

1-2 钢筋(7)

1-3 混凝土(15)

1-4 配筋混凝土中混凝土的收缩徐变效应(24)

第二章 钢筋混凝土及预应力混凝土结构的基本设计

原理.....(29)

2-1 结构的功能及其极限状态(29)

2-2 近似概率极限状态设计方法的原理(32)

2-3 预应力混凝土结构抗裂度的分类(42)

2-4 施工制作阶段的应力验算(48)

第三章 预加应力的方法、应力阶段及计算内容.....(51)

3-1 预加应力的方法(51)

3-2 预应力混凝土构件的应力阶段及计算内容(54)

第四章 预加应力的计算.....(63)

4-1 钢筋张拉控制应力 σ_{con}(63)

4-2 钢筋预应力损失值的种类及其计算(65)

4-3 钢筋和混凝土预应力的计算.....(74)

第五章 预应力混凝土受弯构件正截面的设计计算 ... (81)

5-1 正截面承载力计算原理与方法(81)

5-2 预应力混凝土受弯构件裂缝宽度和刚度计算(87)

5-3	正截面承载力计算(实例)	(92)
5-4	使用阶段抗裂验算(二级抗裂)	(96)
5-5	三级抗裂等级构件的计算	(104)
5-6	低配筋预应力混凝土构件的计算	(110)
第六章	预应力混凝土受弯构件斜截面的设计计算	(119)
6-1	各种截面形式的由来	(116)
6-2	斜截面受力性能的基本概念	(120)
6-3	斜截面承载力计算	(125)
6-4	斜截面抗裂验算	(131)
6-5	预应力自锚区长度的考虑	(134)
第七章	后张法预应力混凝土构件的设计计算	(136)
7-1	后张法构件设计计算特点	(136)
7-2	关于端锚区的局部承压计算	(139)
7-3	预应力曲线筋(束)特征值的计算	(141)
7-4	三级抗裂等级构件的设计计算(实例)	(144)
7-5	一级抗裂等级构件(全预应力混凝土)设计的弹性分 析方法(计算实例)	(166)
第八章	其他受力构件的设计计算	(185)
8-1	三铰屋架的内力分析	(185)
8-2	轴心受拉构件和小偏心受拉构件	(193)
8-3	偏心受压构件	(199)
第九章	超静定预应力混凝土结构的设计计算方法	(210)
9-1	超静定预应力混凝土结构的特性	(210)
9-2	预应力混凝土结构的内力分析	(213)
9-3	用荷载平衡法设计超静定预应力混凝土结构	(222)
9-4	预应力连续梁计算实例	(235)
9-5	预应力框架计算实例	(257)
第十章	若干构造处理的说明	(274)
	附录一 锚具变形和钢筋内缩值	(280)

附录二	后张法曲线预应力筋 σ_{12} 、 σ_{11} 计算公式的建立···	(281)
附录三	截面抵抗矩塑性系数·····	(284)
附录四	钢筋混凝土矩形截面受弯构件纵向受拉钢筋截面 面积计算方法·····	(286)
附录五	钢筋的计算截面面积及公称质量·····	(288)
附录六	单梁支座内力·····	(289)
附录七	异形截面几何特征值·····	(290)
附录八	等跨连续梁弹性计算内力系数·····	(292)
附录九	非法定计量单位与法定计量单位的换算关系·····	(295)

绪 论

在基本建设中，预应力混凝土结构的应用日益普遍和广泛。大家知道，普通钢筋混凝土结构同其他材料的结构相比，虽然具有不少显著的优点，但是，由于混凝土抵抗拉力的能力很低，所以，存在着构件受拉部位容易出现裂缝的缺点。如图0-1(a)所示的普通钢筋混凝土梁，在不大的荷载 q 作用下，下部受拉区混凝土便开裂，开裂截面上的拉力便转由配置在下部的钢筋承担。可见，在正常使用条件下，普通钢筋混凝土梁总是带裂缝工作的，且裂缝的宽度随着荷载的增大而不断扩大，梁的挠度 V 也随着增大。由此，普通钢筋混凝土结构构件就具有以下一些缺点：

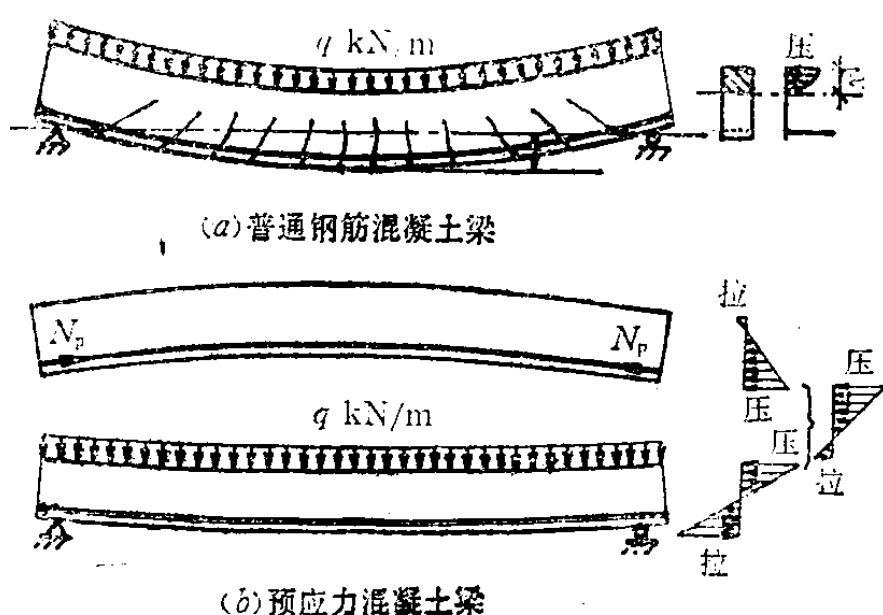


图 0-1 预应力和非预应力受弯构件受力性能对比

1. 由于在正常使用条件下总是带有裂缝(这种裂缝一般

肉眼不一定能看清楚),在大气和有害介质的环境下,裂缝处的钢筋有可能受腐蚀;从而影响结构构件的耐久性。

2. 为控制构件的裂缝和挠度在正常使用所允许的范围内,就需要增大构件的截面尺寸或增大配筋量,这样既多花费了材料,又增大了构件自重,使构件较为笨重。

3. 更主要的一点是:为使构件受拉裂缝控制在正常使用所允许的范围内,就必须控制受拉钢筋的应力(或应变)不能过大,这就限制了钢筋强度的发挥。所以,在普通钢筋混凝土构件中,就只能采用低强度的钢筋,不能采用中、高强钢筋,因而用钢量较大。

4. 由于以上诸原因,普通钢筋混凝土的应用范围受到了很大限制。如不宜用于防水、防渗和耐压要求高的结构和大吨位荷载作用及大跨度的结构中。

要克服普通混凝土结构的上述缺陷,简单和有效的方法就是设法利用受拉钢筋本身对受拉区混凝土施加预应力,使受拉钢筋预先受拉,而使混凝土截面受拉部位预先受压。这种混凝土结构构件便叫做预应力混凝土结构。这种预加应力的原理与我们日常生活中常见的木桶受力原理相似,木桶是用一片片木块用竹箍或铁箍箍成的,盛水后所以不会漏水,是因为箍紧的木片之间产生了预压应力的缘故;水压对木桶产生的环的拉力只能抵消木片之间建立的一部分预压应力,使木片之间始终保持在受压的紧密状态。这便是简明的预应力受力原理。

采用与木桶类似的方法,在制作构件时,设法使配置在受拉部位的钢筋预先受拉,并使钢筋内建立的预拉力反作用于混凝土截面上,使混凝土预先承受着相当大的预压应力,则在外荷载作用下,混凝土截面所产生的拉应力首先需抵消混凝土

土内建立的预压应力，才使混凝土受拉，这好比是使混凝土变成了可以承受很大拉应力的材料，大大地提高了构件抗裂的能力，这便叫做预应力混凝土。如图0-1(b)所示的预应力混凝土受弯构件。右侧分别绘出了在外载作用下和预应力 N 作用下的截面应力分布图，截面最后建立的应力分布图为二者应力图形的叠加。

采用预应力混凝土结构，便能克服前述普通钢筋混凝土结构所存在的缺陷，从而显示出预应力混凝土有如下一些优越性。

1. 可按施加预应力的程度，控制构件在使用阶段受力部位的状态：可使其不产生裂缝、或产生结构允许的裂缝，也可使其不受拉，使截面保持受压状态，亦即可根据使用要求设计不同抗裂等级的结构构件。

2. 构件在正常使用荷载下，由于预应力的作用，可控制裂缝的出现与开展，从而使构件截面刚度显著提高；同时，预应力的作用还将产生“反拱”，由此，对于受弯构件，构件向下的挠度将大大减小。这样，与普通钢筋混凝土相比，在同样的允许挠度下，对相同跨度的构件可以把预应力混凝土构件的截面尺寸减小；也可以把构件的跨度做得更大一些，从而使构件设计得较为轻巧，减轻结构自重。

3. 更重要的是：由于构件在承受外载作用前，受拉钢筋已预先承受了相当大的拉应力，在构件受荷后，预应力筋中的应力在原有高应力条件下进一步增大。由此可见，在预应力混凝土构件中，可以而且必须采用中、高强度的钢筋(或钢丝)，预应力筋的强度愈高，技术经济效果愈好。

4. 由于上述诸方面的条件，致使预应力混凝土的应用十分广泛，小到各种大小跨度的板类构件，大到各类大跨度、

大吨位的工程结构和特种结构，此外可用于各种防水、抗渗、耐压的结构等。诸如大跨度屋架，大吨位吊车梁，大直径贮液池，输油管，大跨度的公路、铁路桥梁以至高耸的电视塔，海洋采油平台和原子能反应堆的压力壳等。

第一章 钢筋和混凝土材料的 力学和变形性能

不同材料的结构，其计算原理和方法不尽相同。预应力混凝土结构是由两种不同性能的材料-预应力钢筋和混凝土所构成。只有很好地了解这两种结构材料的一些基本性能-它们的力学和变形性能，才能更好地了解和掌握预应力混凝土结构的有关特性及其设计计算方法。对于材料的一些基本性能，工程上常通过材料试件在受力全过程中的应力和应变变化规律来加以认识。因此需要首先了解一下材料应力-应变特性曲线的基本概念。

1-1 材料的应力-应变特性曲线

所谓应力就是材料单位面积上所受的力，以 σ 表示，力的单位为 N （牛顿，1公斤力约为10 N），面积的单位为 mm^2 ，所以应力 σ 的单位为 N/mm^2 。所谓应变是材料单位长度的变形值（即伸长或缩短值），以 ε 表示，为无量纲（即没有单位）。

现如若取一根直径为12mm、长600mm的钢筋试件置于试验机夹具上进行拉伸试验，拉伸时在试件中部设置有标距为100mm的应变计，量测试件受力后在100mm标距内的伸长值，如若试验机以每级加10kN（1kN=1000N，10kN=1000公斤力）速度加力，由应变计上测读得每级伸长了0.0442mm，于是可算出每级加载后钢筋所产生的应力和应

变。

$$\sigma_i = \frac{N_i}{A_s} = \frac{10 \times 10^3}{113.1} = 88.4 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta l}{l} = \frac{0.0442}{100} = 0.000442 = 442 \times 10^{-6}$$

现把每级加载后的应力与应变值标记在直角坐标上，纵坐标为 σ 值，横坐标为 ε 值，故每级加载在直角坐标上可得到一个交点。若将整个加载过程的各个交点连同坐标原点连接起来，便可得到该钢筋的应力-应变特性曲线。如图1-1中1*线所示。

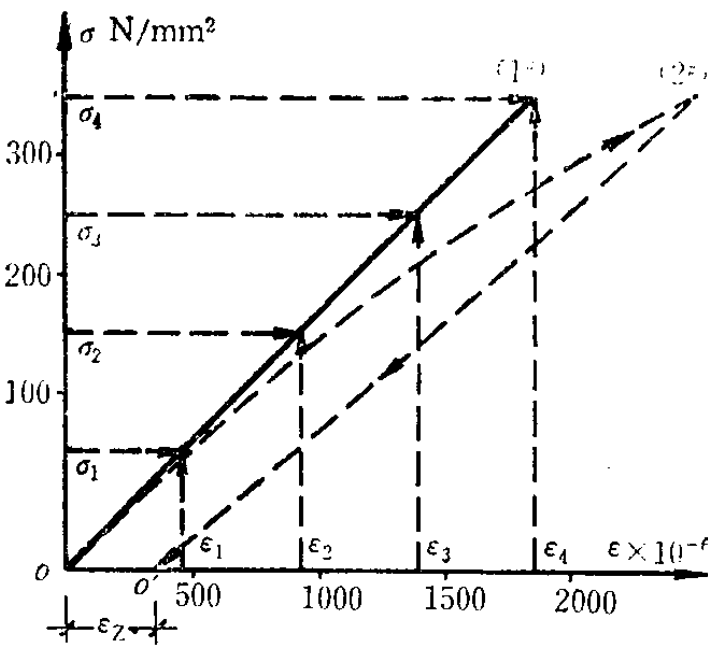


图 1-1 应力-应变曲线

1*线的特点是：各点的连线是一条直线。这表明，随着荷载的增加，材料内的应力与应变均按比例增大，如若在试件上施加的力逐级减小，则试件内应力与应变将按同一比例减小， σ 回到零时， ε 也退回到零，原来拉伸的应变全部回复。我们把这种

可以回复的变形叫做弹性变形。对于这种具有弹性变形特征的材料就叫做弹性材料。钢筋(钢丝)在某一应力水平下（大致在设计计算强度下）的变形特性就具有这种弹性性质，故我们把钢筋(钢丝)统称为弹性材料。

图示2*线的应力-应变特点是：每级加载后，应变的增加速度大于应力的增加，故各交点与座标原点的连线是一条向

下凹的曲线。这表明，材料除了产生弹性变形外，还产生了塑性变形。所谓塑性变形就是当逐级卸除外载时，基本上不能回复的变形。由于弹性变形部分可全部回复，故卸载时的应力-应变线便是一条直线。这时，应力 σ 退回到零时，应变 ϵ 便回复到 o' 点，则 $o-o'$ 的应变值便是未能回复的塑性变形值，称为残余变形 ϵ_x 。即构件材料拉伸或压缩后，构件材料拉长了或缩短了。这种具有弹性变形和塑性变形的材料，称作弹塑性材料。混凝土试件受压或受拉时的变形特性就具有这种性质、故我们把混凝土称为弹塑材料。

由此可见，根据各种材料的应力-应变特性曲线，我们便很容易区分它们是属于哪一种性质的材料，并可分析出同一种材料在不同应力阶段下的应力-应变特性。

1-2 钢 筋

一、钢筋分类

从钢筋(钢丝)的应力-应变全曲线的性质加以区分可分作以下两大类：

(一) 软钢：它的应力-应变全曲线如图1-2所示。从加载开始到钢筋拉断为止，其 $\sigma-\epsilon$ 曲线可大体分为四个阶段。

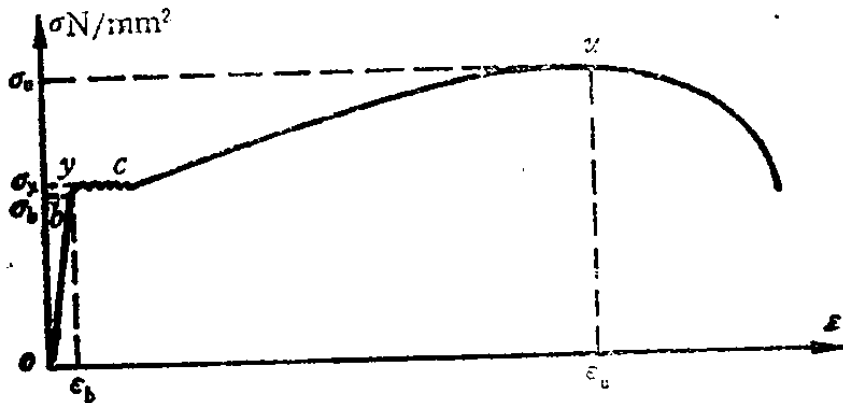


图 1-2 软钢的应力-应变曲线

1. 弹性变形阶段：即图示 $o-b$ 直线段，其应力、应变按比例线性变化，故为弹性变形阶段，这一阶段顶点处的应力 σ_b ，叫做比例极限。

2. 屈服阶段：为图示 $y-c$ 线段，当钢筋应力达 σ_y 时，应变骤然急速发展，形成一个变形的屈服台阶，显见，屈服台阶的变形为塑性变形，屈服台阶起点处的应力 σ_y 叫做屈服强度，作为钢筋设计计算中所取用的强度值。

3. 强化阶段：为图示 $c-\mu$ 段，钢筋经过屈服变形阶段后，钢筋的应力仍能继续增大，且应变的增长速度远大于应力的增长。即钢筋处在这一应力阶段时，将可发挥很大的变形能力，显然，其中的极大部份变形为塑性变形。该阶段的终点，为钢筋应力的峰值 σ_u ，叫做抗拉强度。

4. 颈缩阶段：为 σ_u 以后的 $\sigma-\epsilon$ 下降段曲线， $\sigma-\epsilon$ 曲线的下降表明钢筋开始出现颈缩，预示着钢筋行将拉断。

(二) 硬钢：应力-应变全曲线如图1-3所示，其应力-应变特征同样可区分为四个阶段。主要的特征是没有明显的屈服台阶。

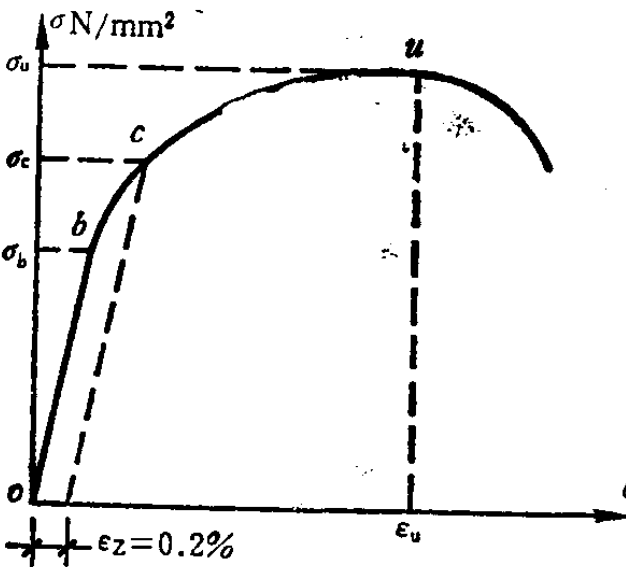


图 1-3 硬钢应变曲线

1. 弹性阶段：为图示 $o-b$ 直线段。应力-应变按比例线性变化，故端点 b 处的应力 σ_b 为比例极限。

2. 弹塑性阶段I：为图示 $b-c$ 段、钢筋(钢丝)应力超过 σ_b 以后，除产生弹性变形外，还产生塑性变形，但塑性

变形还不大。

3. 弹塑性阶段Ⅱ：为图示 $c-\mu$ 段，在这一阶段钢筋除产生弹性变形外，塑性变形有较大的发展，所以把该阶段起点处的应力 σ_s 叫做条件流限或叫条件屈服强度。阶段Ⅰ、Ⅱ分界点 σ_s 的确定标准世界各国不尽相同，我国以具有0.002（即0.2%）残余变形时的应力水准定义为条件屈服强度。故常记作 $\sigma_{0.2}$ 。这一阶段终点处的应力 σ_u 为硬钢的应力峰值，叫做抗拉强度。

4. 颈缩阶段：应力到达 σ_u 以后，钢筋（钢丝）的应力开始下降， $\sigma-\varepsilon$ 曲线形成下降段，预示钢筋（钢丝）行将拉断。

以上二类钢筋应力-应变特性的主要差异有二点：

1. 软钢具有明显的屈服台阶，而硬钢没有。则对于硬钢，同样需给定一个设计计算中取用的强度水准，这个强度水准设计规范中统一取其80%的抗拉强度、并名义上称它为条件屈服强度。

2. 软钢的强度水准不高，但钢筋拉断前的总伸长率很大，即钢筋屈服后的塑性性能甚好；而硬钢的强度水准较高，但钢筋（钢丝）拉断前的总伸长率不大，有的还相当低，表明其塑性性能低，即较为脆性。

二、预应力钢筋的种类

已如绪论中所述，用作预应力钢筋（钢丝）首先要具有较高的强度水准，同时应确保具有一定的（必要的）塑性性能，这是由构件破坏时的延性要求所决定的。由前述热轧软钢的应力-应变特性可知，它具有相当大的塑性变形性能，但其强度水准不高，故不宜把它直接用作预应力钢筋，必须把它作进一步的加工处理，用以提高它的屈服强度，此时钢筋屈服后的塑性变形性能将有所降低。通常钢筋屈服强度提高愈

多，塑性降低愈甚，所以必须研究取用合适的加工工艺。加工处理的方法有二类，一是采用冷加工的方法-冷拉和冷拔工艺，另一种是进行调质热处理的方法。现分述如下：

（一）冷拉：已知前述，对于软钢一类钢筋，设计计算中取用的强度水准是其屈服强度，所以可采用冷拉的方法提高其屈服强度。

冷拉的方法如图1-4所示， $obku$ 为未经冷拉的钢筋应力-应变曲线，现把钢筋冷拉到超过屈服台阶后的 k 点， σ_k 叫做冷拉应力；然后卸荷，钢筋卸荷时塑性变形部份已不能回复，弹性变形部份可全部回复，所以卸荷时的 $k-o'$ 线必与 $b-o$ 线平行， $o-o'$ 便是残余变形。若钢筋再一次受力拉伸时，变形曲线将是 $o'ku$ ，即钢筋的弹性变形阶段由 b 点提高到了 k 点。

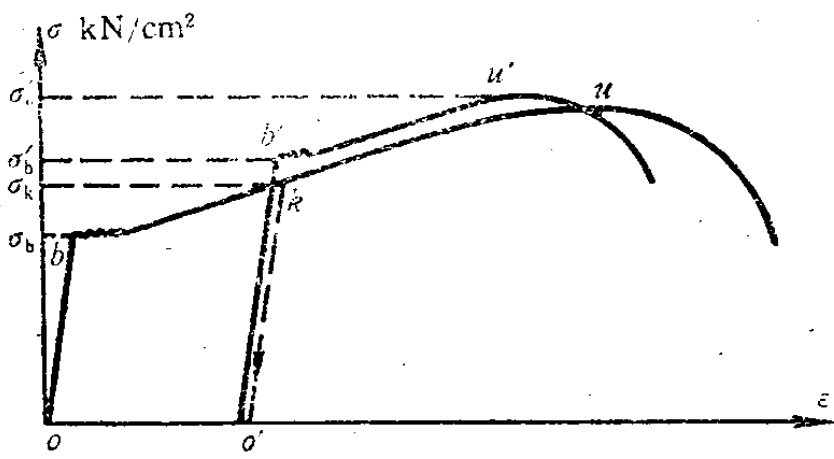


图 1-4 钢筋的冷拉

上述冷拉后的钢筋应经时效后才能使用。所谓时效就是需把它放置一定的时间，环境温度高，放置的时间可短。故必要时可采用人工时效，即把环境温度提高。

冷拉钢筋经时效后，其 $\sigma-\epsilon$ 曲线为 $o'b'u'$ ，此时钢筋便具有了明显的屈服台阶，且屈服强度进一步提高到了 b' 点。所以钢筋冷拉时效后，钢筋仍具有软钢的应力应变特征，可是