

第二章 混凝土结构材料的物理力学性能

2.1 混凝土的物理力学性能

- 2.1.1 混凝土的组成结构
- 2.1.2 单轴向应力状态下的混凝土强度
- 2.1.3 复合应力状态下混凝土的强度
- 2.1.4 混凝土的变形性能——另一个重要的力学性能

2.1.1 混凝土的组成结构

普通混凝土是由水泥、砂、石材用水拌合硬化后形成的多相复合材料。

混凝土结构组成



水泥石结构——微观结构

水泥砂浆结构——亚微观结构

砂浆和粗骨料——宏观结构

水泥石结构：微观结构

由水泥凝胶、晶体骨架、未水化完的水泥颗粒和凝胶孔组成。

水泥砂浆结构：

以水泥石为基相、砂子为分散相的二组份体系，二者的结合面是薄弱面。

相：

相具有如下特点：

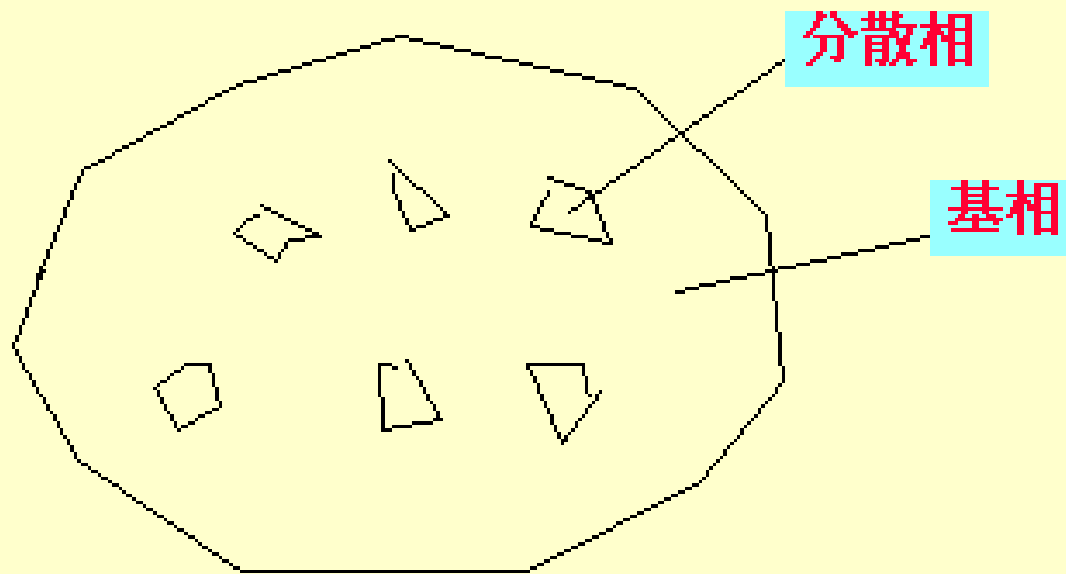
- (a) 一个相在其范围内具有相同的结构或原子排列；
- (b) 一个相在其范围内具有相同的组成和特性；
- (c) 一个相与其周围的相有着明确的界面。

混凝土宏观结构：

与亚微观结构有许多共同点。

这时可把水泥砂浆看作基相，粗骨料分布在砂浆中，二者的结合面也是薄弱面。

对于亚微观和宏观结构, 影响其性能的除基相和分散相自身特性外, 骨料的分布及其与基相之间结合面的强度有很大意义. 由于基相的收缩受到分散相(硬骨料)的限制, 在结合界面处会形成许多随机分布的微裂缝(见图)



空隙的形成：

硬化混凝土中游离水作用形成的毛细孔
夹带空气而成的气孔
水泥石凝胶固相之间的凝胶孔

2.1.2 单轴向应力状态下的混凝土强度

强度即材料能承受的某种受力形成的极限应力，混凝土强度主要由试验力确定。

1. 抗压强度——混凝土最主要的强度指标

(1) 立方体抗压强度 (f_{cu}) 和强度等级C

f_{cu} 定义：用立方体试块测得的抗压强度数值。

在用料相同时 f_{cu} 值受多种因素影响

标准试验方法:

- 试块尺寸—— $150 \times 150 \times 150$
- 温度—— $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$
- 相对湿度—— $\geq 90\%$
- 养护时间——28天
- 加荷方法—— $0.15 \sim 0.25 \text{MPa/S}$ (表面不涂润滑油)

由上述试验测得的抗压强度作为 f_{cu} 单位 N/mm^2 混凝土强度等级取立方体强度的标准值, 具有95%保证率, 记为 $f_{cu,k}$ 规范等级划分14级, CXX(XX----抗压强度标准值 N/mm^2)

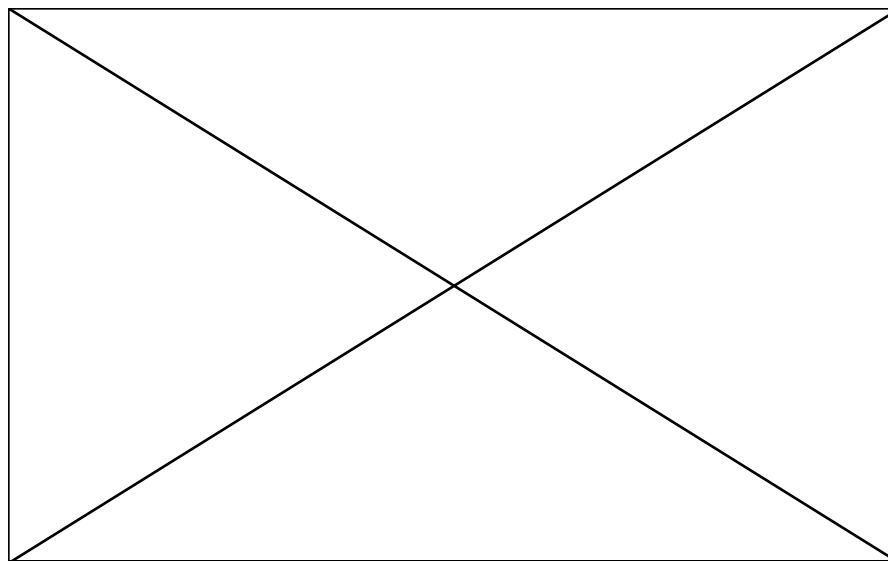
C15, C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50, C60, C65, C70, C80

} 高强混凝土

(2) 影响因素分析

(i) 加荷速度越快，测得抗压强度 f_{cu} 越高

(ii) 试块上下两面涂润滑油，测得 f_{cu} 低



(a) 不涂润滑剂 (b) 涂润滑剂

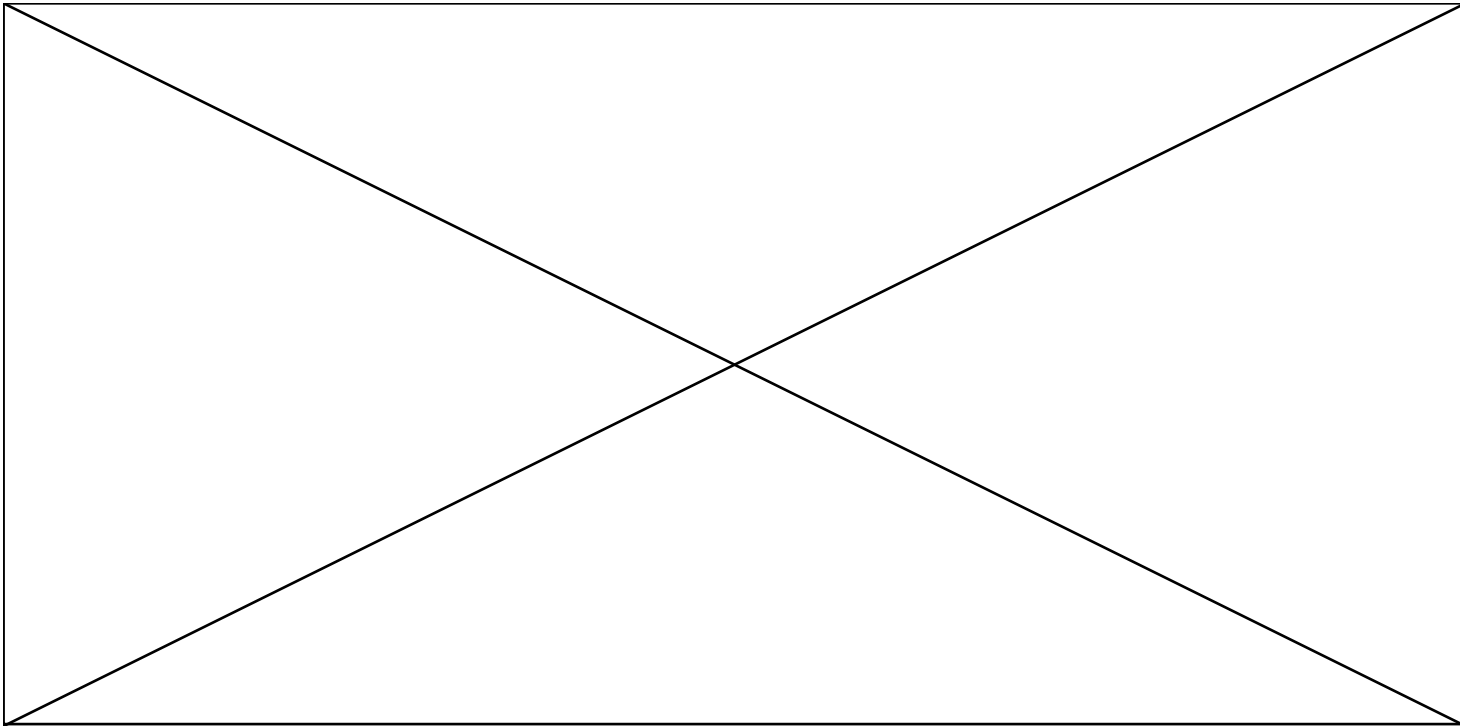
(iii) 试件尺寸愈小, f_{cu} 愈高。反之也成立
对于非标准试块得到 f_{cu} 应进行修正, 乘以修正系数,

100×100×100mm试块 0.95

200×200×200mm试块 1.05

(iv) 齡期的影响

f_{cu} 通常随时增长，先快后慢



混凝土立方体强度随齡期的变化

1-在潮湿环境下； 2-在干燥环境下

(3) 混凝土强度等级选用原则

①一般不低于C15

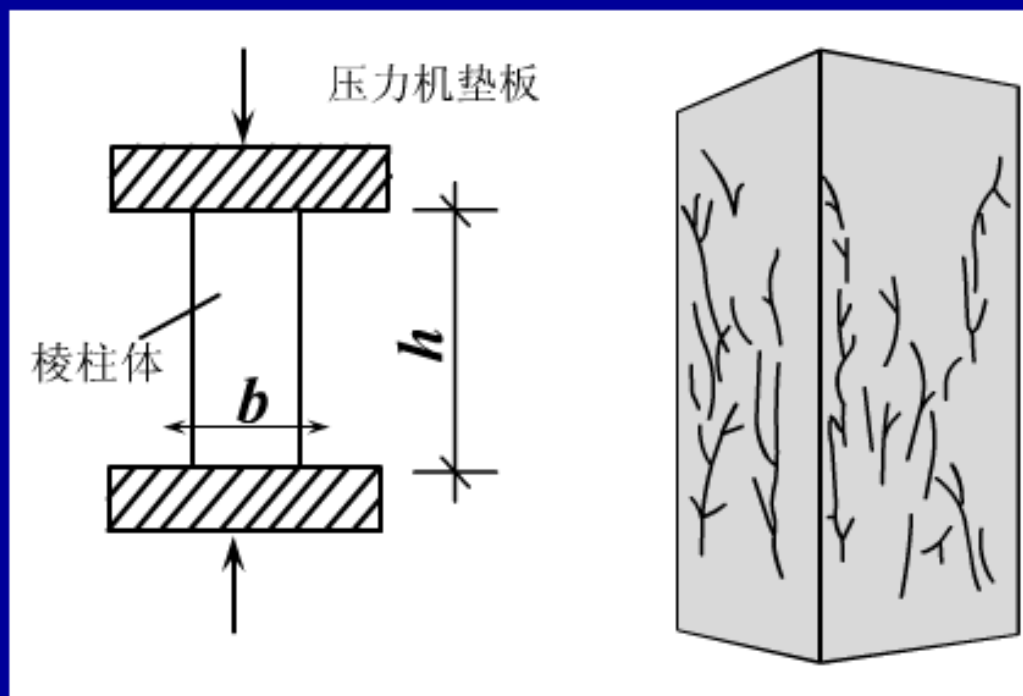
②采用HRB335级钢筋，不宜低于C20

③采用HRB400和RRB400级钢筋以及承受重荷载的构件，不低于C20

④预应力混凝土结构，不应低于C30，以钢绞线、钢丝、热处理钢筋为预应力筋时，不宜低于C40。

(4) 轴心抗压强度 f_c

棱柱体试块更接近实际情况，由此得到的抗压强度称为轴心抗压 f_c 。

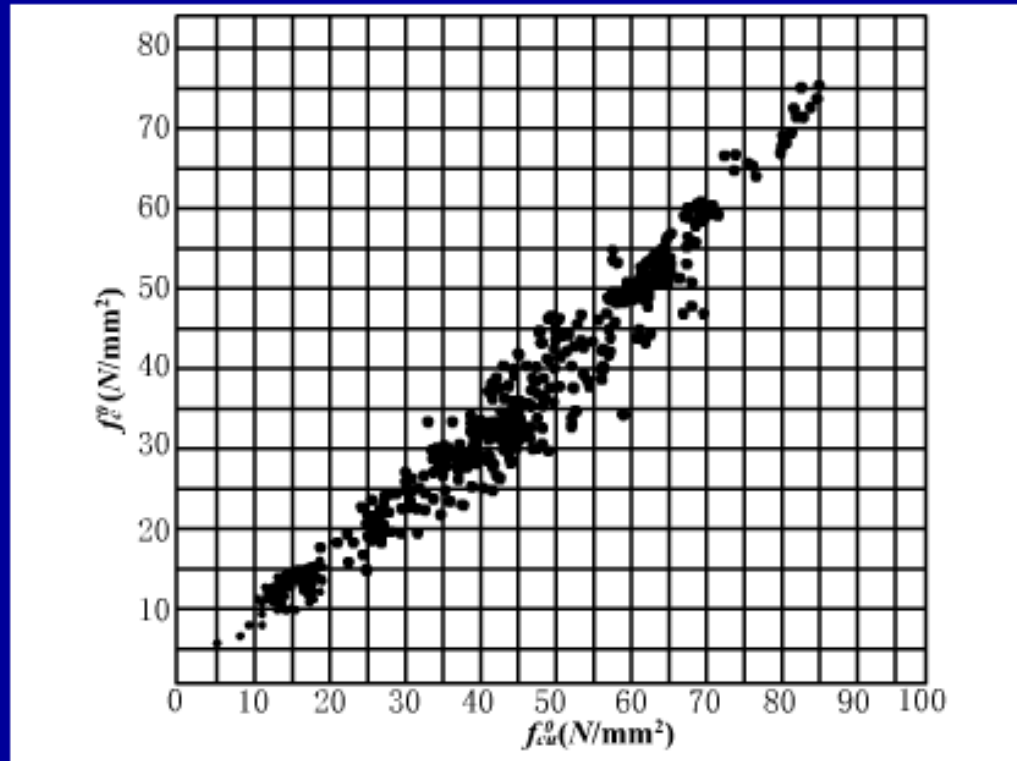


混凝土棱柱体抗压破坏和破坏情况

试块尺寸：150×150×300mm

轴心抗压强度 f_c 的95%保证率的抗压强度定义为轴心抗压强度标准值，记为 f_{ck} 。

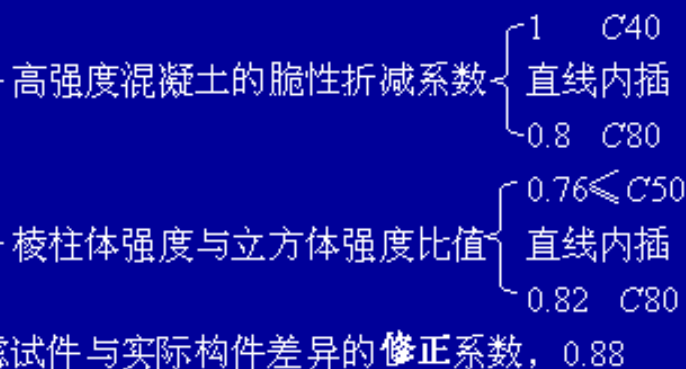
f_{cu}° 实现值从理论上一定大于 f_c° ， $\frac{f_c^{\circ}}{f_{cu}^{\circ}}$ 的值大致在 0.70~0.92，其试验值见图：



混凝土轴心抗压强度与立方体抗压强度的关系

规范基于安全的取值为

$$f_{ck} = 0.88 \times \alpha_1 \alpha_2 f_{cu1k}$$



国外常用圆柱体试件确定轴心抗压强度，相应地称为圆柱体抗压强度 f'_c ，其试件尺寸常用为，直径6英寸（152mm），高12英寸（305mm），对C60以下混凝土有：

$$f'_c = 0.79 f_{cu}$$

混凝土受压破坏机理

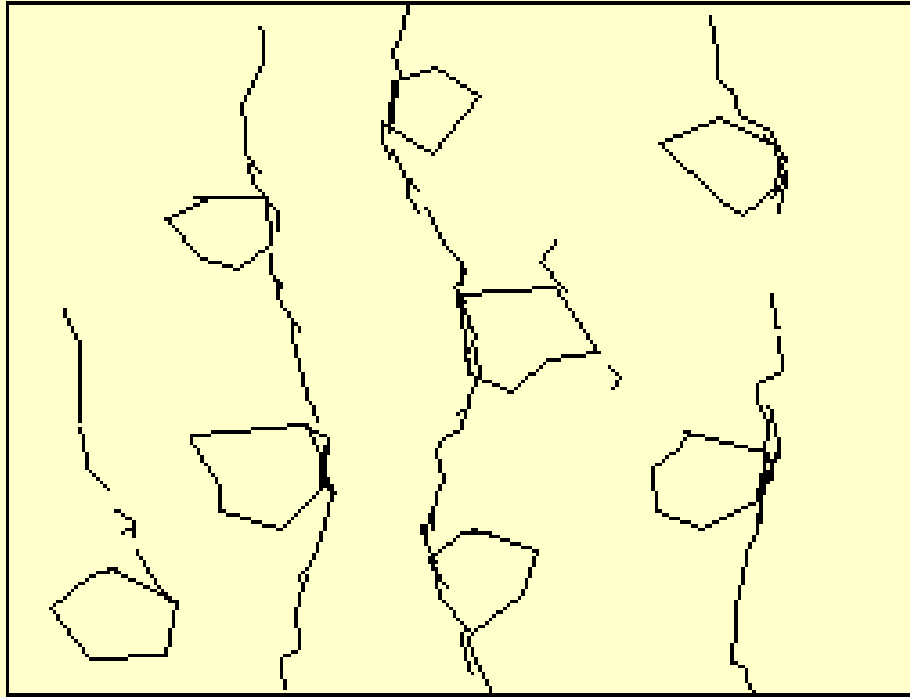
混凝土的抗压强度远低于其宏观结构二相材料（砂浆和粗骨料）中任一组成相的强度。

例：粗骨料抗压强度为 90N/mm^2

砂浆抗压强度为 48N/mm^2

二者组成的砼的抗压强度只有 24N/mm^2

薄弱环节在于界面：原因在于多层次二相复合结构中存在初始微裂缝。在外力作用下，混凝土的破坏过程是裂缝不断产生、扩展和失稳的过程。



破坏过程的三阶段

(1) 准弹性阶段：30%~40% f_c 以内

此时仅在结合面的某些孤立点上产生拉应力集中。当拉应力超过结合面的粘结强度时，这些点就开裂。

记竖向（加载方向）的应变为 ε_1 ，相应应力为 σ_1 ，横向应变为 ε_2 、 ε_3 ，平均体积应变为 $\varepsilon_m = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)/3$ 。

此阶段不可恢复变形数值很小， ε_m 为压缩。

界面裂缝向砂浆中延伸时进入第二阶段。

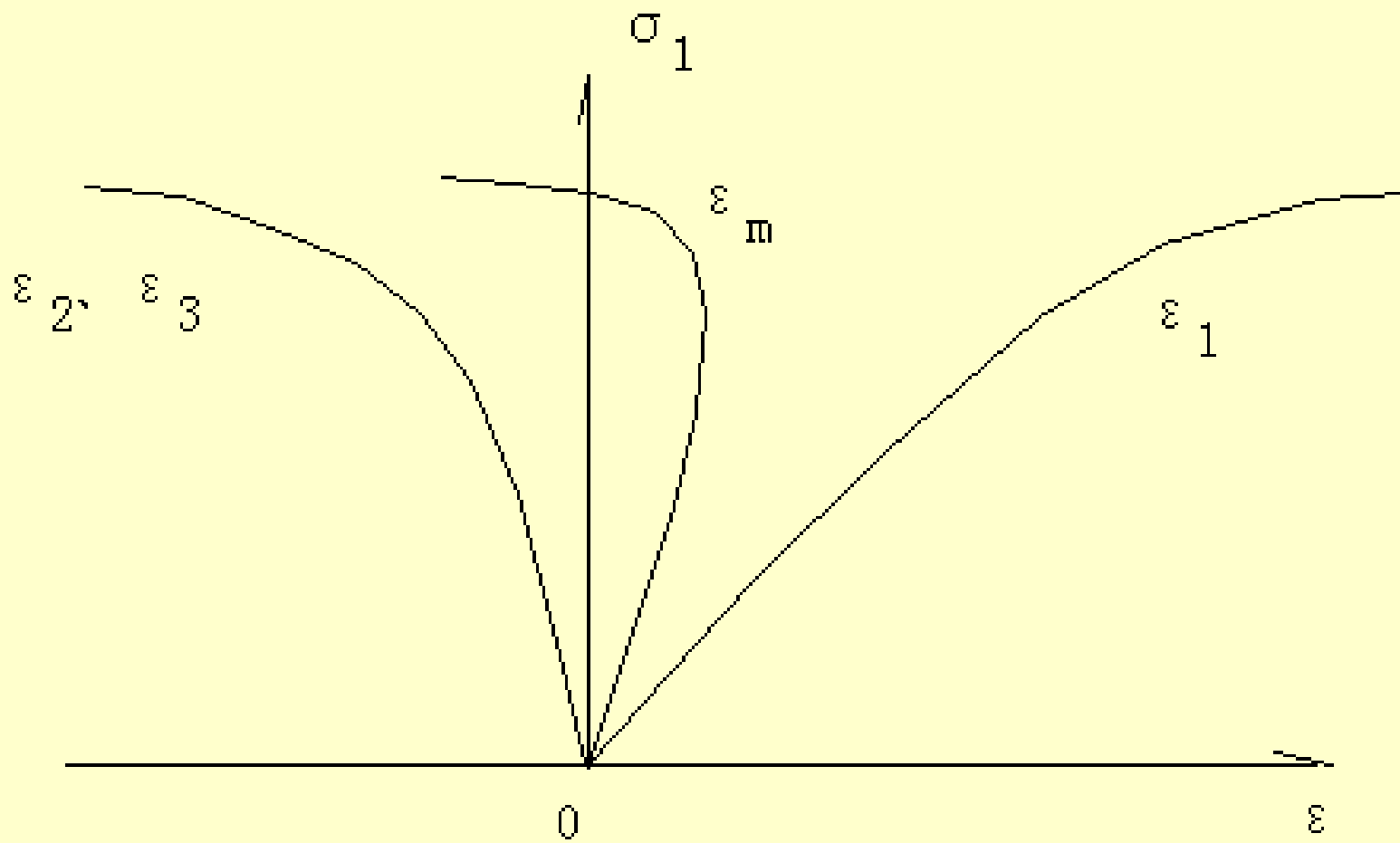
(2) 第二阶段：稳定裂缝扩展阶段。

停止加载时，裂缝扩展也停止。由于不可恢复变形明显增加，应力应变曲线变弯， μ 值（泊松比）增大， ε_m 增长速率逐渐降低。

当体积应变速率降至零时（即 $\Delta \varepsilon_m$ 开始反号时），第二阶段就结束。此时的应力约为70%~90% f_c ，此应力称为临界应力。

(3) 第三阶段：不稳定裂缝扩展阶段

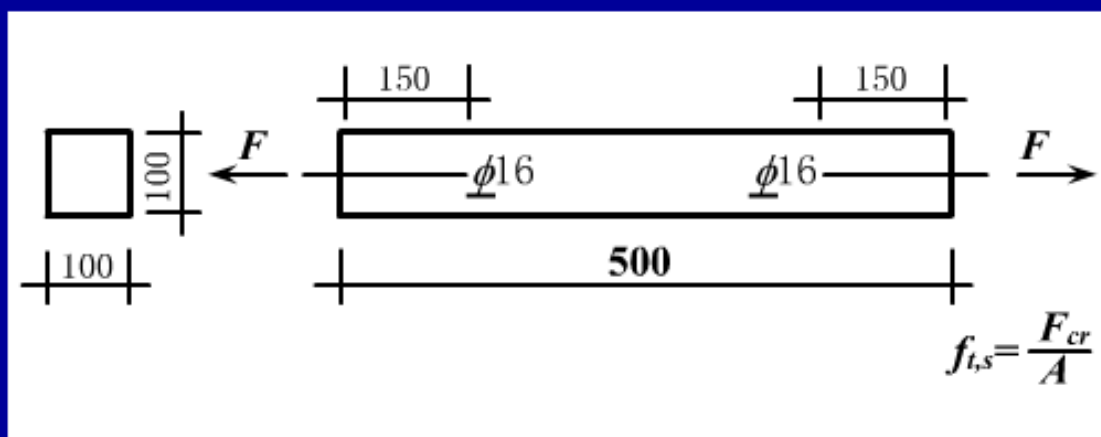
此阶段裂缝数量和宽度均急剧增加，裂缝连成平行于受荷方向的通缝，使混凝土被分割成若干个小柱体，导致整体的最后破坏，应力应变曲线更加弯曲，体积应变不断膨胀。



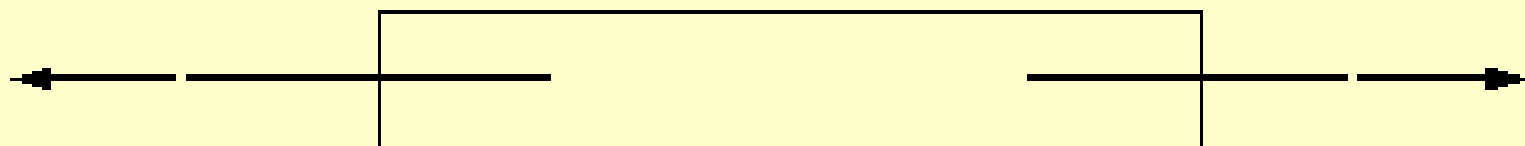
综上所述，混凝土的宏观破坏是裂缝积累的过程，是内部结构从局部损伤到连续性遭受破坏（裂缝贯通）而导致整个体系解体而丧失承载能力的过程。决非组成相（粗骨料、砂浆）自身强度的耗尽。

2. 抗拉强度 (f_t) —— 混凝土重要强度指标, 用于抗裂, 裂缝宽度计算及抗冲切, 抗拉强度确定方法主要有三种: 轴拉试验, 劈裂试验, 弯折试验。

轴拉试验:



抗拉强度的直接试验方法：试件尺寸为100mm×100mm×500mm，两端埋有伸进长度为150mm的Φ16变形钢筋（位于试件轴线上），通过夹具对试件施加拉力。



回归公式：
$$f_t = 0.26 f_{cu}^{\frac{2}{3}}$$

规范取：
$$f_t = 0.23 f_{cu}^{\frac{2}{3}}$$

特点：抗拉强度的增长慢于抗压强度的增长。

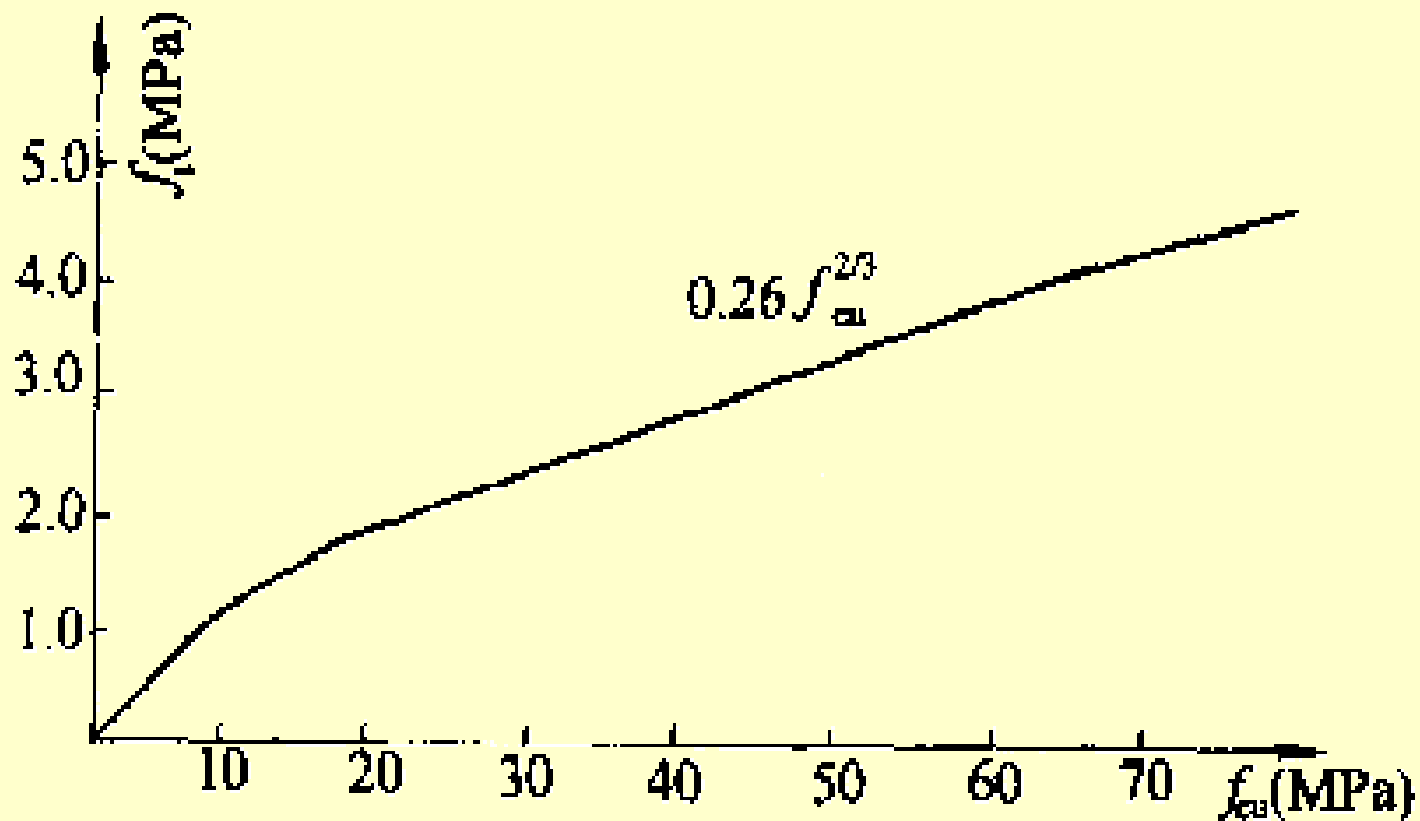
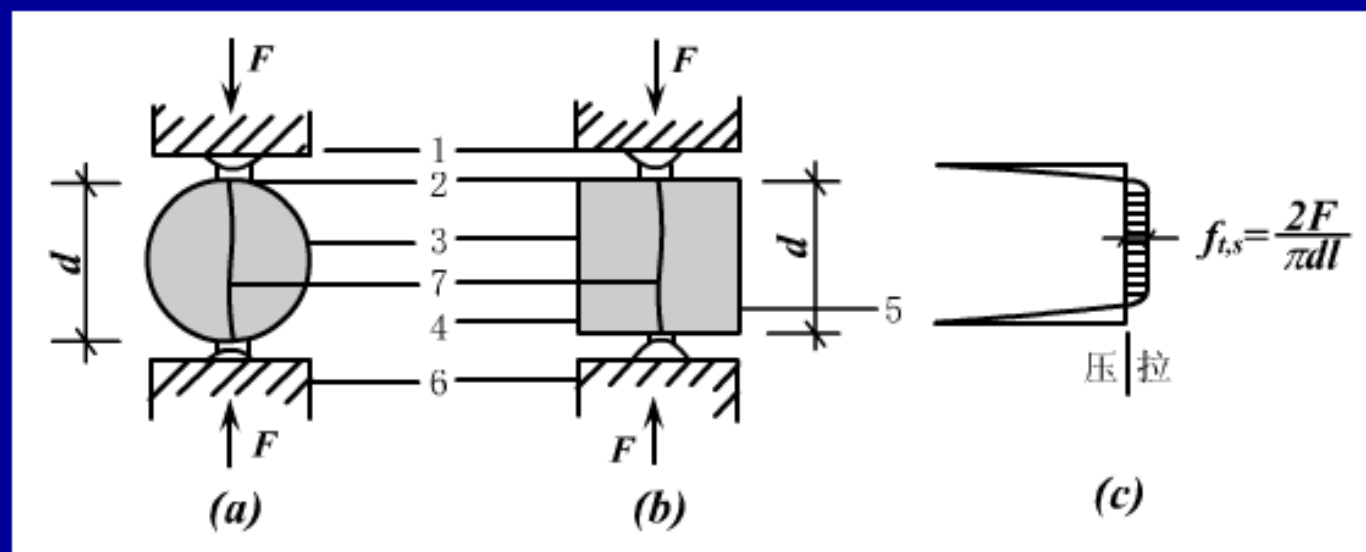


图 2-3 轴心抗拉强度与立方体抗压强度

劈裂试验：



(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

根据弹性理论，劈拉强度为

$$f_{t,s} = \frac{2F}{\pi dl}$$

其中，F为破坏荷载

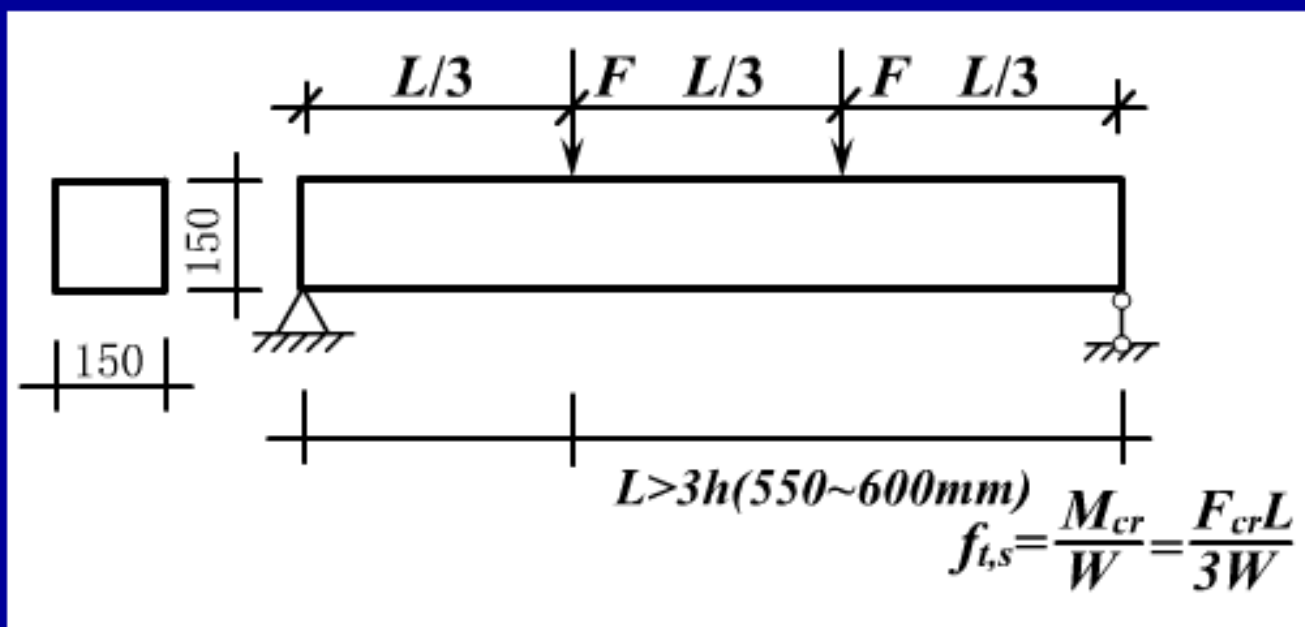
d为圆柱体直径或立方体边长

l为圆柱体长度或立方体边长

$f_{t,s}$ 与 f_{cu} 的关系：

$$f_{t,s} = 0.19 f_{cu}^{\frac{3}{4}}$$

弯折试验:



《规范》认为：轴拉强度大致为抗压强度 $\left(\frac{1}{17} \sim \frac{1}{8}\right)$ ，其关系为

$$f_{t,m}^s = 0.395 f_{cu,m}^{0.55}$$

| |
平均值 平均值

$$f_{tk} = 0.88 \cdot \alpha_2 \cdot f_{tk}^s = 0.88 \cdot \alpha_2 \cdot f_{tm}^s (1 - 1.645\delta)$$

$$f_{tk} = 0.88 \cdot \alpha_2 \cdot \left(0.395 \cdot f_{cu,m}^{0.55}\right) (1 - 1.645\delta)$$

$$= 0.88 \cdot \alpha_2 \cdot \left(0.395 \cdot \left(f_{cu,m} (1 - 1.645\delta)^{0.55} \cdot (1 - 1.645\delta)^{0.45}\right)\right)$$

$$= 0.88 \cdot \alpha_2 \cdot 0.395 \cdot f_{cu,k}^{0.55} \cdot (1 - 1.645\delta)^{0.45}$$

δ - 变异系数

2.1.3 复合应力状态下混凝土的强度

实际构件绝大多数处于复合受力状态，混凝土在复合应力状态下的强度理论很复杂，但又是很重要的问题。

对平面复合受力情况试验结果进行分析：

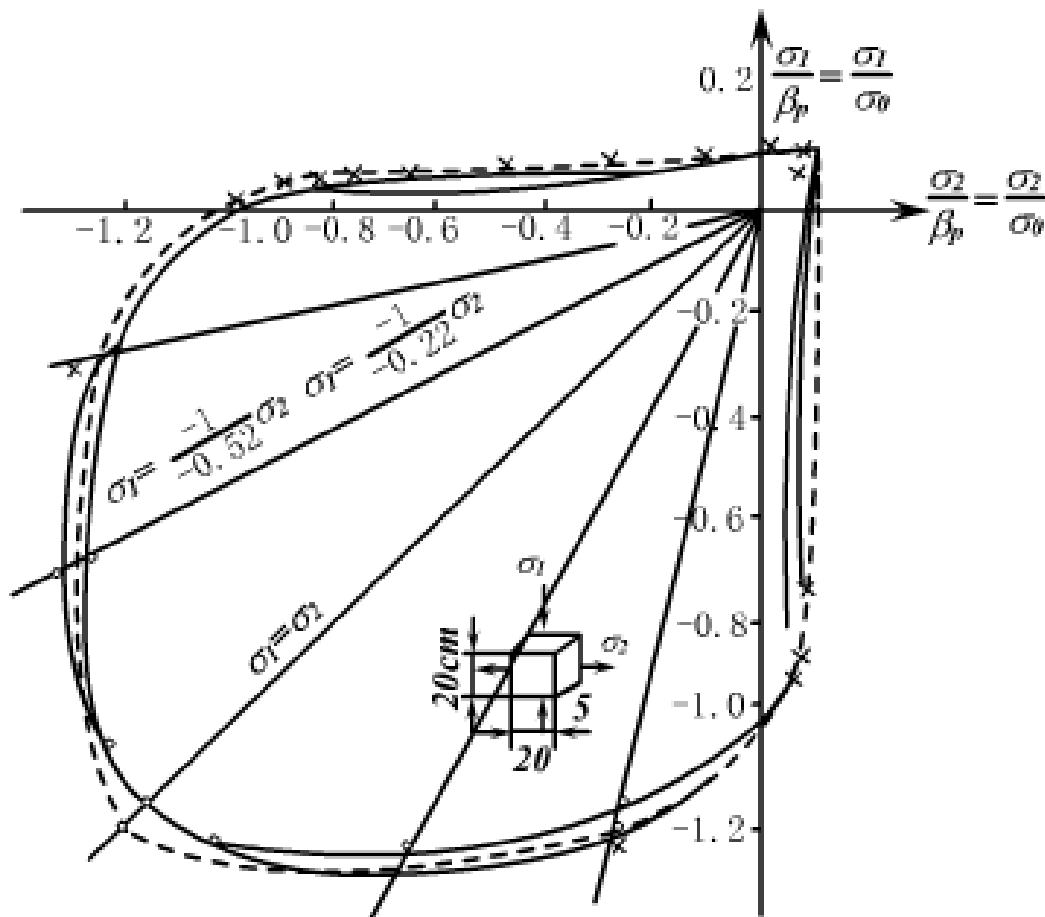
(1) 双轴正应力作用下的强度

定性分析结论:

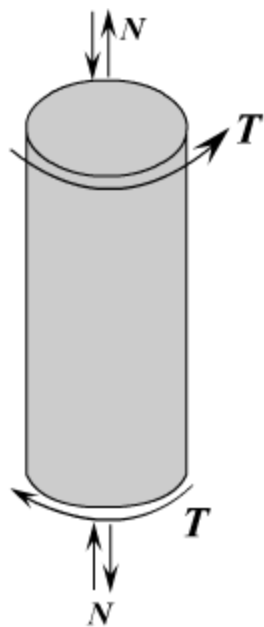
(i) 第I象限（拉-拉应力状态）——一向的抗拉强度受另一向拉应力影响较小。

(ii) 第III象限（压-压应力状态）——一向的抗压强度随另一向压应力增加而提高。

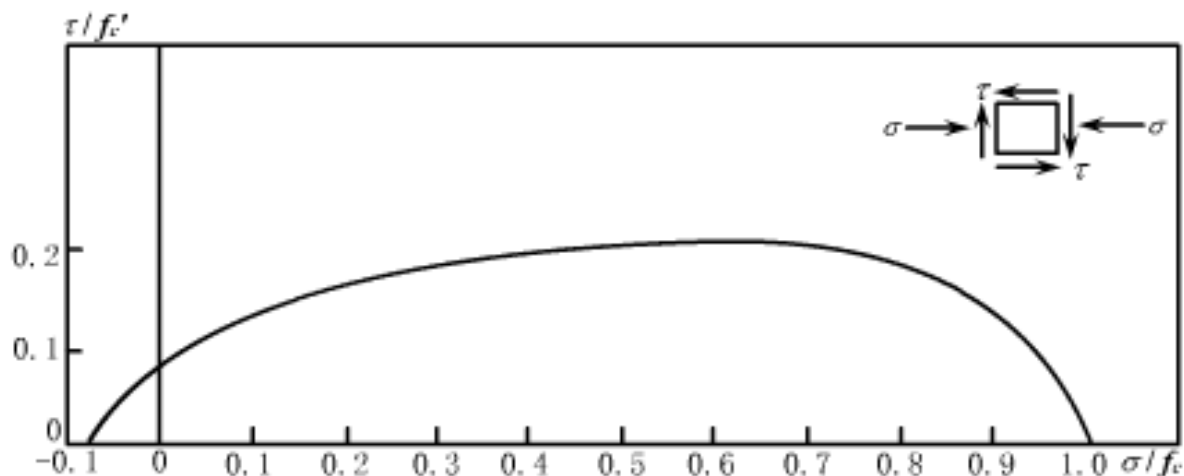
(iii) 第II, IV象限（拉-压应力状态）——一向的抗压（拉）强度随另一方向拉（压）应力增大而降低。



(2) 正应力及剪应力复合作用下的强度



拉（压）剪试件

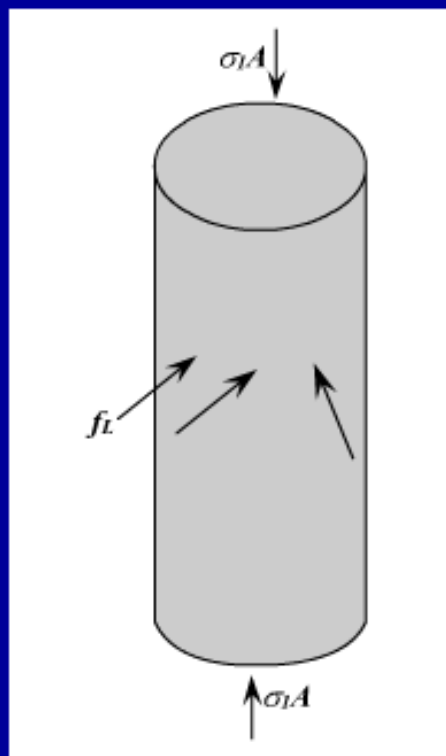


法向应力和剪应力组合的破坏曲线

定性分析结论:

- (i) 拉应力达到抗拉强度 (f_t) 时, 抗剪强度为零。
- (ii) 随拉应力减小, 或压应力增大, 抗剪强度将逐渐加大, 但在压应力超过 $0.6 f_c$ 又逐渐减小, 达到抗压强度时为零。

(3) 三向受压时的强度



三向液压试验

定性分析结论:

(i) 最大主压应力轴的抗压强度 f'_{cc} 随侧向压应力 f_L 增加而有较大提高。

(ii) 美国的试验结果为

$$f'_{cc} = f'_c + (4.5 \sim 7.0) f_L$$

侧向应力
无侧压时轴心抗压强度
侧压时轴心抗压强度

2.1.4 混凝土的变形性能

分类一： 受力引起的变形（又分为弹性变形和塑性变形）
（也分为短期变形和长期变形）
----- 不变应力下的长期变形称为徐变

其他原因（如收缩、温度、湿度变化）产生的变形

分类二： 短期变形
长期变形

描述变形的的方法：

应力应变关系
变形模量、弹性模量等

混凝土的变形性能——另一个重要的力学性能

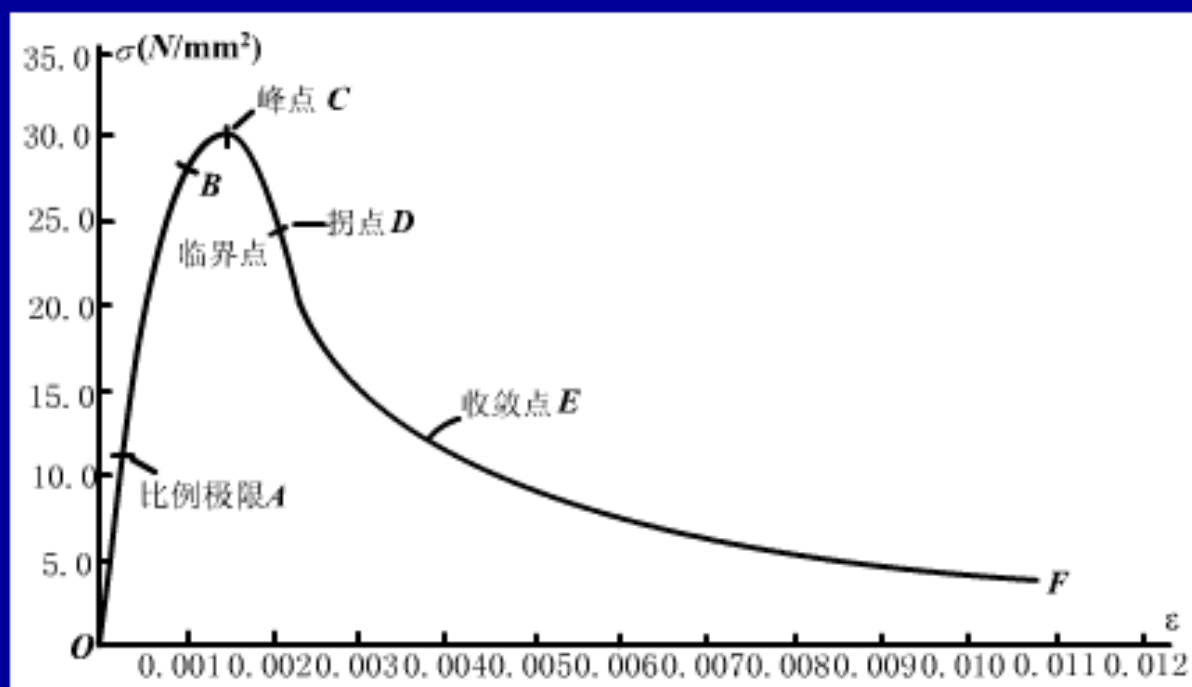
混凝土变形分为受力变形和体积变形两种

1. 受力变形

1) 一次短期加载下的变形性能

(1) 受压时应力应变关系——最基本的力学性能

(i) 试验曲线



特征：

①分为OC上升段和CF下降段，且

OA线段 ($\sigma \leq 0.3f_c^s$)，呈直线变化，可视混凝土为线弹性体；

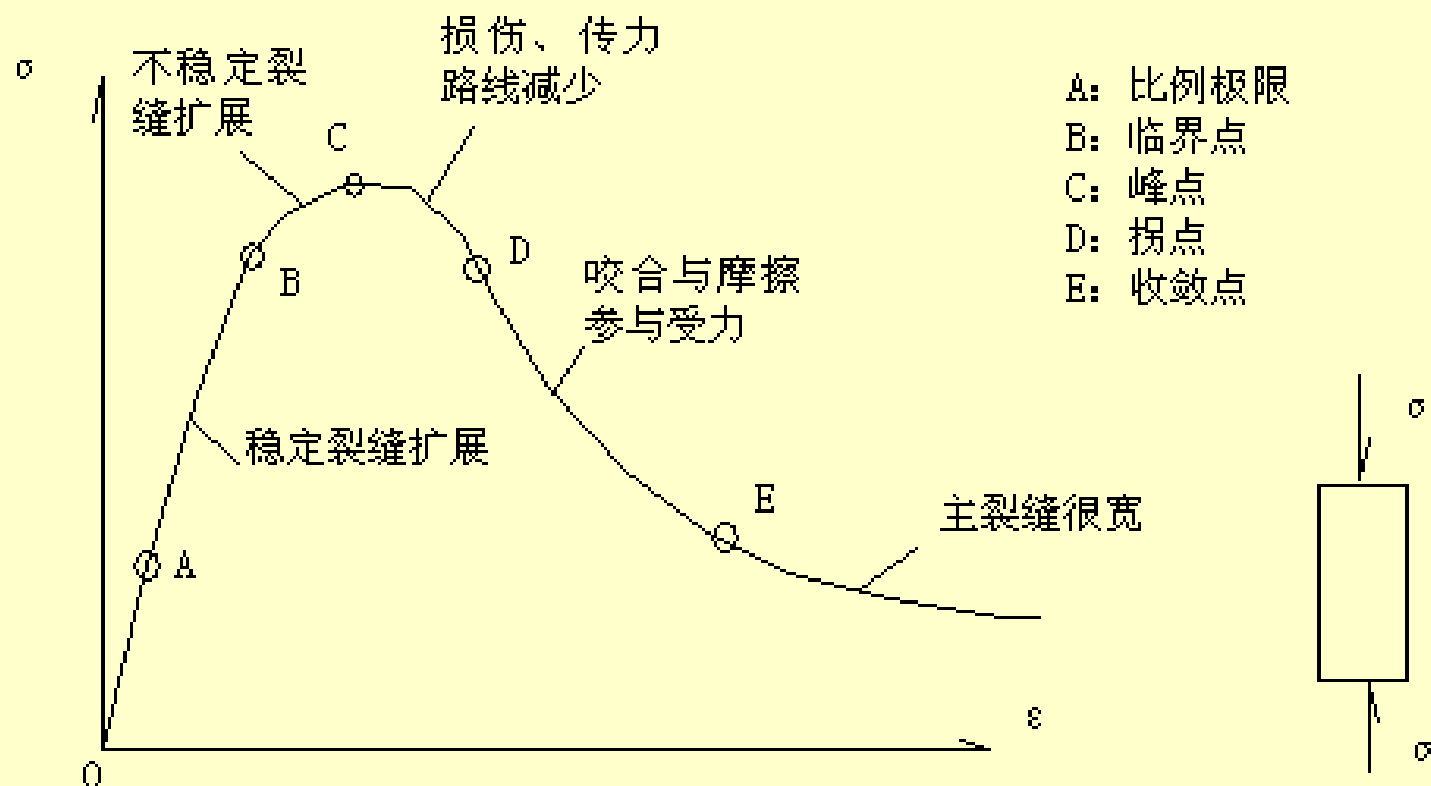
AB线段 ($0.3f_c^s < \sigma \leq 0.8f_c^s$) 也呈曲线变化，且斜率明显减小；

BC线段 ($0.8f_c^s < \sigma \leq f_c^s$) 呈曲线变化，斜率变小；

CD线段 (D为反弯点)，呈曲线变化，下降速度快；

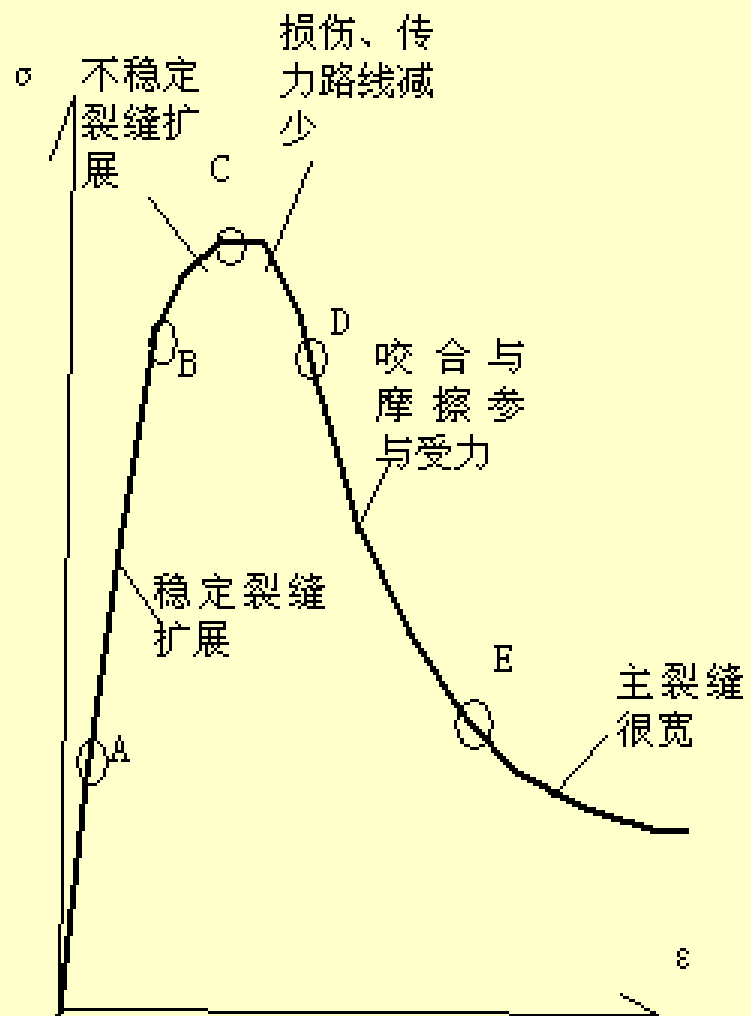
DE线段 (E为破坏点)。

试验结果:



试验: 采用棱柱体试件和位移控制的试验机
典型试验结果如上图

全曲线分为上升段和下降段两部分。

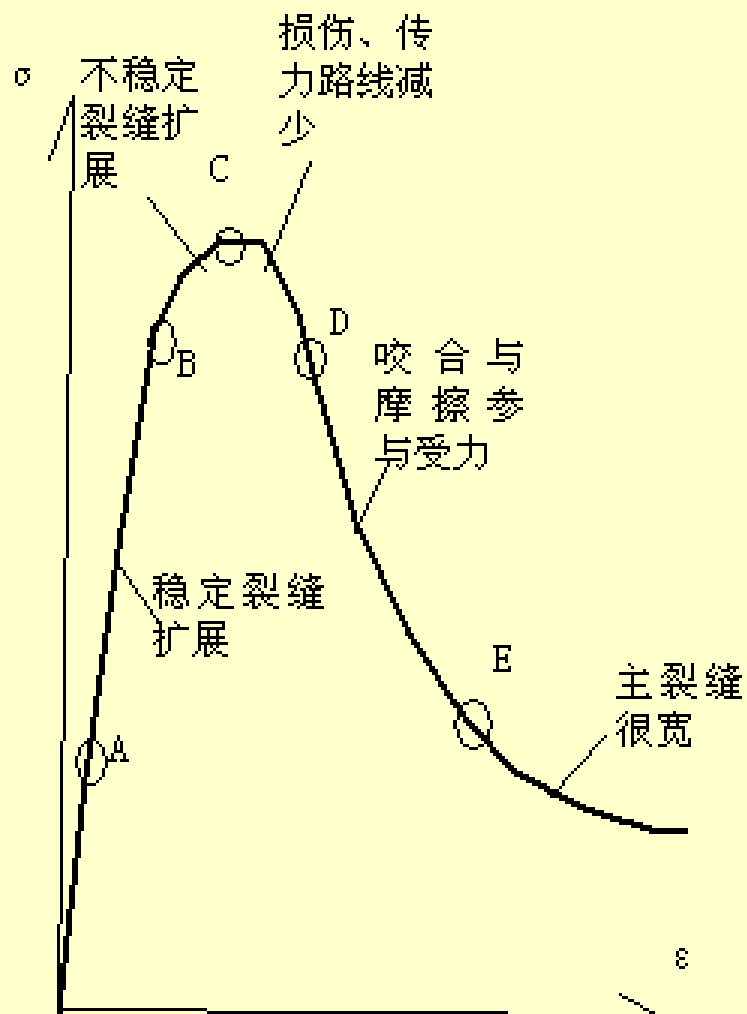


上升段OC:

OA段: A点相当于 $0.3 \sim 0.4f_c$, 主要是弹性变形, 水泥胶体的粘性流动及初始微裂缝变化的影响很小, 应力应变关系接近直线。称A点为比例极限。

AB段: 稳定裂缝扩展阶段。临界点B的应力可作为长期抗压强度的依据。B点约相应于 $0.75f_c$ 。

BC段: 不稳定裂缝扩展阶段。此阶段中试件中所积蓄的弹性应变能始终保持大于裂缝发展所需要的能量。与峰点C相应的应变称为峰值应变, 其值在 $0.0015 \sim 0.0025$ 之间, 平均值为 0.002 。

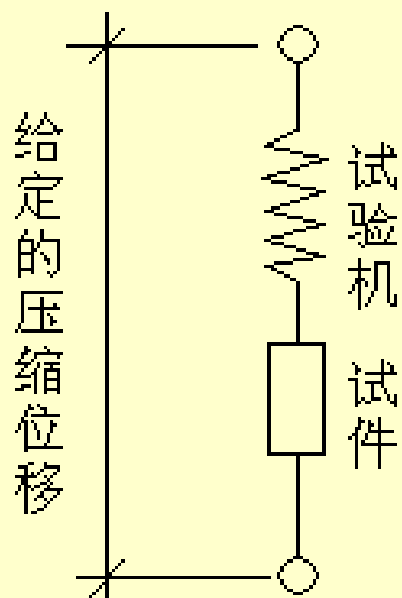


下降段CF：下降段是裂缝继续扩展、传播的反映。

CD段：有效断面减少阶段：裂缝迅速发展，内部结构的整体性受到越来越严重的破坏；赖以传递荷载的传力路径不断减少，试件的平均应力强度下降，所以应力应变曲线向下弯曲，直至曲率为零的拐点D。

DE段：咬合摩擦阶段。此阶段中，受力性质开始发生本质变化，骨料间的咬合力和摩擦力开始与残余承压面共同承受荷载。E点为曲率最大点，称为收敛点。

EF段：收敛段。此时贯通的主裂缝已很宽，结构的内聚力已几乎耗尽，对无侧向约束的混凝土已失去结构意义。

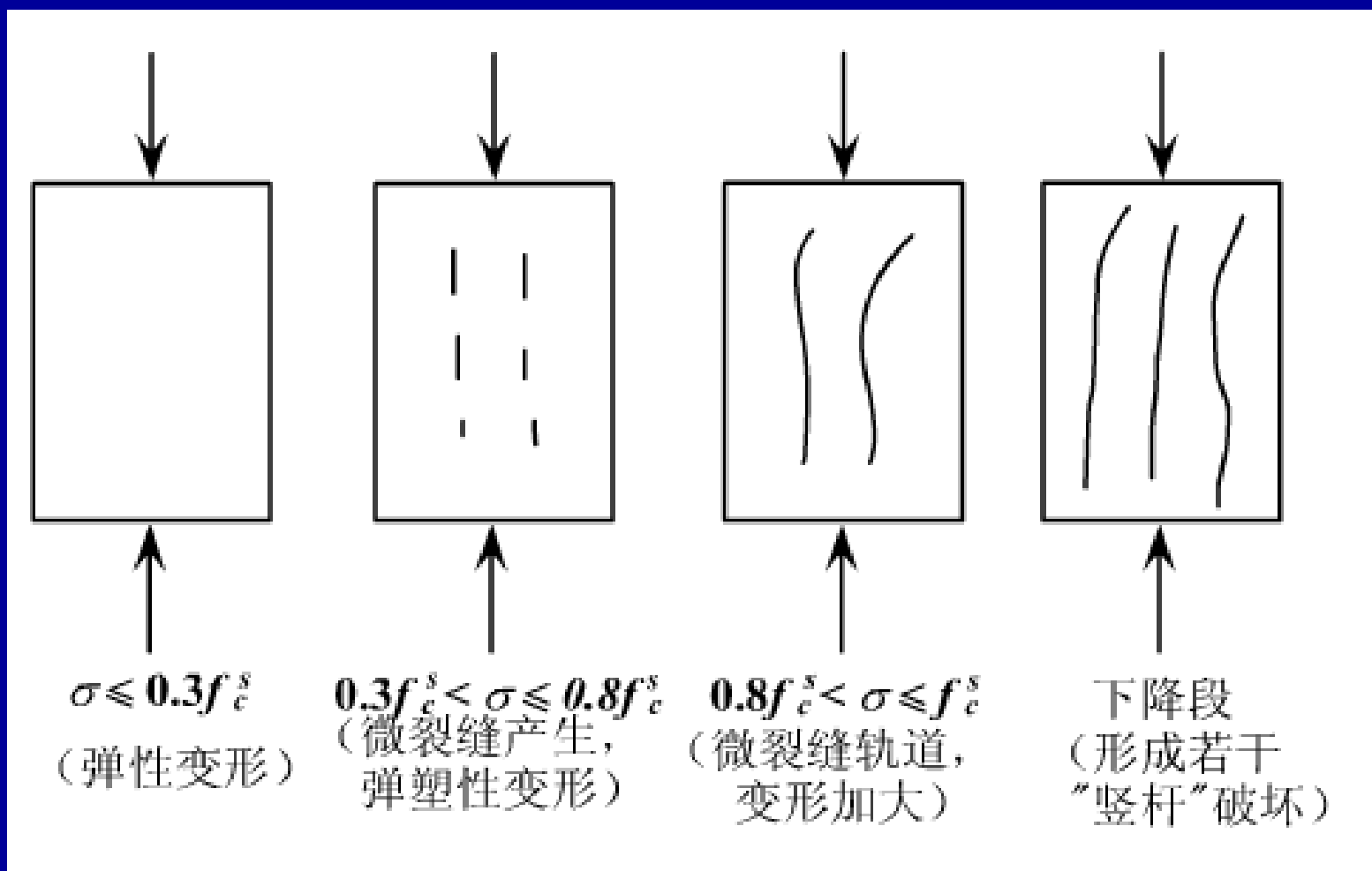


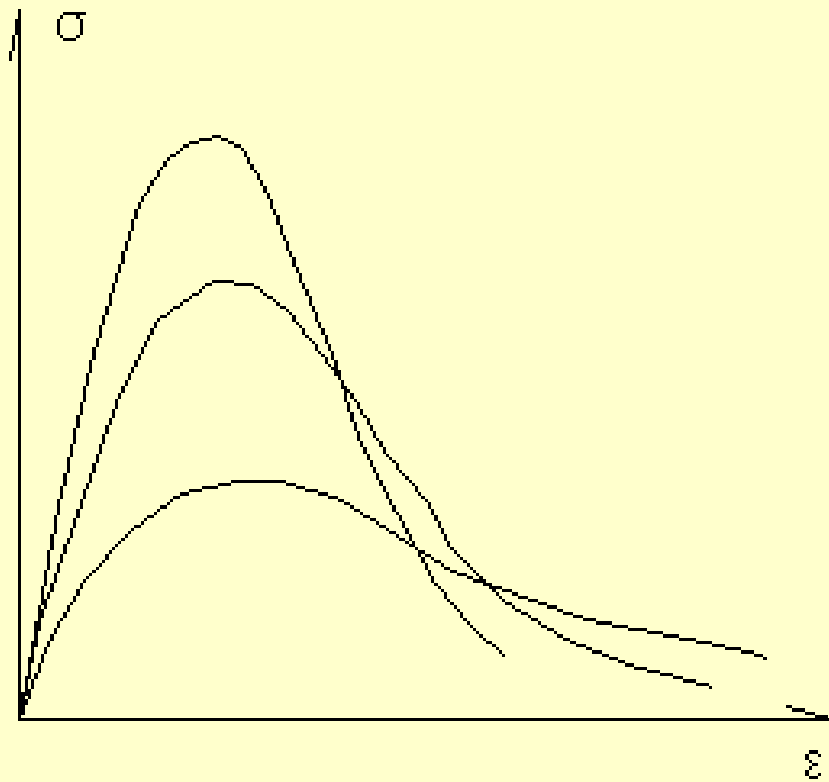
下降段与试验机的刚度有关。

刚度小时，试件很快被试验机释放的弹性能破坏，下降段很陡或做不出。

刚度大时，能做出反映材料性能的下陷段。

(ii) 试验结果分析





低强混凝土的下降段较平缓，高强混凝土的下降段则短而陡。

所以高强混凝土的延性较差。

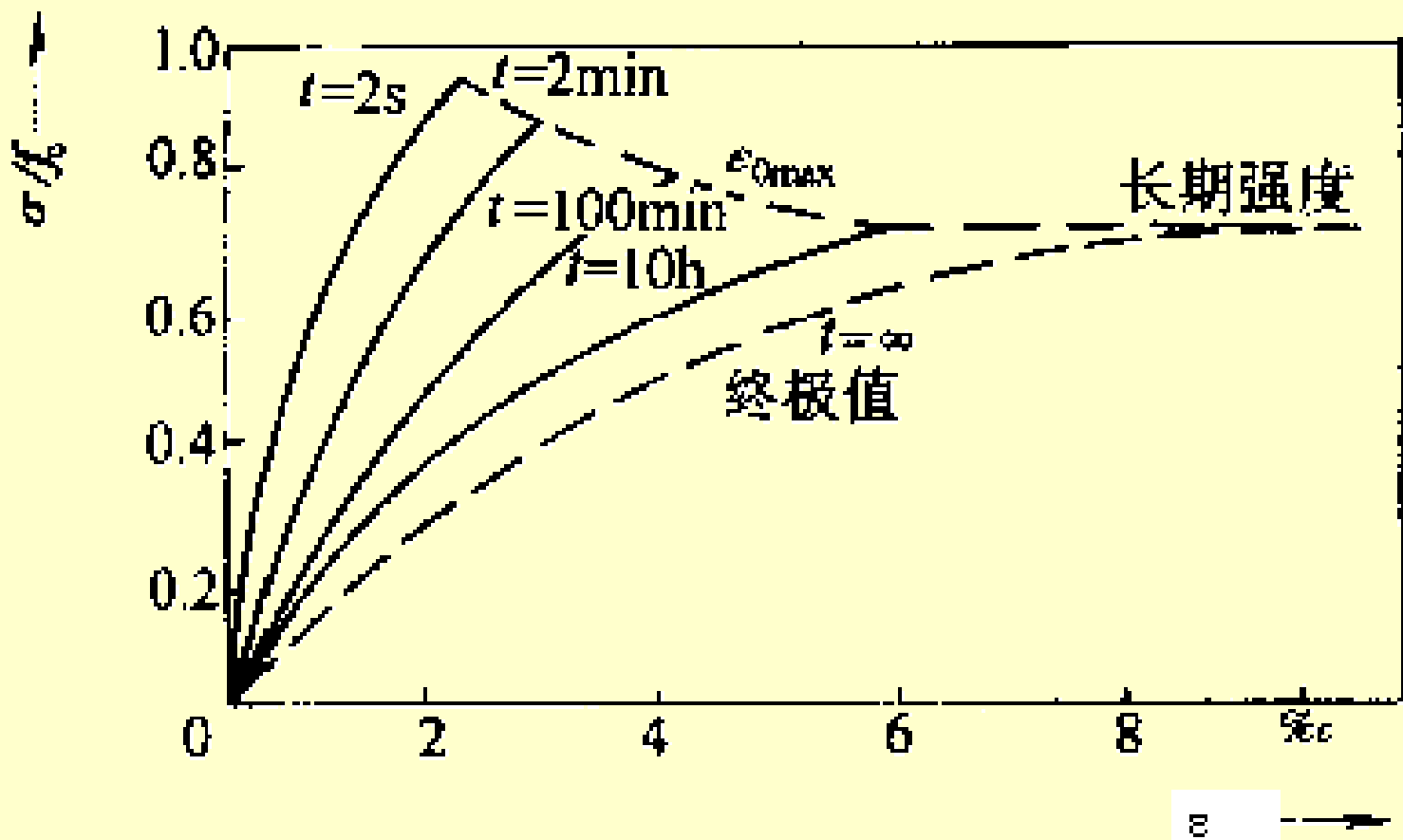
在工程实际中，如荷载无法卸去，则下降段对于承载是无用的，此时峰值应变就是最大压应变。如对于轴心受压柱即是如此。

(iii) 混凝土强度等级、加荷速度的影响

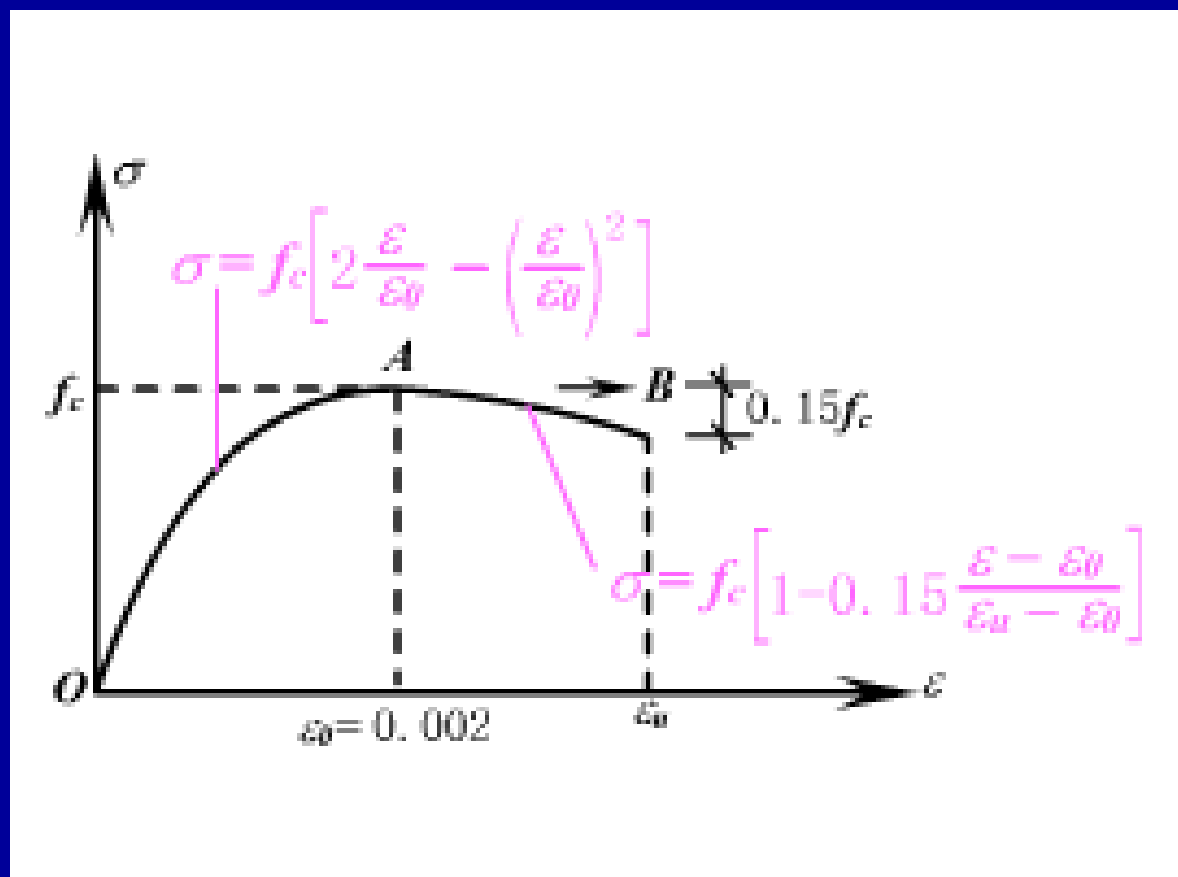
混凝土强度等级对上升段形状影响不大，强度等级高的“下降段”顶部尖，应力下降快，曲线短延性差，强度等级低的“下降段”顶部平坦，应力下降慢，曲线长，延性好。

加荷速度愈慢，测得的下峰值应力愈低， ϵ_0 愈大，下降段愈短，一般 ϵ_0 变化不大（ $1.5 \sim 2.5 \times 10^{-3}$ ），极限压应变变化较大。

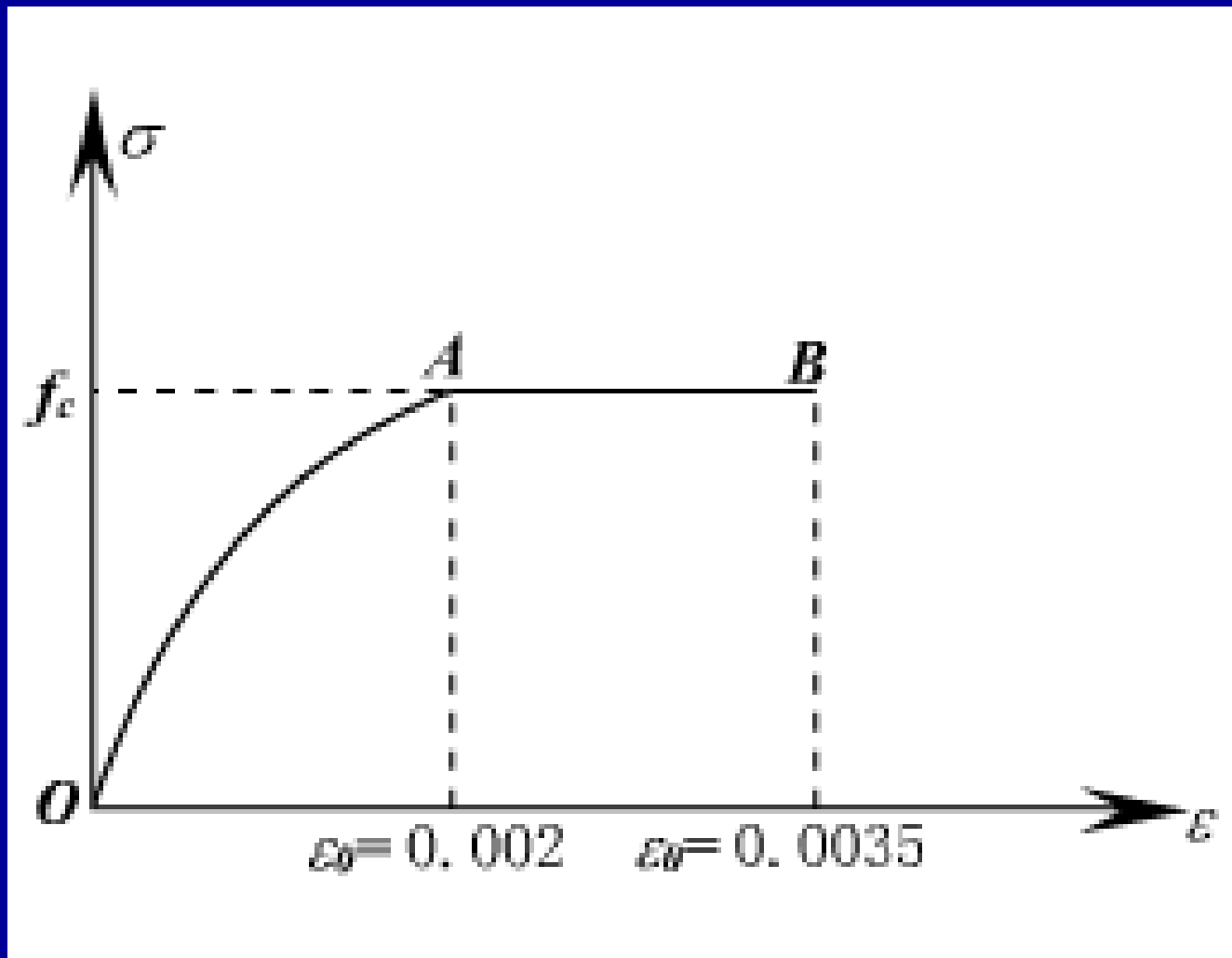
加载速度越快，强度越高，极限应变越小。



(iv) 数学模型

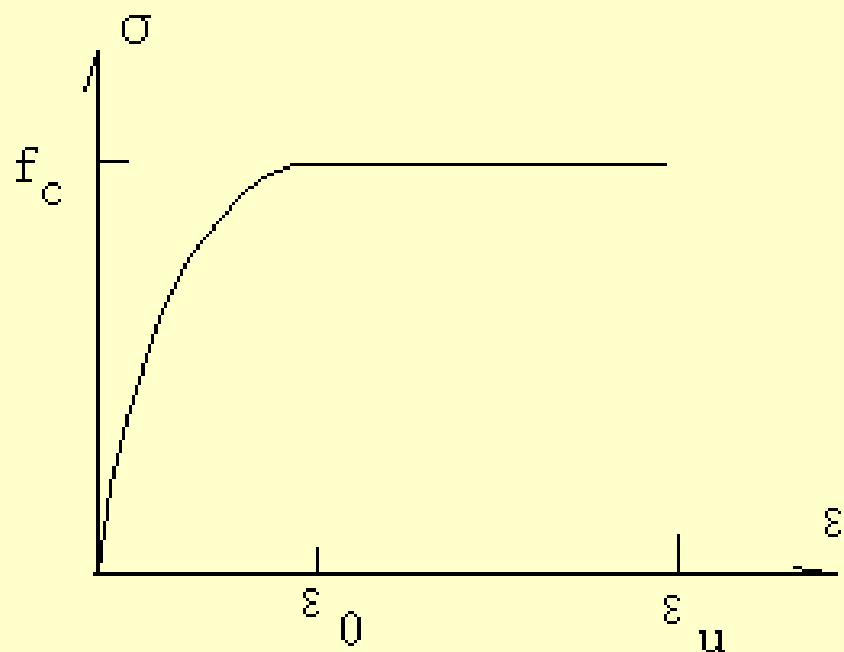


Hognestad建议的应力-应变曲线



Rüschi 建议的应力-应变曲线

Ruesch模型:



当 $\epsilon \leq \epsilon_0$ 时 (上升段):

$$\sigma = f_c \left[2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right]$$

当 $\epsilon_u \geq \epsilon > \epsilon_0$ 时 (下降段):

$$\sigma = f_c$$

可取:

$$\epsilon_0 = 0.002, \quad \epsilon_u = 0.0035$$

混凝土规范建议的公式为

$\varepsilon/\varepsilon_c \leq 1$ 时

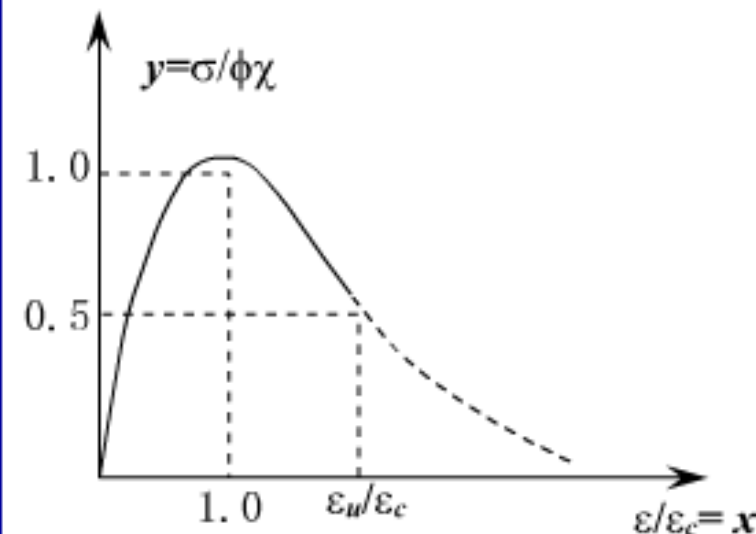
$$Y = \alpha_a X + (3 - 2\alpha_a) X^2 + (\alpha_a - 2) X^3$$

$X > 1$ 时

$$Y = \frac{X}{\alpha_d (X - 1)^2 + X}$$

各参数取值为

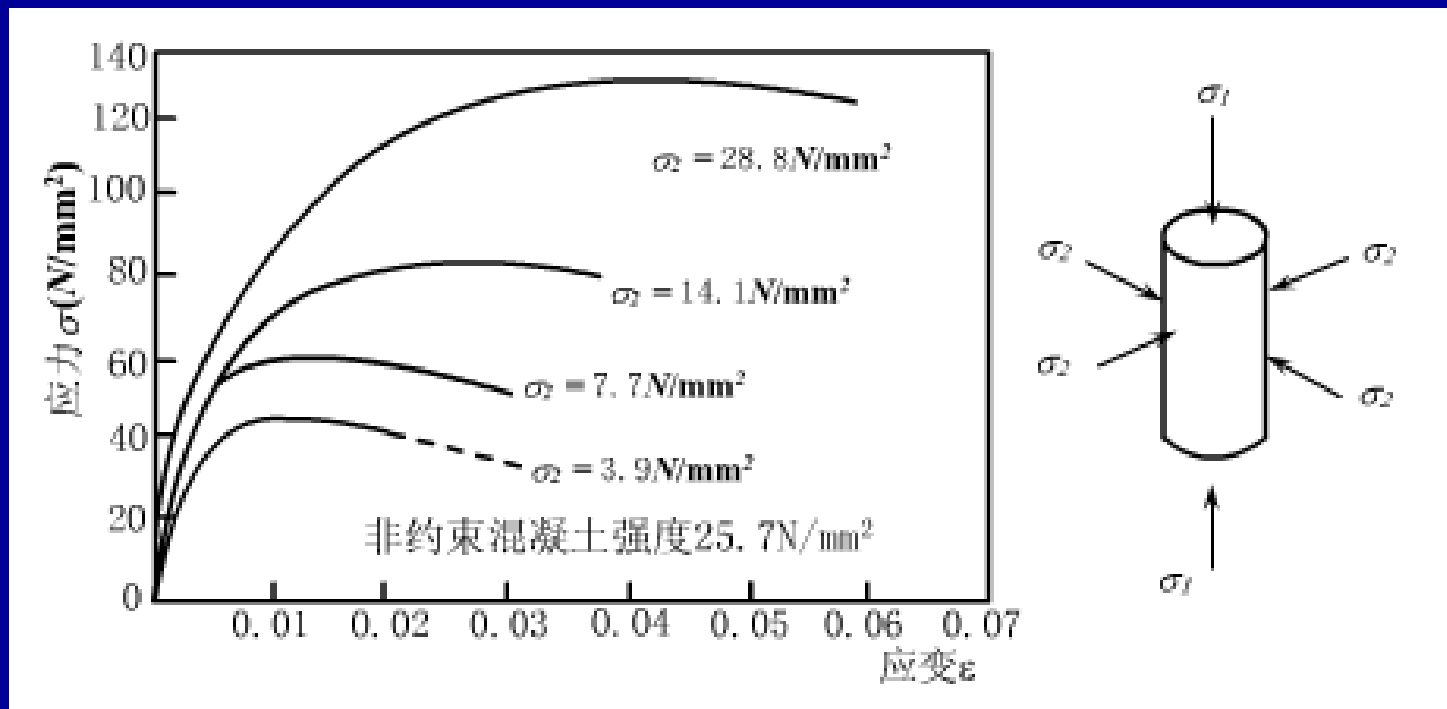
此模型主要用于
多轴本构关系中。



$f_c^* \left(\frac{N}{mm^2} \right)$	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\varepsilon_c \left(\times 10^{-6} \right)$	1370	1470	1560	1640	1720	1790	1850	1920	1980	2030
α_a	2.21	2.15	2.09	2.03	1.96	1.90	1.84	1.78	1.71	1.65
α_d	0.41	0.74	1.06	1.36	1.65	1.94	2.21	2.48	2.74	3.00
$\varepsilon_u/\varepsilon_0$	4.2	3.0	2.6	2.3	2.1	2.0	1.9	1.9	1.8	1.8

(2) 三向受压状态下的变形特点

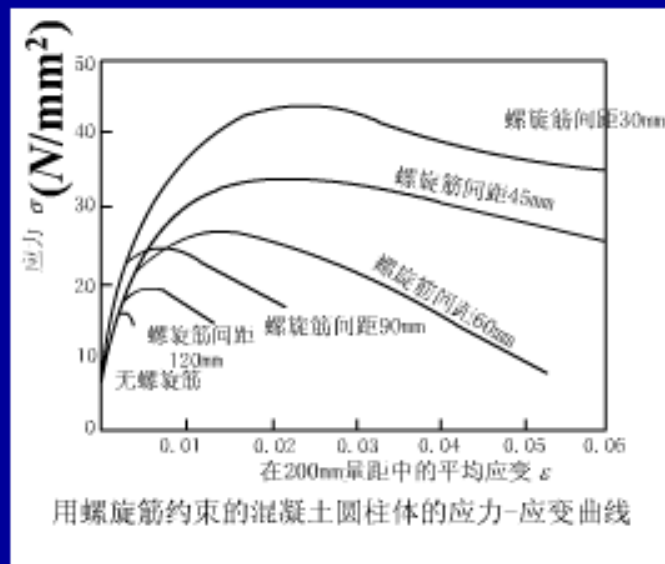
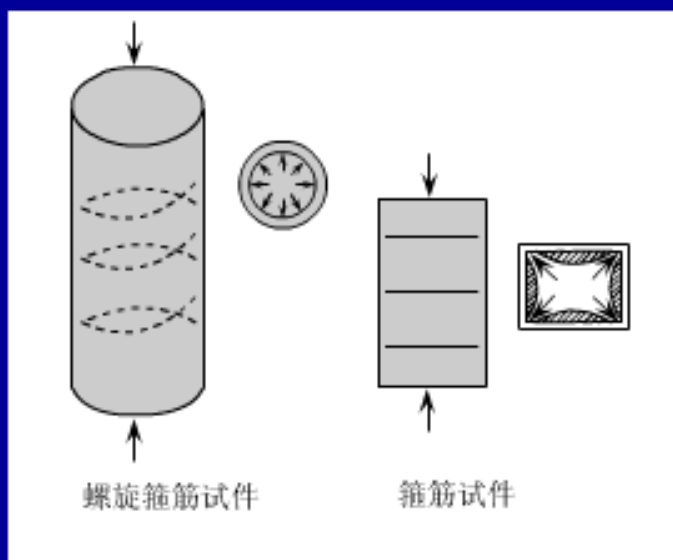
(i) $\sigma-\varepsilon$ 试验曲线 (三向受压)



结论:

- ① 随侧向压力增大, 混凝土抗压强度提高
- ② 随侧向压力增大, 延性提高

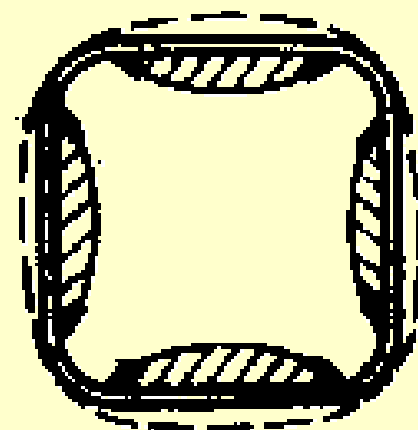
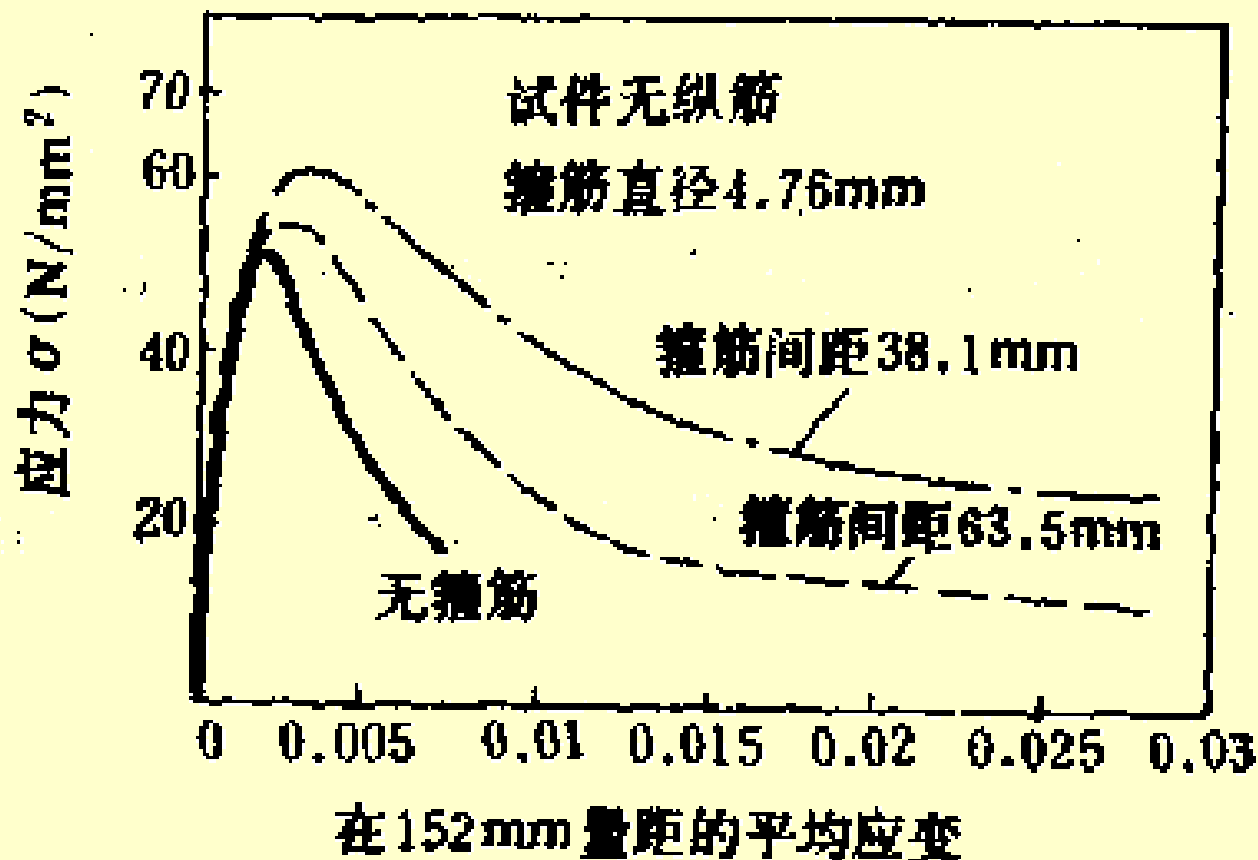
(ii) 间接约束试件的应力应变曲线 工程中采用型式



结论:

- ①配置间接钢筋同样提高混凝土抗压强度和延性，提高幅度与配筋间距相关；
- ②间接约束力主要影响下降段形状，配筋愈多，下降段愈平坦，延性愈好；
- ③螺旋筋约束效果优于箍筋，但箍筋易于施工，更常用。

方箍约束棱柱体试验:

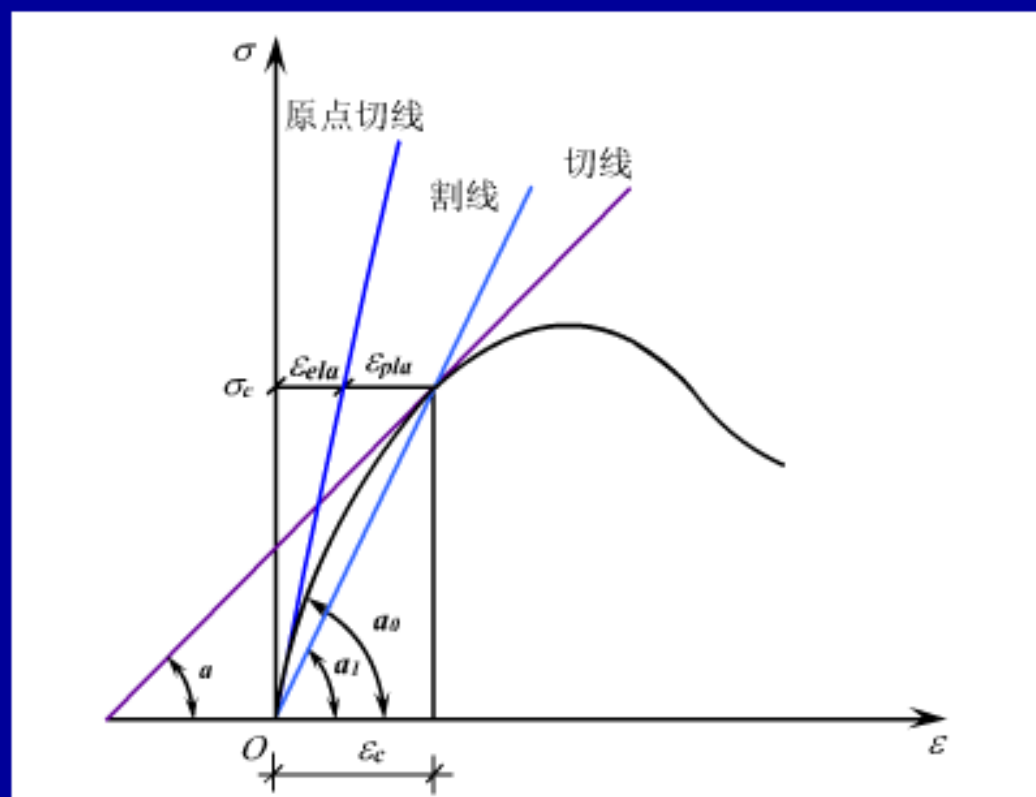


10.8cm 正方形棱柱体配有箍筋的应力-应变曲线

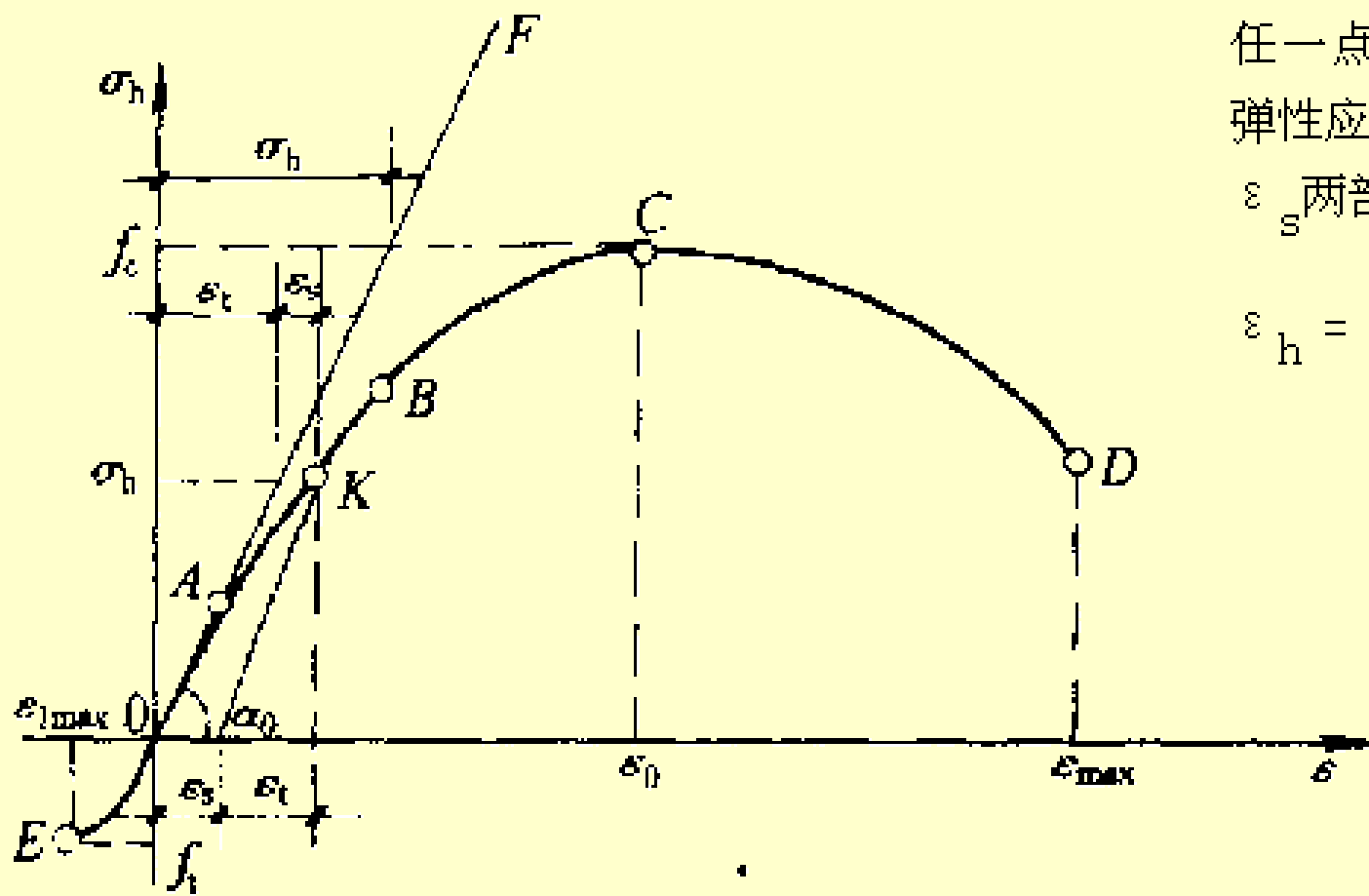
比较上述可以看出：

螺旋箍筋能大幅度提高强度和延性，而方箍主要对提高延性较有效。

(3) 混凝土的模量——单位应变所需的应力，反映材料变形性能的重要参数。



混凝土变形模量的表示方法



任一点K处的应变 ε_h 由
弹性应变 ε_t 和塑性应变
 ε_s 两部分组成：

$$\varepsilon_h = \varepsilon_t + \varepsilon_s$$

(i) 弹性模量 E_C (原点模量)

$$E_C = \frac{d\delta}{d\varepsilon} \Big|_{\varepsilon=0} = \operatorname{tg}\alpha_0 = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_{ela}}$$

规范公式

$$E_C = \frac{10^2}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}}} \left(\frac{\text{KN}}{\text{mm}^2} \right)$$

(ii) 变形模量 E_C' (割线模量)

$$E_C' = \operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_{ela}} \cdot \frac{\varepsilon_{ela}}{\varepsilon_c} = E_C \cdot \nu$$

弹性特征系数 <1

(iii) 切线模量 E_c''

$$E_c'' = \operatorname{tg} \alpha = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} / \varepsilon_c$$

结论:

① $E_c = E_c' = E_c''$

② E_c', E_c'' 都与相应的 σ_c 有关, 故 E_c 是反映材性基本指标

(3) 剪切模量 G_c

$$G_c = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{E_c}{2(1+\mu)}$$

混凝土泊松比规范取 0.2, 故 $G_c = 0.4E_c$

试验方法:

采用标准棱柱体试件 (150mm×150mm×300mm), 先加载至 $\sigma = 0.5f_c$, 然后卸载至零。再重复加荷卸荷5~10次, 使应力应变曲线渐趋稳定并基本上接近直线, 该直线的斜率即为混凝土的弹性模量。

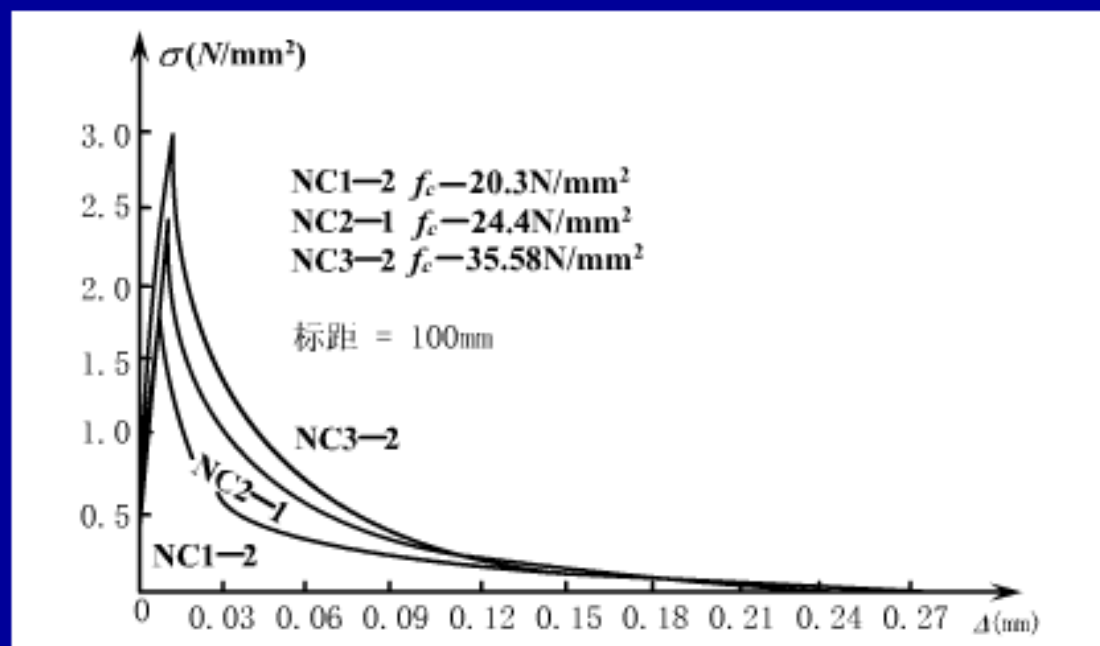
计算弹性模量的经验公式为

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.74}{f_{cu,k}}}$$

上式中, $f_{cu,k}$ 和 E_c 均以 N/mm^2 计。

(4) 混凝土的受拉变形

(i) 试验曲线



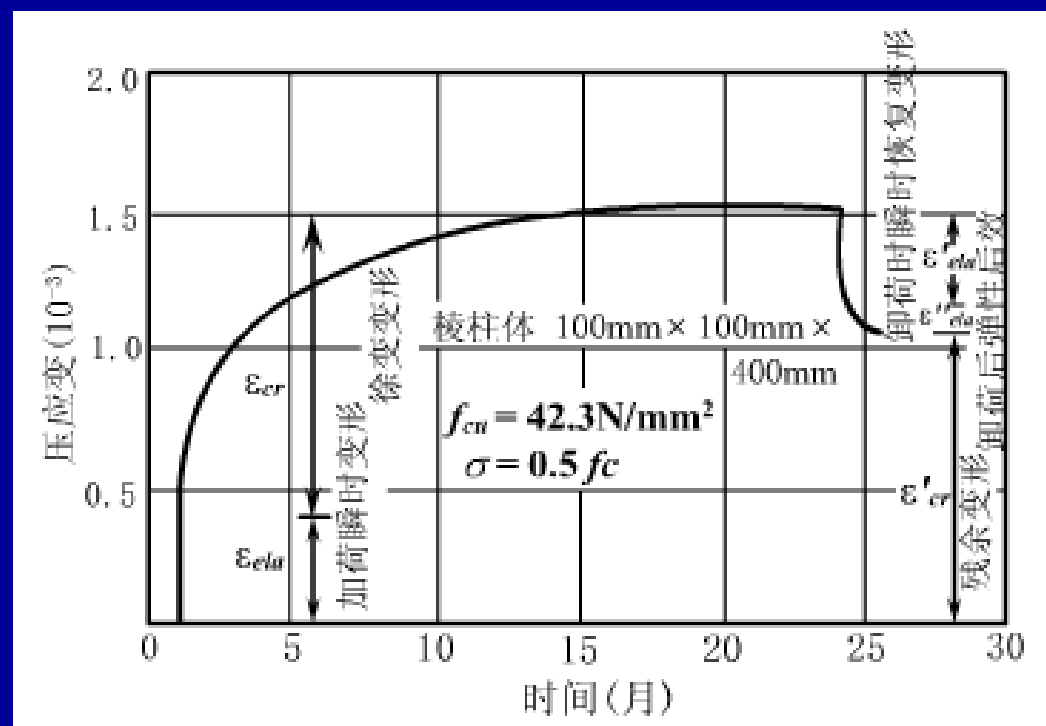
不同强度的混凝土拉伸应力-应变曲线

结论:

- ① 上升段与受压时相似，受拉弹性模量与受压相同，即 E_c
- ② 下降段很陡，陡度随强度增大而加大
- ③ 混凝土断裂的极限拉应变 ϵ_{tu} 在 $(0.5 \sim 2.7) \times 10^{-4}$ 范围波动

(5) 荷载长期作用下的混凝土变形性质——徐变变形
混凝土在长期作用下产生随时增长的应变现象称为混凝土的徐变，它是混凝土固有的特性。

(i) 典型徐变曲线



混凝土的徐变（应力与时间的关系）

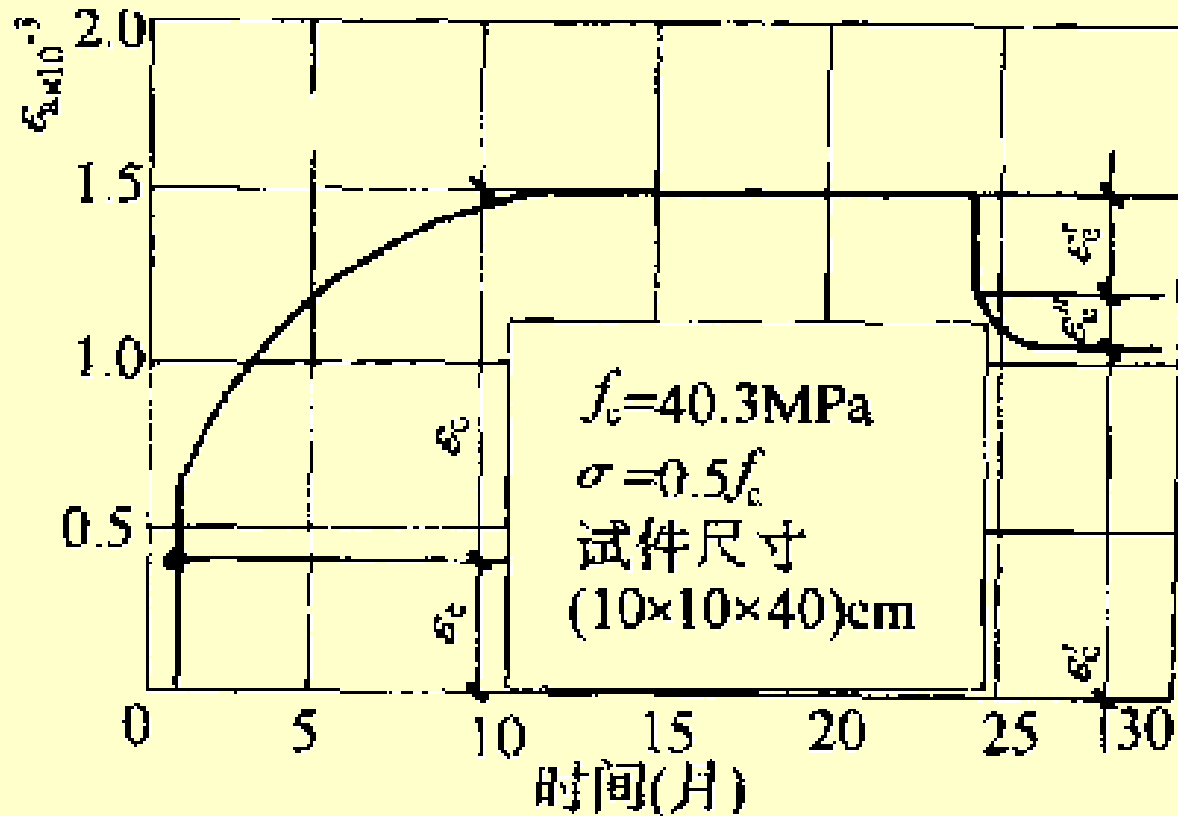
基本符号含义：

ϵ_{ela} ——加载时瞬时变形； ϵ_{cr} ——徐变变形；

ϵ'_{ela} ——卸载时瞬时恢复变形； ϵ'_{ela} ——卸载后弹性后效

ϵ_{cr} ——残余变形； $\epsilon_{cr}(t = \infty)$ ——最终徐变变形

持续荷载试验:



ϵ_e : 瞬时应变
 ϵ_c : 徐变应变
 ϵ_e' : 瞬时恢复应变 ($< \epsilon_e$)
 ϵ_e'' : 弹性后效 (徐变恢复变形)
 ϵ_c' : 残余应变

徐变: 在常应力作用下随时间而发展的变形。

原因: (1) 粘性流动;
(2) 微裂缝的发展

。应力较小时以第一种原因为主; 应力较大时以第二种原因为主。

(ii) 徐变的特点

①徐变发展由快到慢，在最初六月内完成70%~80% $\varepsilon_{cr}(t=\infty)$ ，最终完成要几年时间。

② $\varphi_{cr} = \frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{ela}}$ 称为徐变系数，

$$\varphi_{cr}(t=\infty) = \frac{\varepsilon_{cr}(t=\infty)}{\varepsilon_{ela}} = 2 \sim 4$$

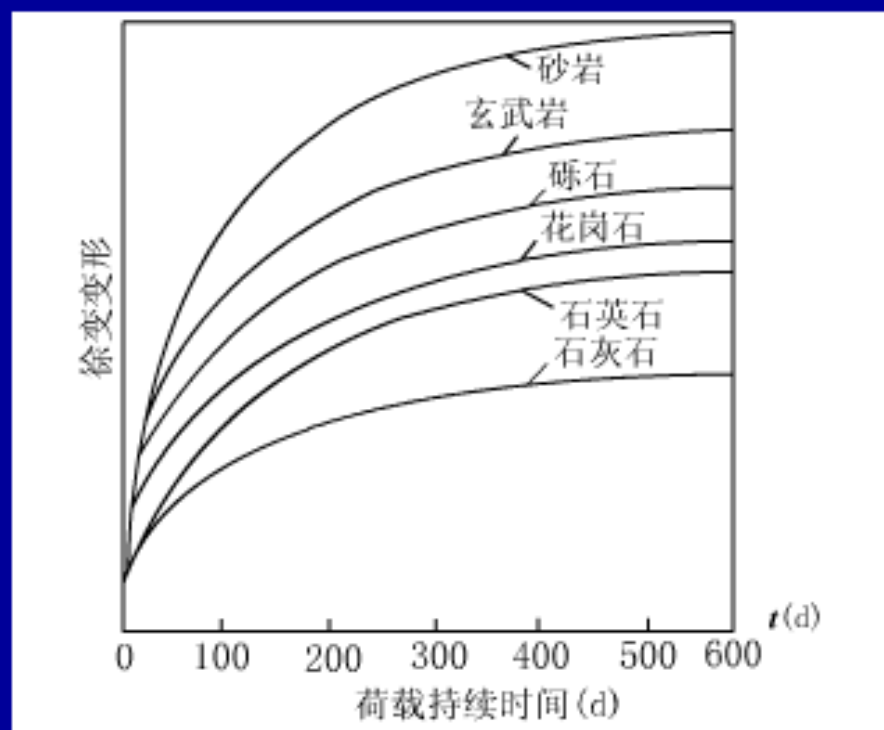
③移去荷载，会保留一部分残余应变 ε'_{cr}

(iii) 徐变的机理

混凝土中水泥胶体，在荷载作用下产生粘性流动，并将压力转嫁给骨料颗粒，另外，在较高压力作用下会产生微裂缝也是原因。

(iii) 影响徐变的因素

① 内在因素——混凝土的组成和配比



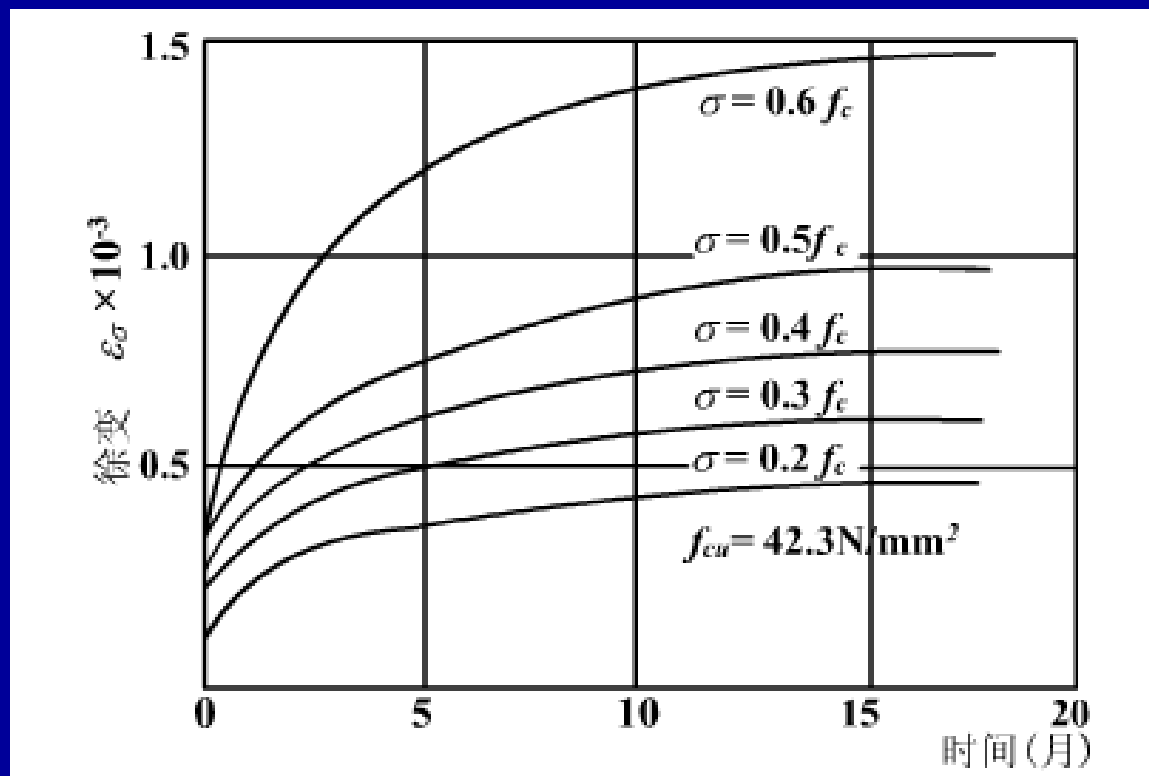
骨料对徐变的影响

骨料的弹性模量越大，体积比越大，徐变越小，水灰比越小，徐变越小。

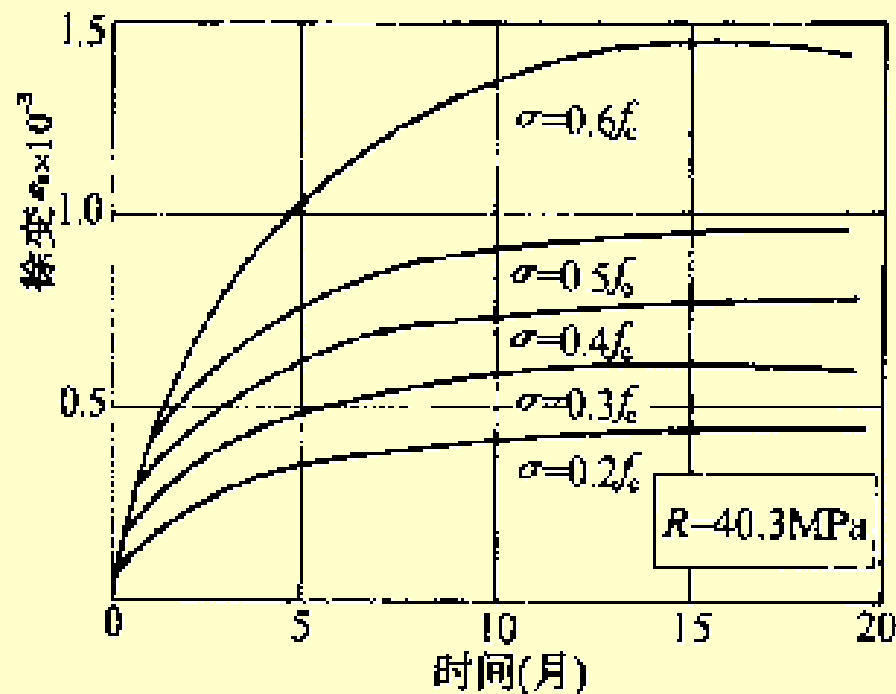
②环境影响因素——包括养护和使用条件

受荷前养护的温湿度越高，徐变越小，蒸气养护可减少徐变，受荷后构件所处的环境温度越高，相对湿度越小，徐变越大。

③应力条件——包括初应力水平 $\frac{\sigma_{ci}}{f_c}$ 和加荷时混凝土的龄期 t 。



压应力与徐变的关系



压应力与徐变的关系

线性徐变与非线性徐变:

当应力较小时 ($\sigma < 0.5f_c$), 徐变变形与应力成正比, 称为线性徐变。

当应力较大时 ($\sigma > 0.5f_c$), 徐变变形的增长比应力的增长更快, 称为非线性徐变。

在非线性徐变的范围内, 当加荷应力过高时, 徐变变形急剧增加, 徐变——时间曲线不收敛, 呈现非稳定徐变现象, 最后导致混凝土的破坏, 称为徐变破坏。

所以, 经常处于不变高应力状态的混凝土是不安全的, 故取 $0.75 \sim 0.80f_c$ 为混凝土的长期极限强度。

结论:

- (i) 应力越大, 徐变越大
- (ii) 应力小于 $0.5 f_c$ 时, 为线性徐变, 大于 $0.5 f_c$ 时, 徐变变形比应力增长要快, 称为非线性徐变, 当大于 $0.8 f_c$ 时, 徐变变形将不收敛, 呈非稳定徐变, 所以混凝土长期极限强度 $0.8 f_c$ 。
- (iii) 加荷龄期愈长, 徐变愈小。

④减少徐变的措施

- (i) 加强养护
- (ii) 降低水灰比
- (iii) 减少水泥用量
- (iv) 加强震捣
- (v) 避免过早承载

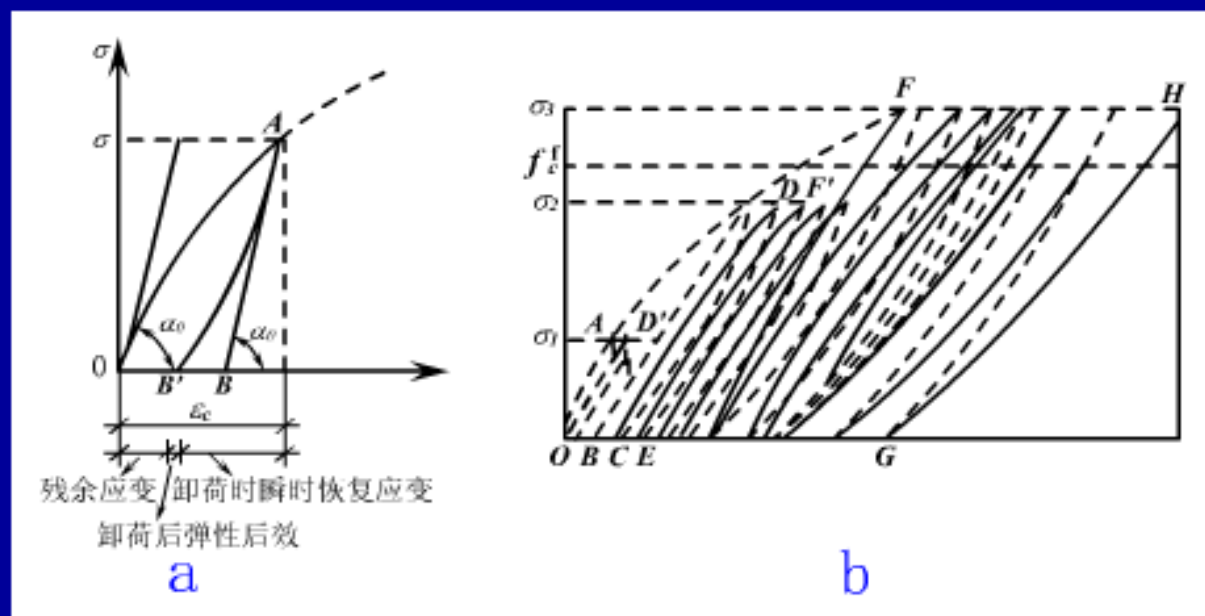
徐变的不利作用：

(1) 使构件变形增加，引起应力重分布。（后者有时也起有利作用。

(2) 引起预应力损失。

(iiii) 混凝土在荷载重复作用下的变形 (疲劳变形)
混凝土结构在重复荷载作用下会发生疲劳破坏, 它具有突然性, 是脆性破坏。

①多次重复荷载作用下的应力-应变曲线。



结论:

(i) $\sigma_c \leq 0.5f_c$, 在若干次重复加载后, 应力应变曲线呈直线, 以后重复加大, 按弹性体工作, 不发生破坏 (几百万次以上)。

(ii) $\sigma_c > 0.5f_c$, 在若干次重复加载后, 应力应变曲线是直线, 但再重复加大, 应力应变曲线反向, 偏向于应变轴, 继续重复, 导致破坏。

②混凝土疲劳强度

棱柱体试件承受200万次或以上循环荷载而发生破坏的压应力值定义为混凝土的疲劳抗压强度。在相同重复次数下, 混凝土疲劳强度随疲劳应力比值的增大而提高。

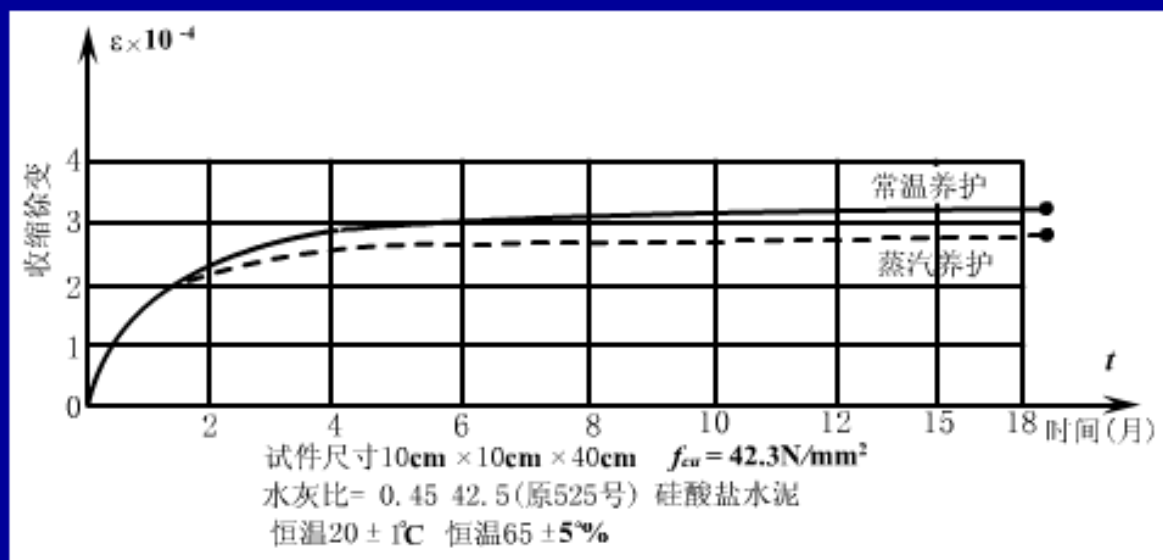
$$\text{疲劳应力比值 } \rho_c^f = \frac{\sigma_{c,\min}^f}{\sigma_{c,\max}^f}$$

2. 体积变形——与受荷无关

1) 混凝土的收缩与膨胀

(1) **定义：**混凝土在空气中结硬，体积缩小的现象称为混凝土的收缩。混凝土在水中结硬，体积扩大的现象称为混凝土的膨胀。混凝土收缩值一般大于膨胀值，另外混凝土膨胀通常是有利的，故不考虑。

(2) 典型收缩曲线



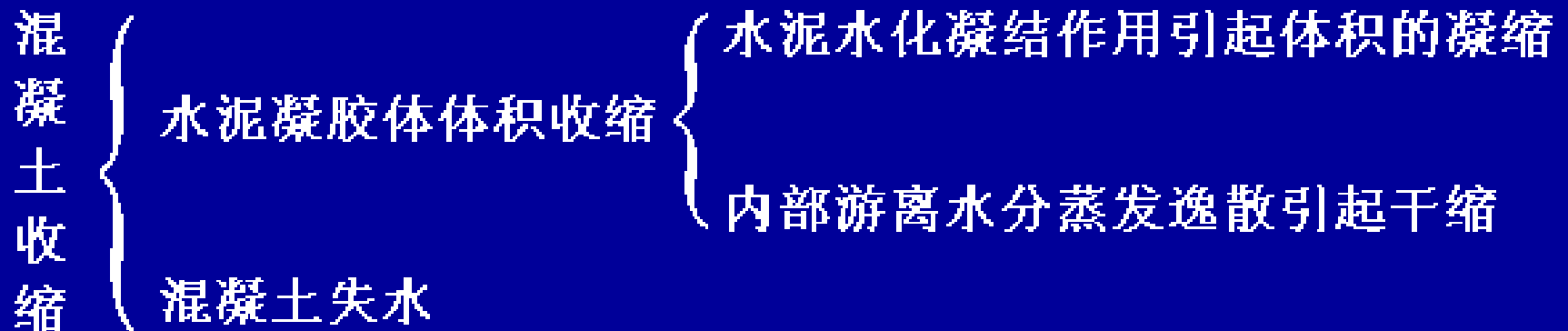
混凝土的收缩

结论:

(i) 先快后慢。

(ii) 最终收缩值约为 $(2 \sim 5) \times 10^{-4}$ ，完成时间二年以上。

(3) 收缩机理



(4) 影响因素

(i) 干缩因素

水灰比大，收缩大；

养护好，收缩小；

体表比小，收缩大；

湿度小，温度高，收缩大。

(ii) 凝缩因素

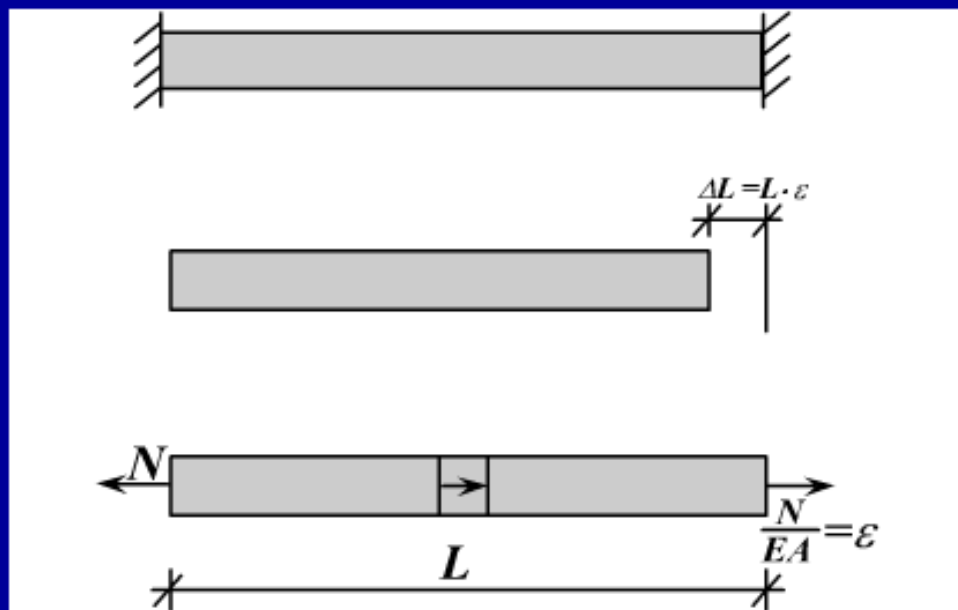
水泥用量多，强度高，收缩大；骨料级配好，弹性模量大，收缩小。

2) 混凝土的温度变形

在温度变化时混凝土也会发生体积变形，根据温度线膨胀系数

$\alpha = 1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5} / ^\circ C$ ，可将上述最终收缩应变值 $(2 \sim 5) \times 10^{-4}$ 折算为温差为 $20 \sim 30^\circ C$ 的体积变化。

在混凝土受到约束条件时（若配筋）将会在混凝土及钢筋中产生附加的“温度应力”或“收缩应力”。



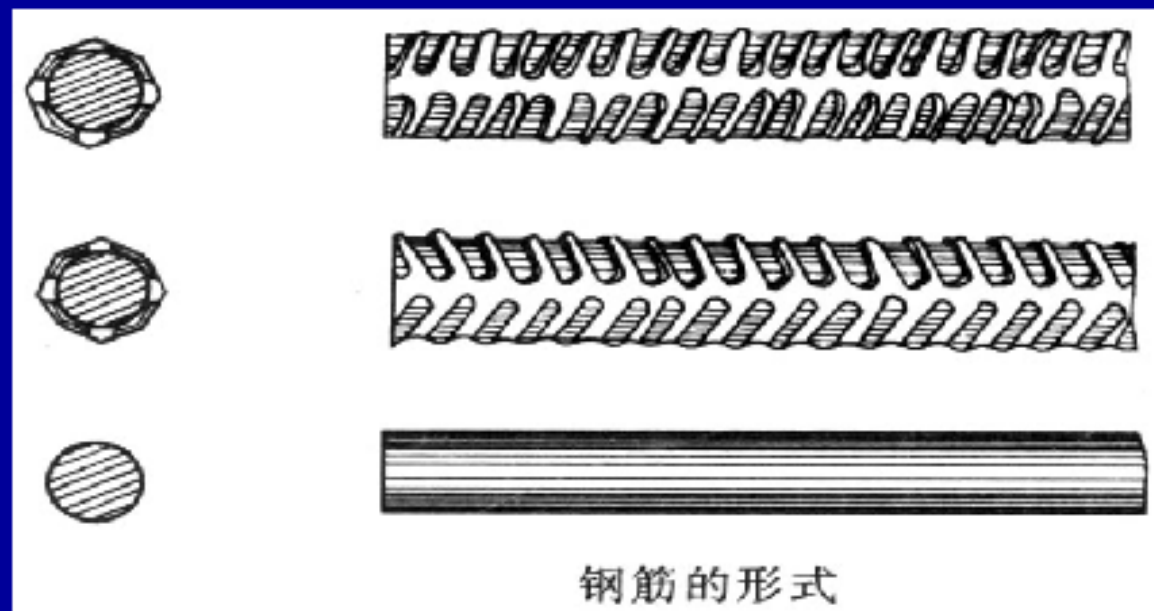
2.2 钢筋的物理力学性能

- 2.2.1 钢筋的品种和级别
- 2.2.2 钢筋的强度及变形
- 2.2.3 应力——应变曲线的数常模型
- 2.2.4 钢筋的疲劳
- 2.2.5 混凝土结构对钢筋性能要求

2.2.1 钢筋的品种和级别

1. 品种

按形式分为光圆钢筋，变形钢筋，钢绞线，钢丝等。



按化学成份分为碳素钢及普通低合金钢。

按制作工艺分为热轧钢筋，热处理钢筋，冷加工钢筋，钢丝。

热轧钢筋，冷拉钢筋——具有明显流限的钢筋（软钢）

钢丝，热处理钢筋——无明显流限的钢筋（硬钢）

2. **热轧钢筋**——由低碳钢、普通低合金钢在高温状态下轧制而成，属于普通钢筋。级别分为四级：

HPB235 (I级, 符号 ϕ , 标准抗拉强度 235 N/mm^2)

HRB335 (II级, 符号 ϕ , 标准抗拉强度 335 N/mm^2)

HRB400 (III级, 符号 ϕ , 标准抗拉强度 400 N/mm^2)

RRB400 (IV级, 符号 ϕ^R , 标准抗拉强度 400 N/mm^2 , 余热处理)

3. 冷加工钢筋

由热轧钢筋或盘条经冷拉、冷拨、冷轧、冷轧扭加工后而成，目的是提高钢筋的强度，冷加工主要为冷拉和冷拨。

①冷拉工艺

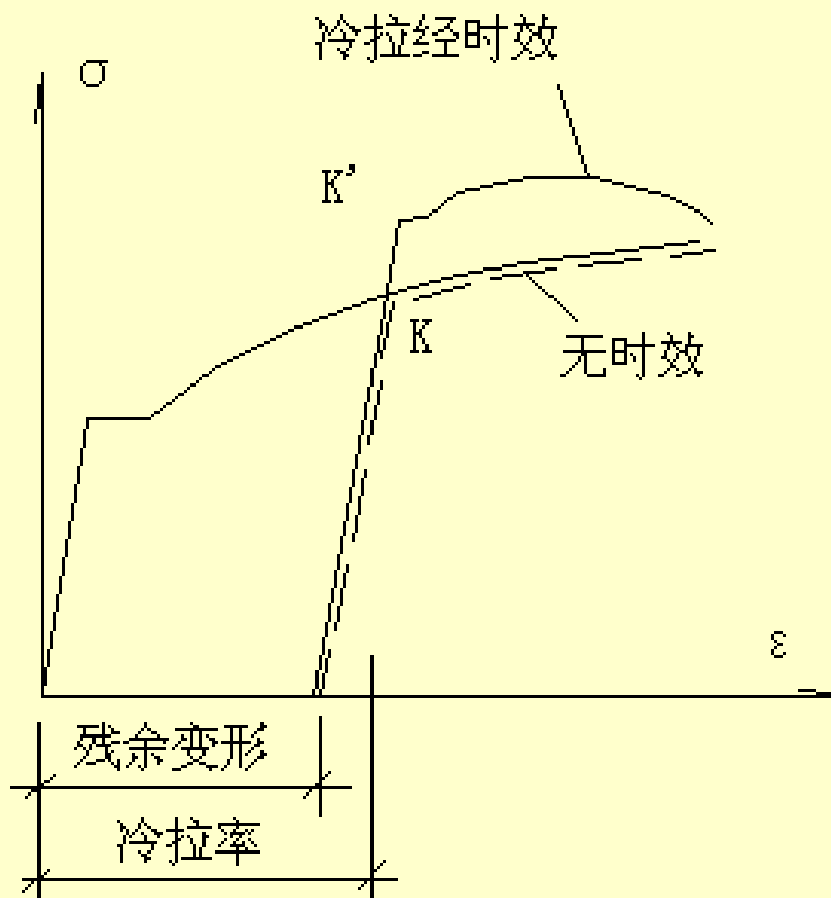
将热轧钢筋先冷拉，应力超过屈服点后卸荷，过一段时间后其屈服点比原来有提高，即发生冷拉时效硬化。

冷拉只提高抗拉强度，但延性差，而且脆断。

②冷拨

将热轧钢筋用外力强行拨过比本身直径小的硬质合金拨线模，迫使钢筋截面及直径减小，长度增加，由于内部组织发生改变，提高了其强度，降低延性。

应指出，冷加工钢筋的使用按专门规程。



冷拉：将钢筋拉到K点，然后卸载到零。K点应力称为冷拉控制应力。

时效硬化在常温时需20天；在100度下仅需2小时；再提高温度则强度会降低。

故应先焊接，后冷拉。

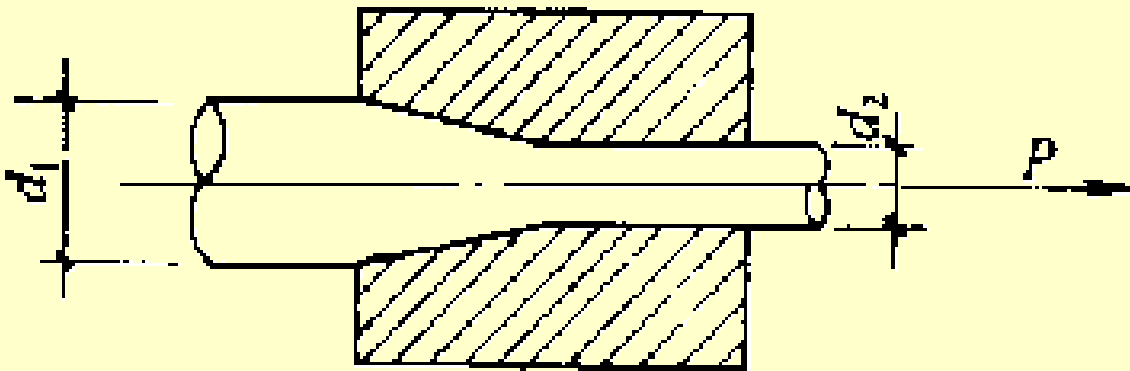
冷拉的控制：单控：仅控制冷拉应力或冷拉率；双控：同时控制二者。

冷拉仅提高抗拉强度。

冷拔：把钢筋（一般是6）强力拔过比其直径小的硬质合金拔丝模（若干次）。

钢筋受到纵向拉力和横向挤压，使强度提高，塑性降低。

冷拔可同时提高抗拉及抗压强度。



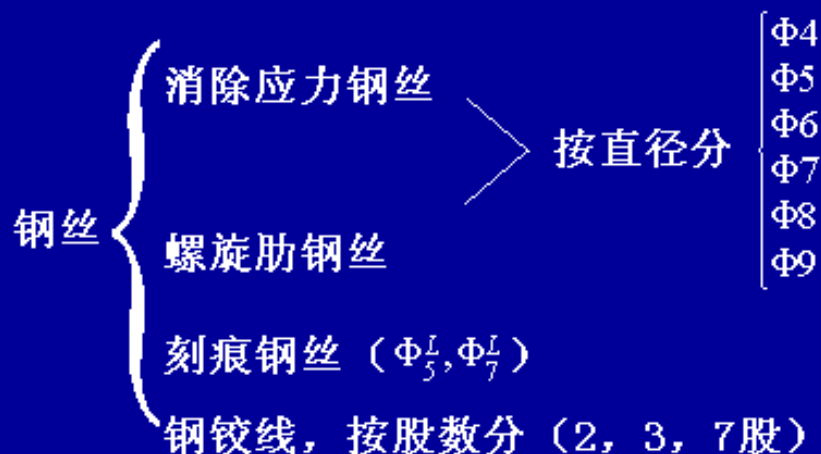
4. **热处理钢筋**——由热轧钢筋通过加热、淬水和回火等调质工艺处理的钢筋，属于预应力钢筋。

经热处理后，钢筋强度提高，延性降低不多。

分级： $40S_{i2}M_n$ ， $48S_{i2}M_n$ ， $45S_{i2}C_r$ 。

5. **钢丝**——预应力钢筋

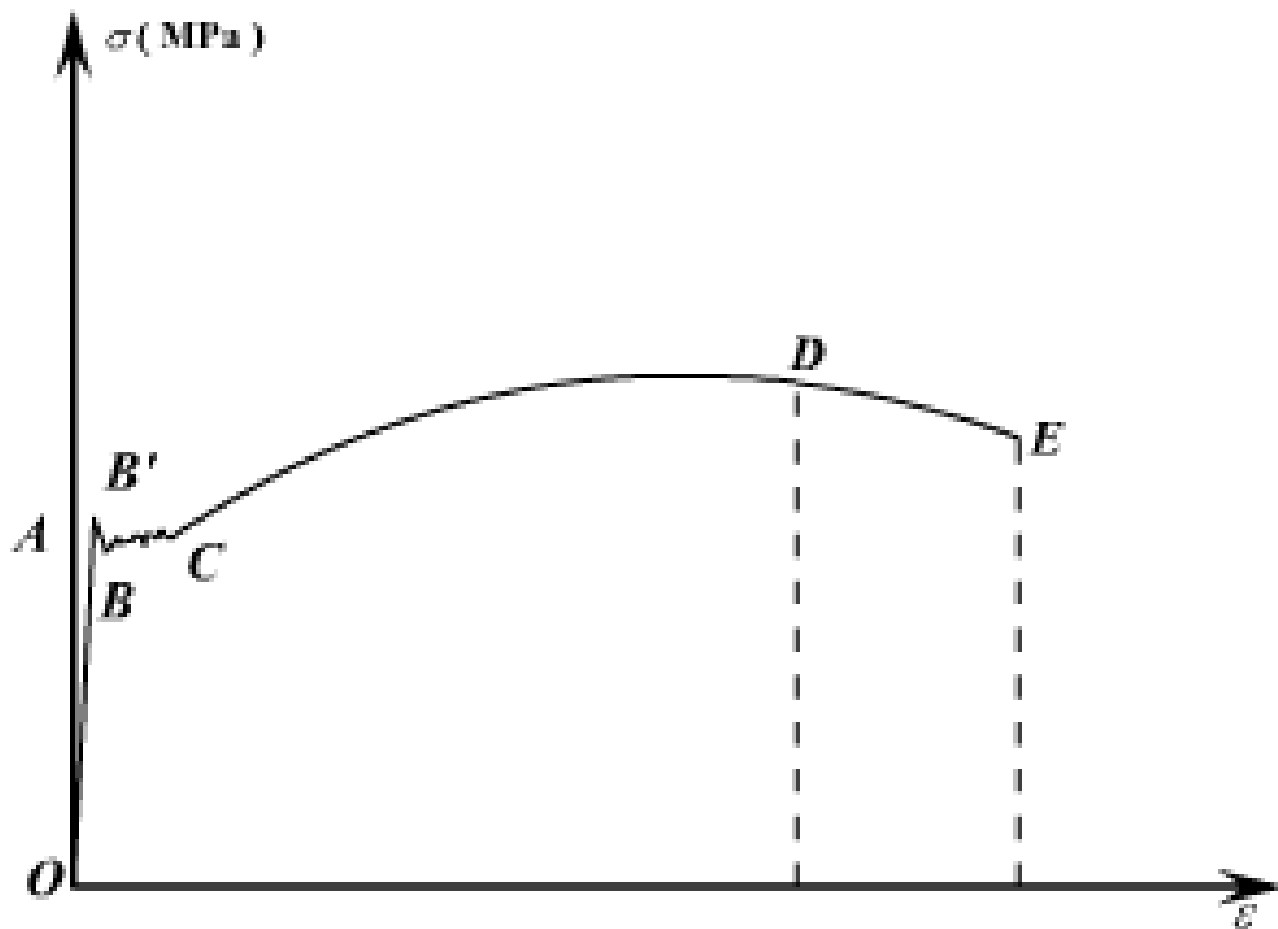
强度高，直径细



2.2.2 钢筋的强度及变形

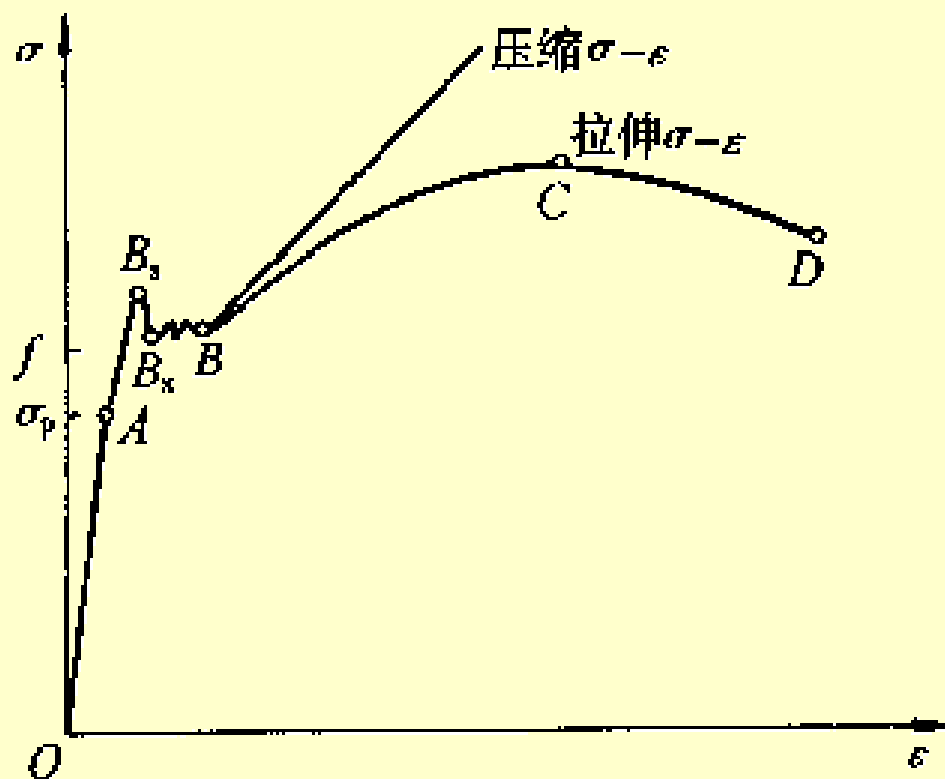
1. 应力应变试验曲线

1) 软钢的应力应变曲线

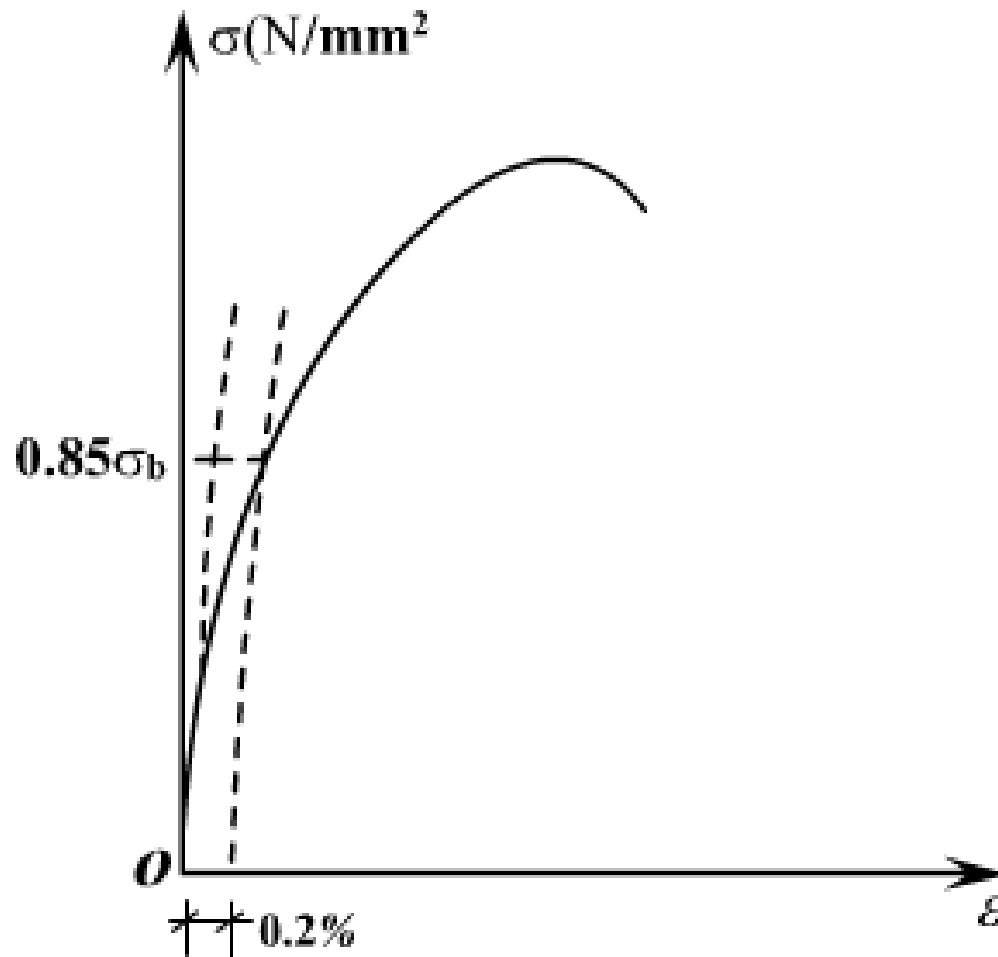


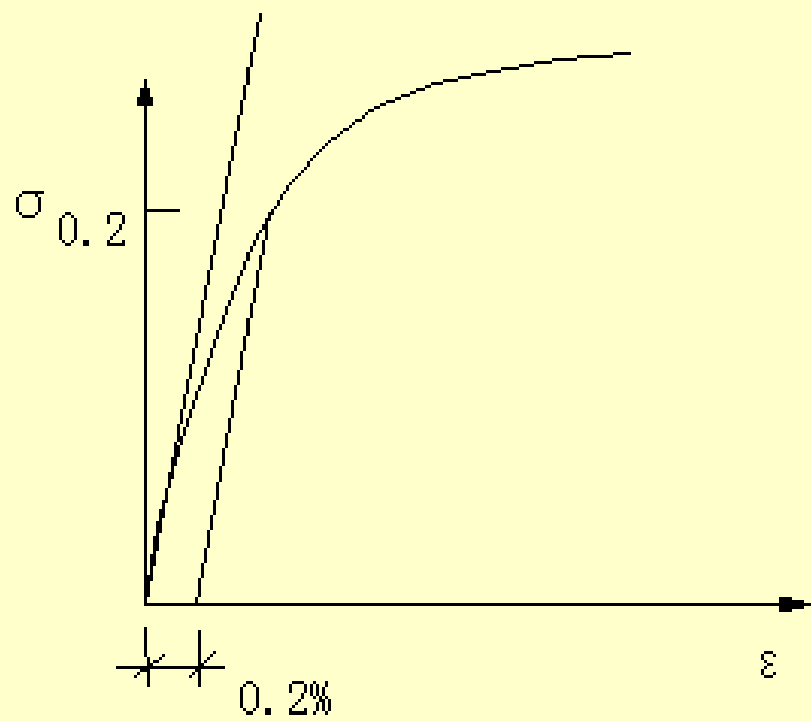
应力应变曲线:

- A: 比例极限
- B_s : 屈服上限
- B_x : 屈服下限 (屈服强度)
- B: 强化起始点
- C: 极限强度
- D: 试件拉断



2) 硬钢的应力应变曲线





对无明显流幅的钢筋则以 $\sigma_{0.2}$ 作为屈服点。

2. 基本力学指标

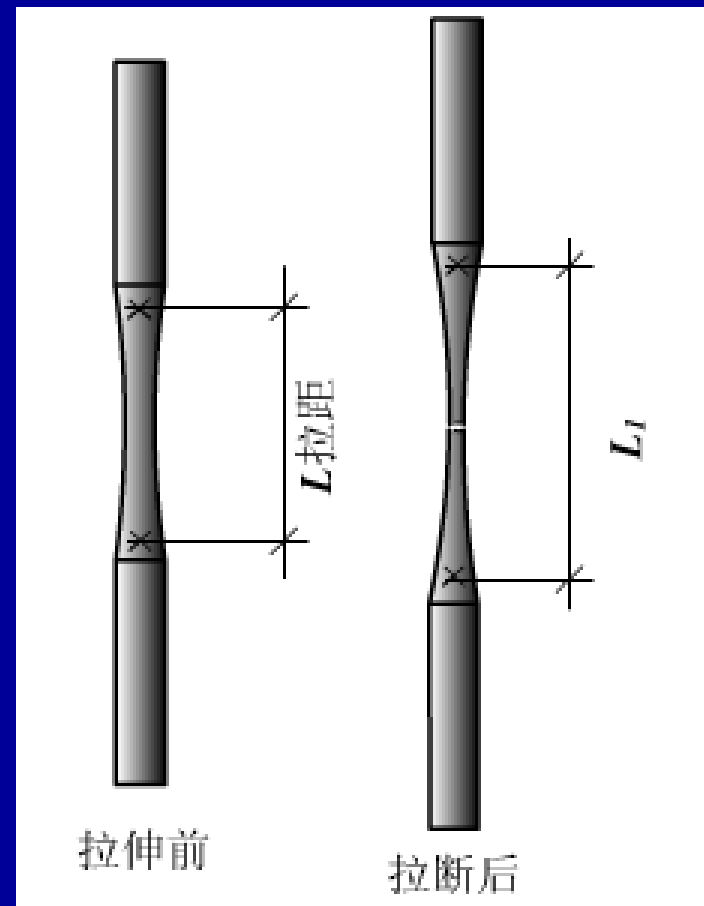
1) 钢筋的强度

设计中采用的是屈服强度（屈服下限点），对于硬钢取条件屈服点，即**0.85**倍的极限强度，强屈比定义为钢筋极限强度与屈服强度之比，反映强度储备度，热轧钢筋为**1.4~1.6**。

2) 塑性性能

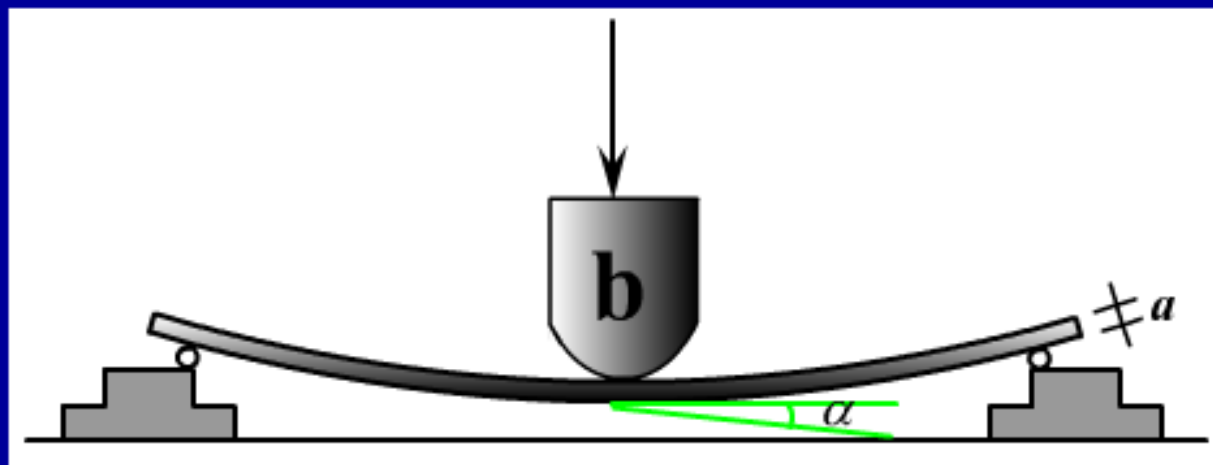
(1) 伸长率 δ_s

钢筋拉断后的伸长量与原长的比率称为伸长率



(2) 冷弯性

当 $\alpha=90^\circ C$ （或 $180^\circ C$ ）后，检查钢筋无裂纹，鳞落或断裂现象表示冷弯性合格，冷弯性反映塑性和内在质量。

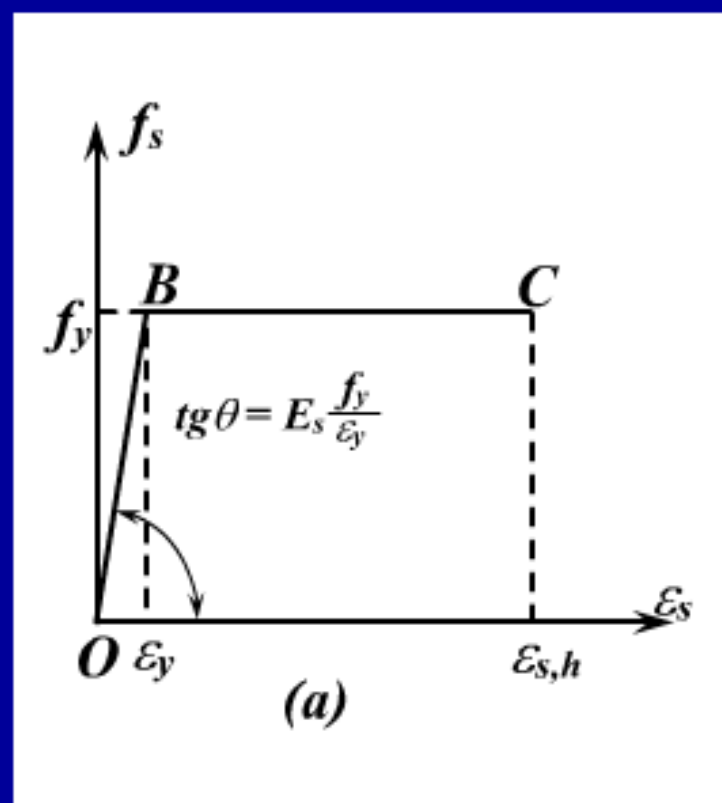


(3) 弹性模量

各种钢筋的 E_s 基本相同，在 $2 \times 10^5 MPa$ 左右。

2.2.3 应力-应变曲线的数学模型

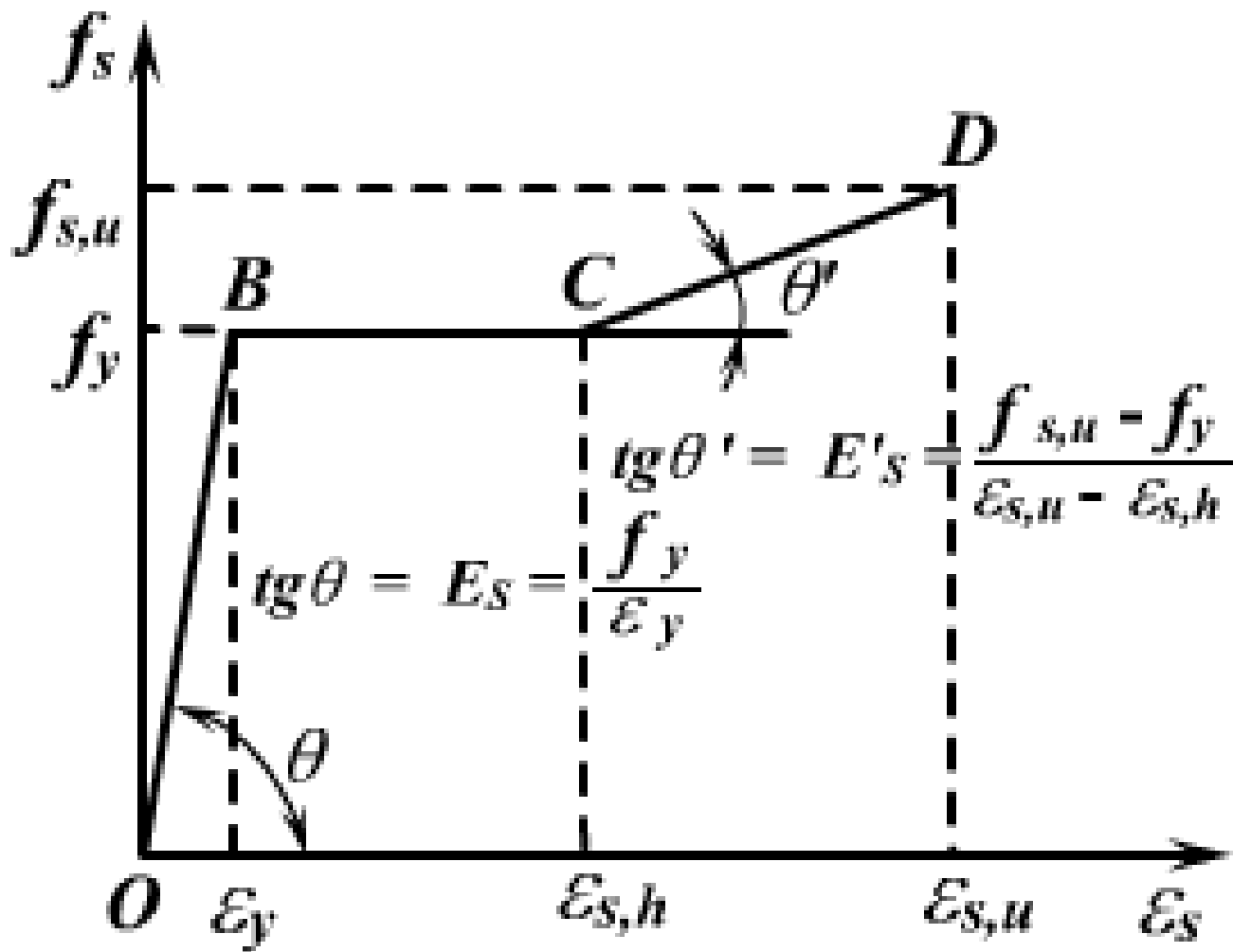
1) 双直线模型——适用于流幅大的软钢



$$\varepsilon_S \leq \varepsilon_Y \quad \sigma_S = E_S \varepsilon_S$$

$$\varepsilon_Y < \varepsilon_S \leq \varepsilon_{S,h} \quad \sigma_S = f_Y$$

2) 三折线模型——适用于流幅小的软钢



$$\varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad \sigma_s = E_s \varepsilon_s$$

$$\varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,h} \quad \sigma_s = f_y$$

$$\varepsilon_{sh} < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,u} \quad \sigma_s = f_y + (\varepsilon_s - \varepsilon_{s,h}) \operatorname{tg} \theta'$$

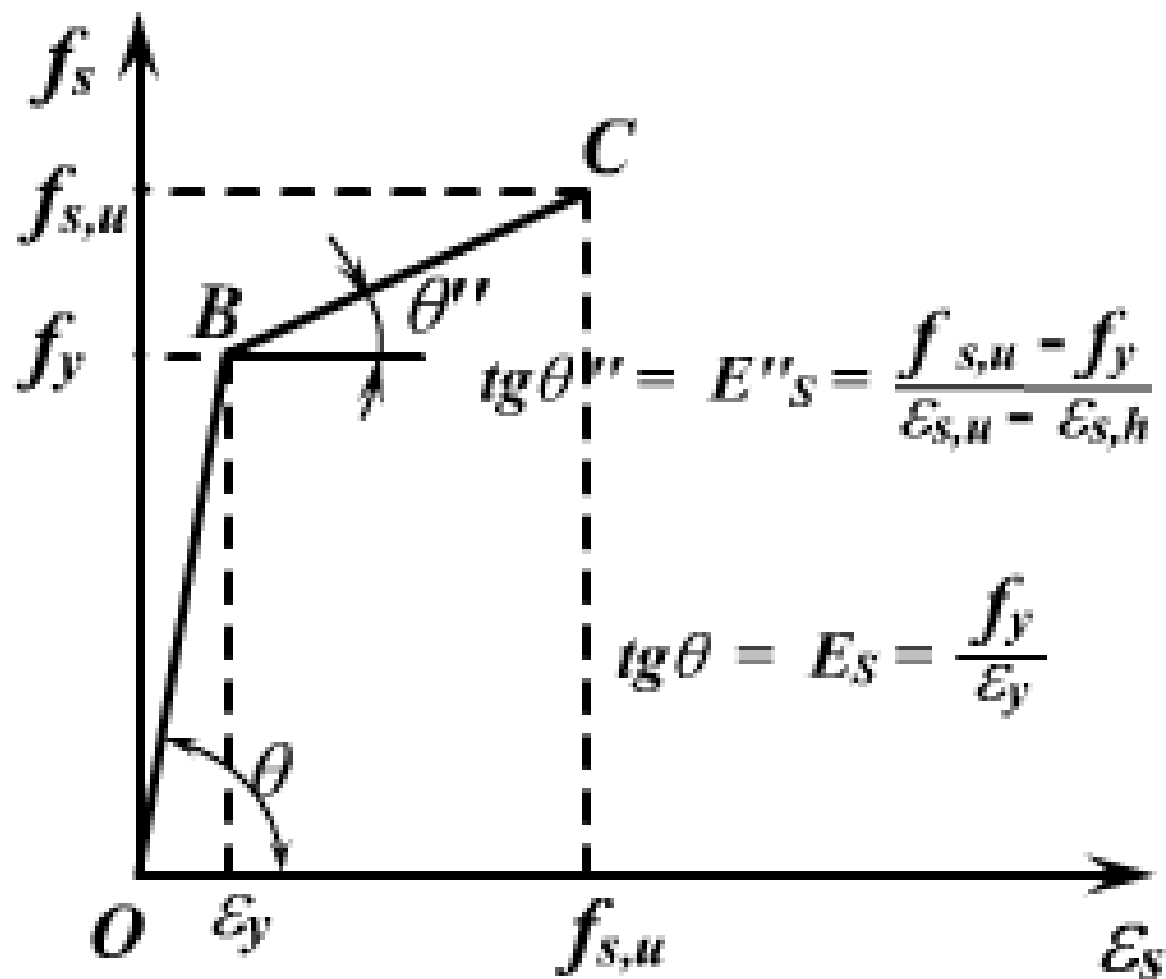
$$\operatorname{tg} \theta' = E_s' = 0.01 E_s$$

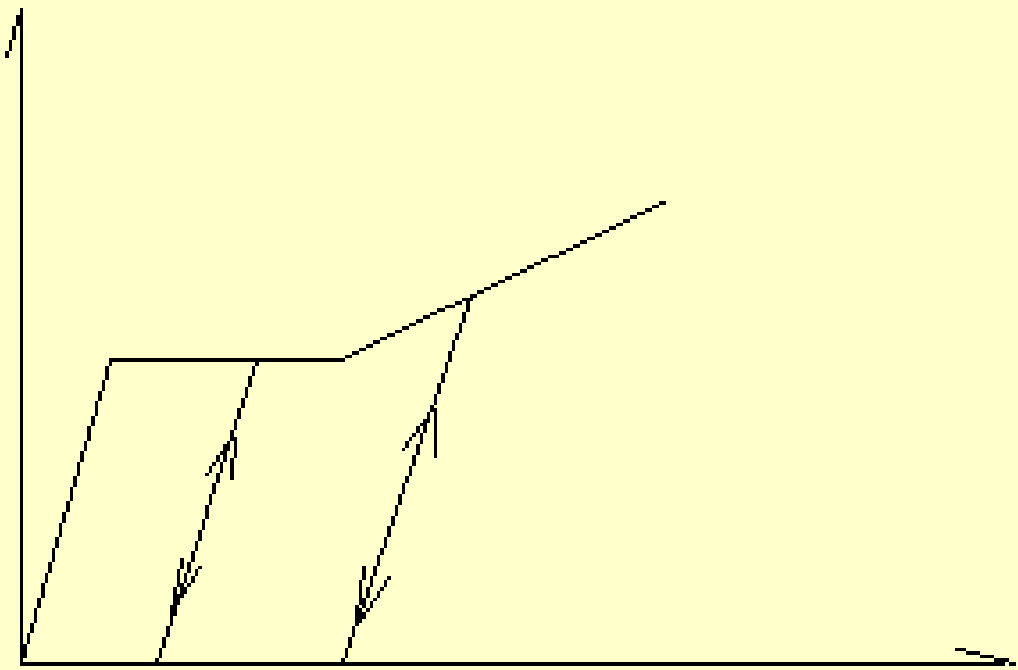
$$\varepsilon_s \leq \varepsilon_y \quad \sigma_s = E_s \varepsilon_s$$

$$\varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,u} \quad \sigma_s = f_y + (\varepsilon_s - \varepsilon_y) \operatorname{tg} \theta''$$

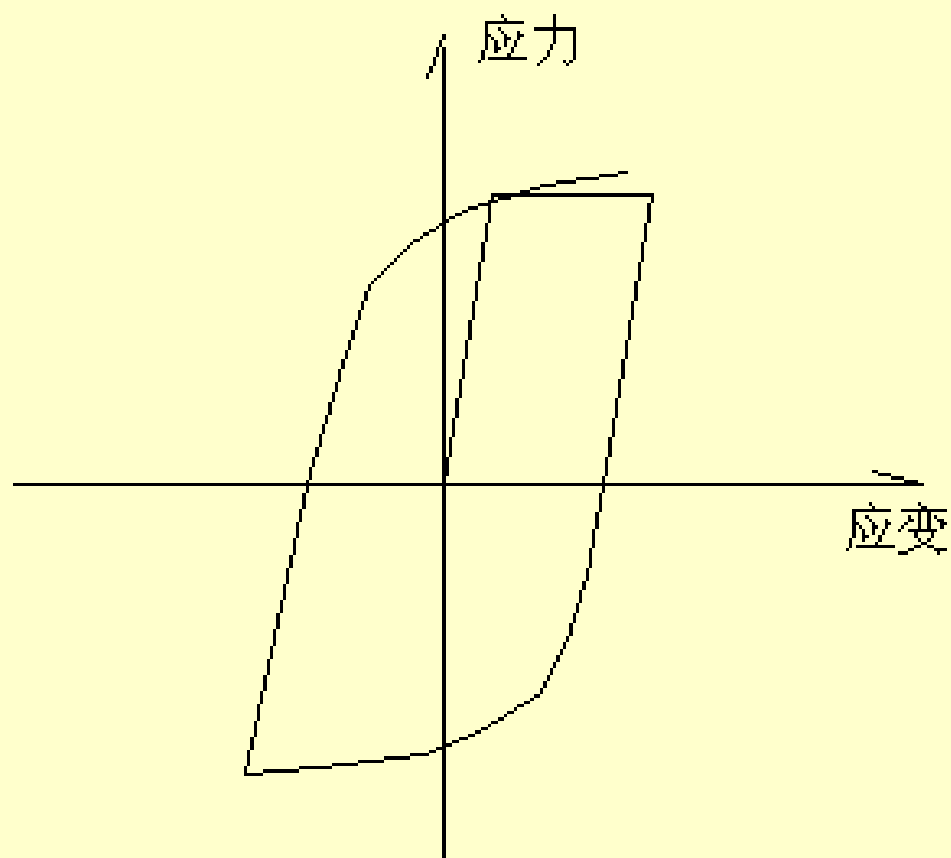
$$\operatorname{tg} \theta'' = E_s'' = \frac{f_{s,u} - f_y}{\varepsilon_{s,u} - \varepsilon_y}$$

3) 双斜线模式——适用于硬钢





重复加载。



包兴格效应：正向加载屈服后，反向加载时屈服强度降低且屈服点不明显的现象。

2.2.4 钢筋的疲劳——在重复循环荷载作用下，在一定次数后，突然脆断现象

1) 疲劳断裂的原因：钢筋内部或外表面的缺陷在外力作用下引起了应力集中，钢筋中超负载的弱晶粒发生滑移，产生疲劳裂纹最后引起断裂。

2) 钢筋疲劳强度：——在某一规定应力幅度内，经受一定次数（ ≥ 200 万次），循环荷载后，发生疲劳破坏的最大应力值，疲劳强度总低于在静荷载下的极限强度。

3) 疲劳试验：单根钢筋试验，结构试验。

4) 钢筋疲劳强度的影响因素

(1) 应力中变化幅值

$$\Delta\sigma^f = \sigma_{\max}^f - \sigma_{\min}^f \leq \Delta f_Y^f \left(\Delta f_{PY}^f \right)$$

限值 $\Delta f_Y^f \left(\Delta f_{PY}^f \right)$ 同 $P_{PS}^f = \frac{\sigma_{S_1 \min}^f}{\sigma_{S_1 \max}^f}$ 有关, 对于预应力钢筋, $P_P^f \geq 0.9$ 可不

进行疲劳强度验算。

(2) 其它因素:

最小应力值, 外表面几何形状, 直径、等级以及使用环境和加载频率。

2.2.5 混凝土结构对钢筋性能要求

1. 钢筋的强度要求较高；
2. 良好的塑性性能；
3. 可焊性好；
4. 耐火性要好；
5. 良好的粘结性。

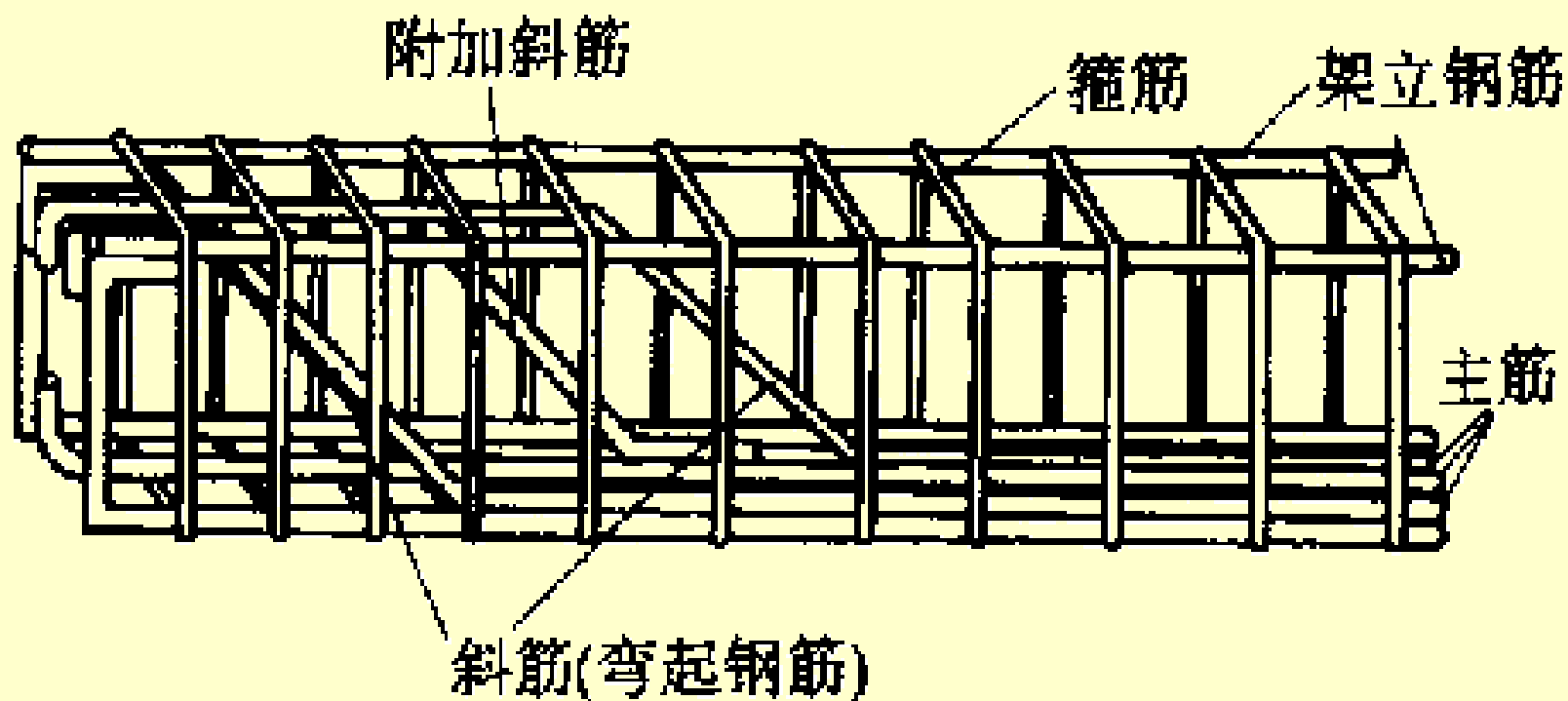
钢筋的成型

钢筋应构成空间受力骨架。

绑扎骨架

焊接骨架

綁扎骨架



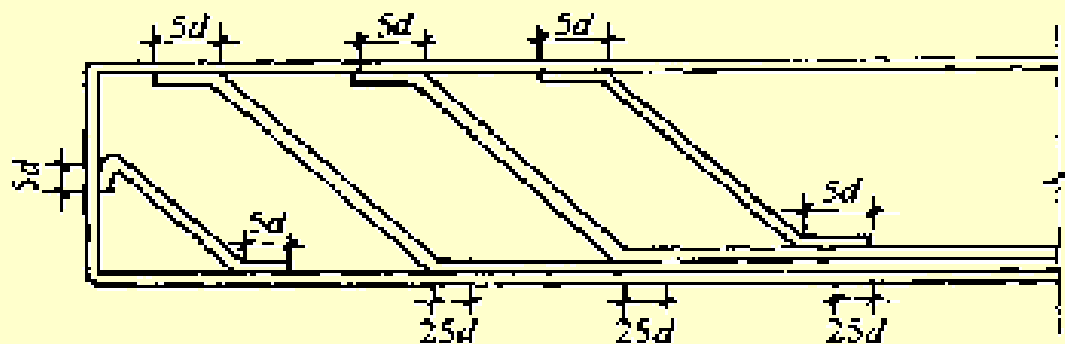
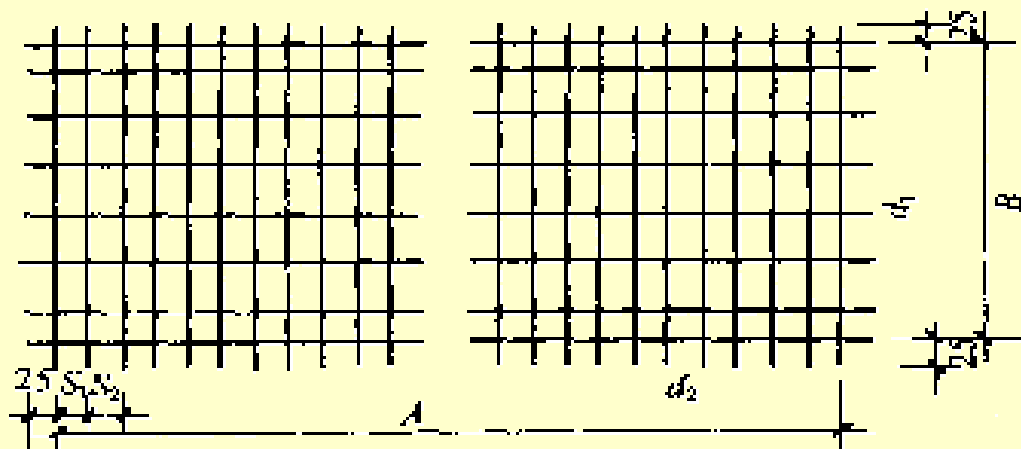


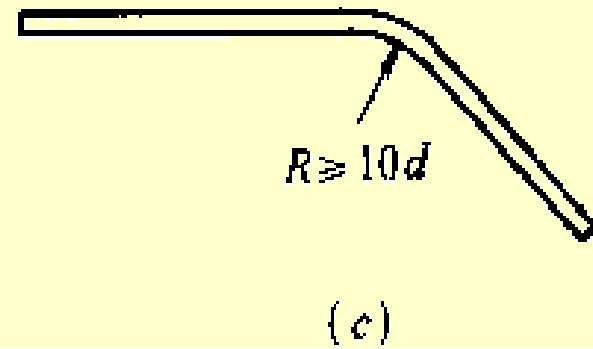
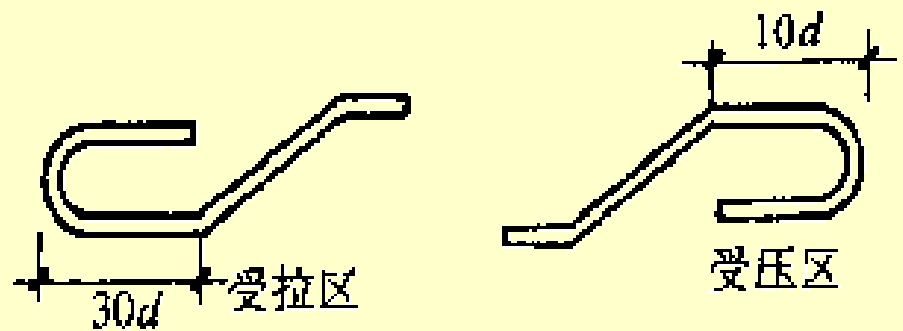
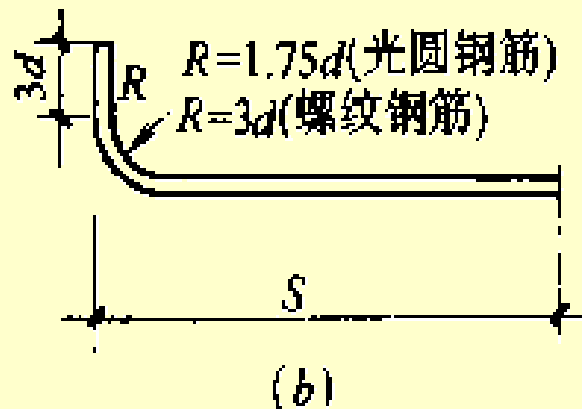
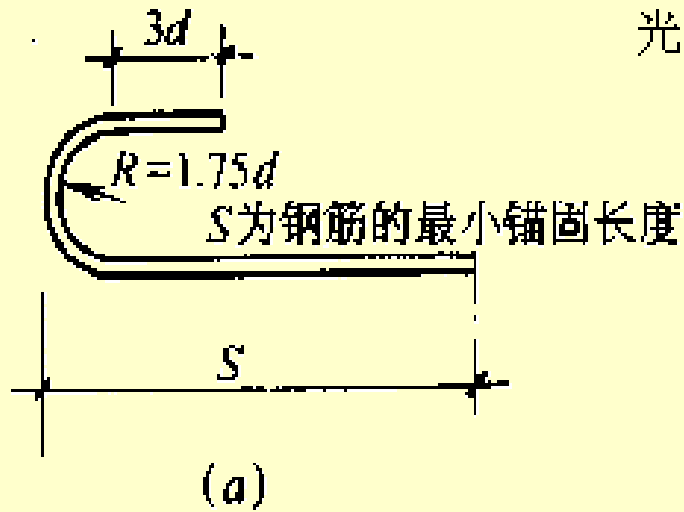
图 2-26 钢筋焊接骨架

焊接骨架。

特点：避免设弯钩，省工省料，适合工业化批量生产，减少现场钢筋工作量。



光圆钢筋的弯钩



2.3 混凝土与钢筋的粘结

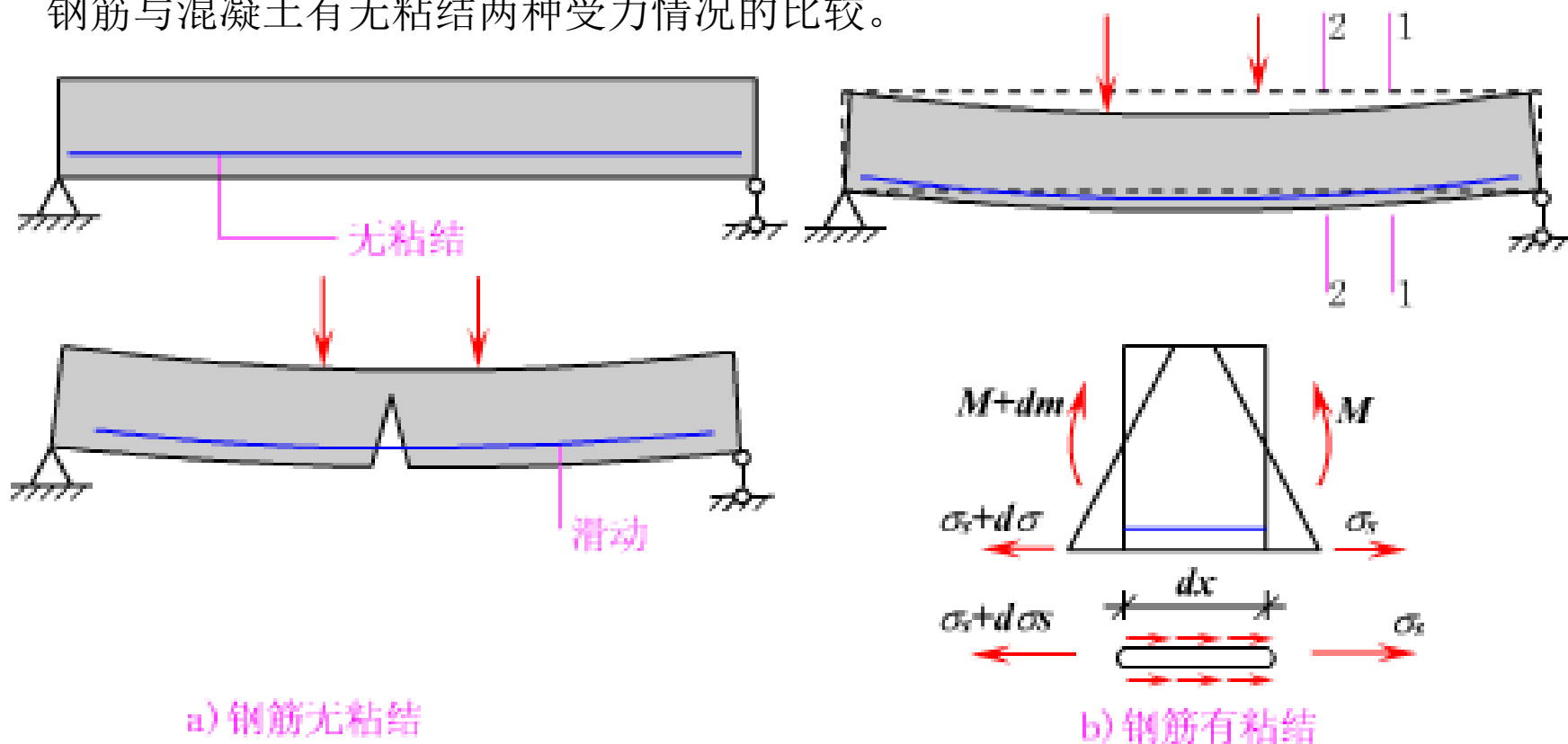
- 2.3.1 粘结的作用
- 2.3.2 粘结力的组成和作用机理
- 2.3.3 粘结强度
- 2.3.4 保证钢筋和混凝土粘结力的措施
- 2.3.5 钢筋的锚固与搭接

2.3.1 粘结的作用

钢筋与混凝土之间的粘结力是保证两者共同工作的基础。

粘结应力定义：钢筋与混凝土在交界面上的剪应力

钢筋与混凝土有无粘结两种受力情况的比较。

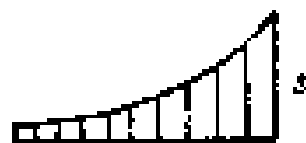
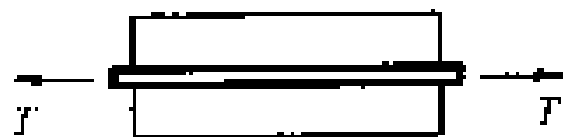
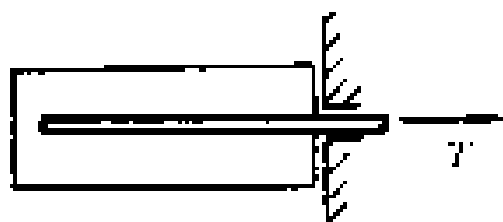


由隔离体平衡得

$$\tau_b \cdot \pi d \cdot dx = d\sigma_s \frac{1}{4} \pi d^2 \quad \therefore \tau_b = \frac{d}{4} \cdot \frac{d\sigma_s}{dX}$$

锚固粘结

裂缝间粘结



(a)

(b)

钢筋应力

混凝土应力

粘结剪应力

滑移

2.3.2 粘结力的组成和作用机理

粘结力 { 钢筋与混凝土交界面上收缩产生摩阻力
钢筋与混凝土交界面上化学吸附作用力（胶结力）
钢筋表面凹凸不平与混凝土之间的机械咬合力

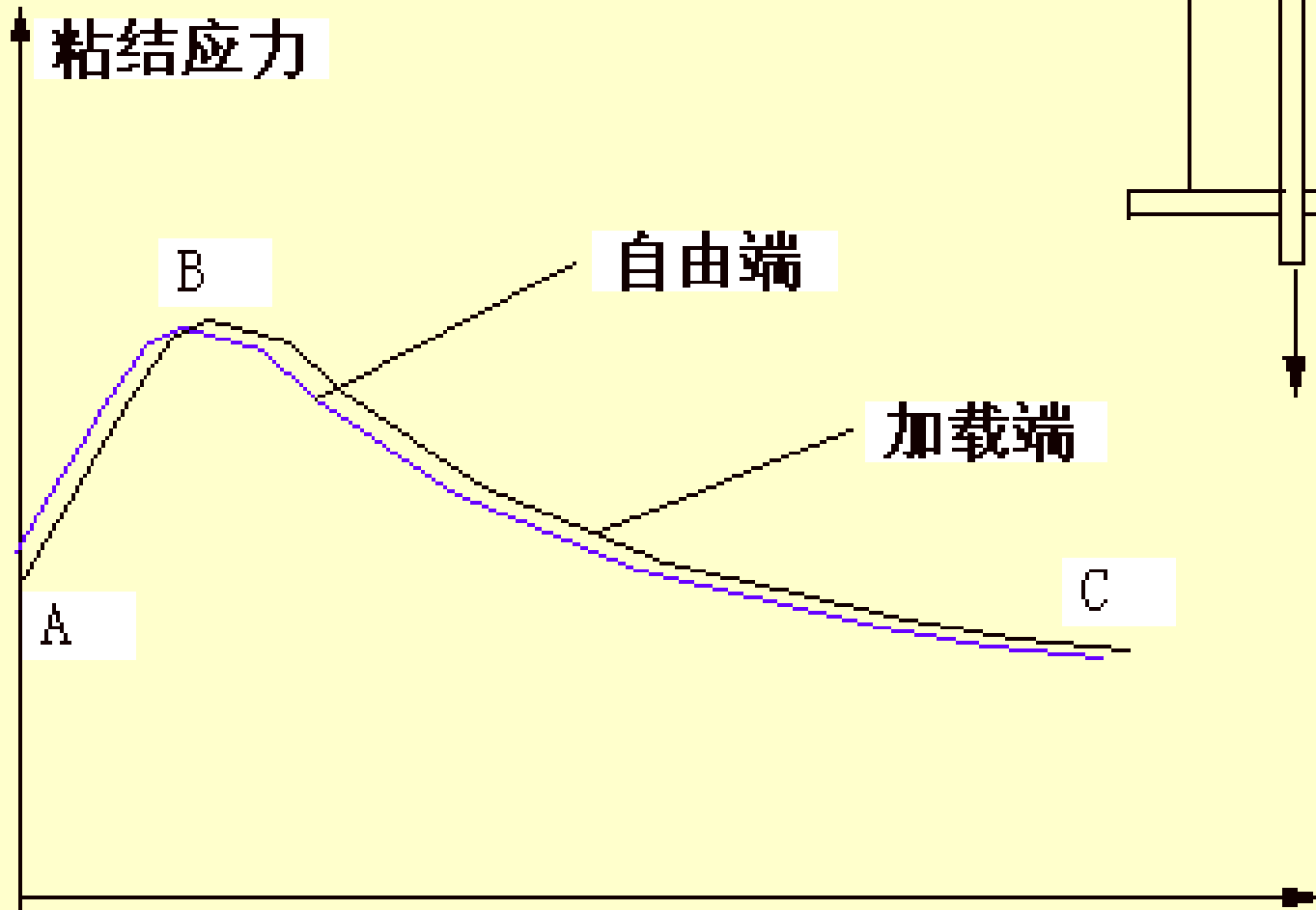
一。光圆钢筋

其粘结力主要由胶结力和摩擦力组成。

当钢筋微锈时，会明显增加机械咬合力。

下面看中心拉拔试验结果

粘结应力



B

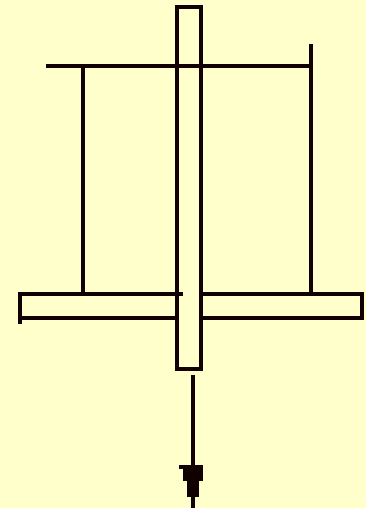
自由端

加载端

C

A

滑移



A点前无滑移,此时拉拔力由胶结力承受.

超过A点后,在锚固长度 l_a 内的加载端附近开始丧失胶结力,出现滑移现象.当试件的自由端出现滑移时,胶结力全部丧失.此后起锚固作用的是摩擦力.

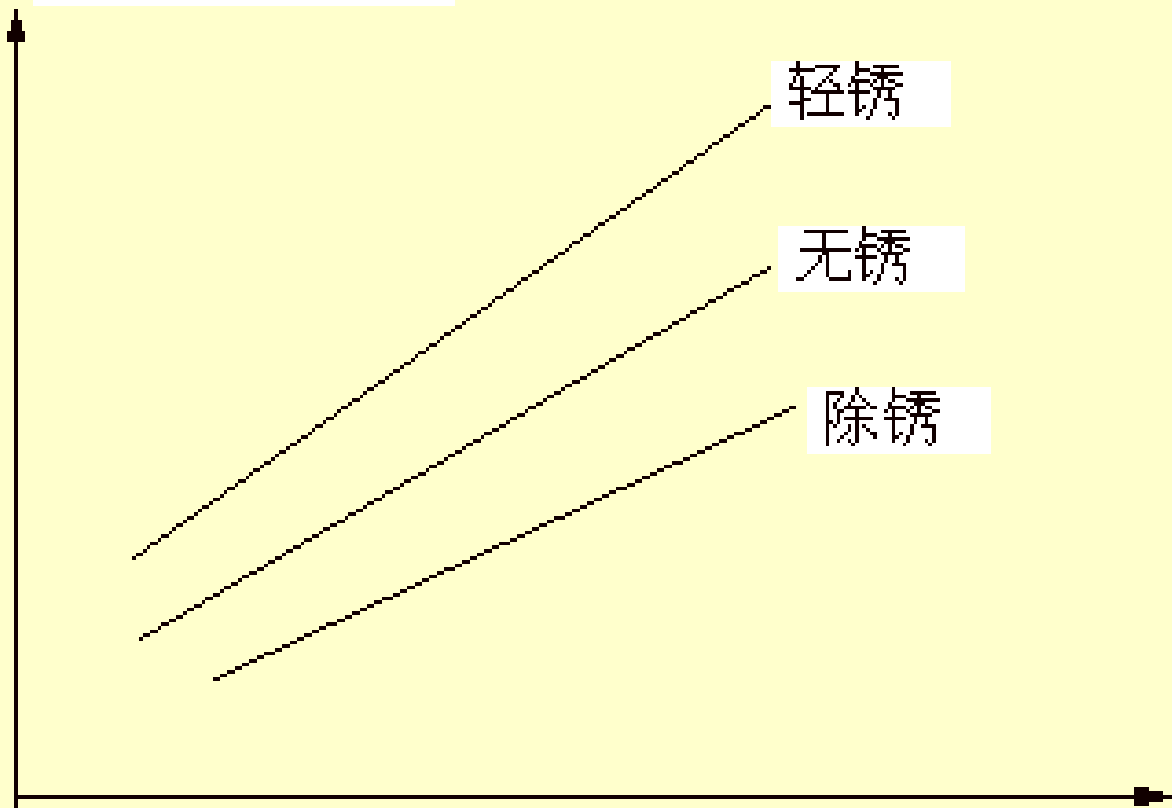
B点到达粘结应力的峰值,称为平均粘结强度 τ_u ,此后,摩擦力因接触面逐渐磨平而受到削弱.

C点的粘结强度为残余粘结强度.

影响光圆钢筋粘结力的主要因素是:混凝土强度和钢筋表面状态.
平均粘结强度与混凝土抗拉强度大体呈正比关系.

为安全可靠,在具体设计时,光面钢筋的末端均需设置弯钩.

平均粘结应力

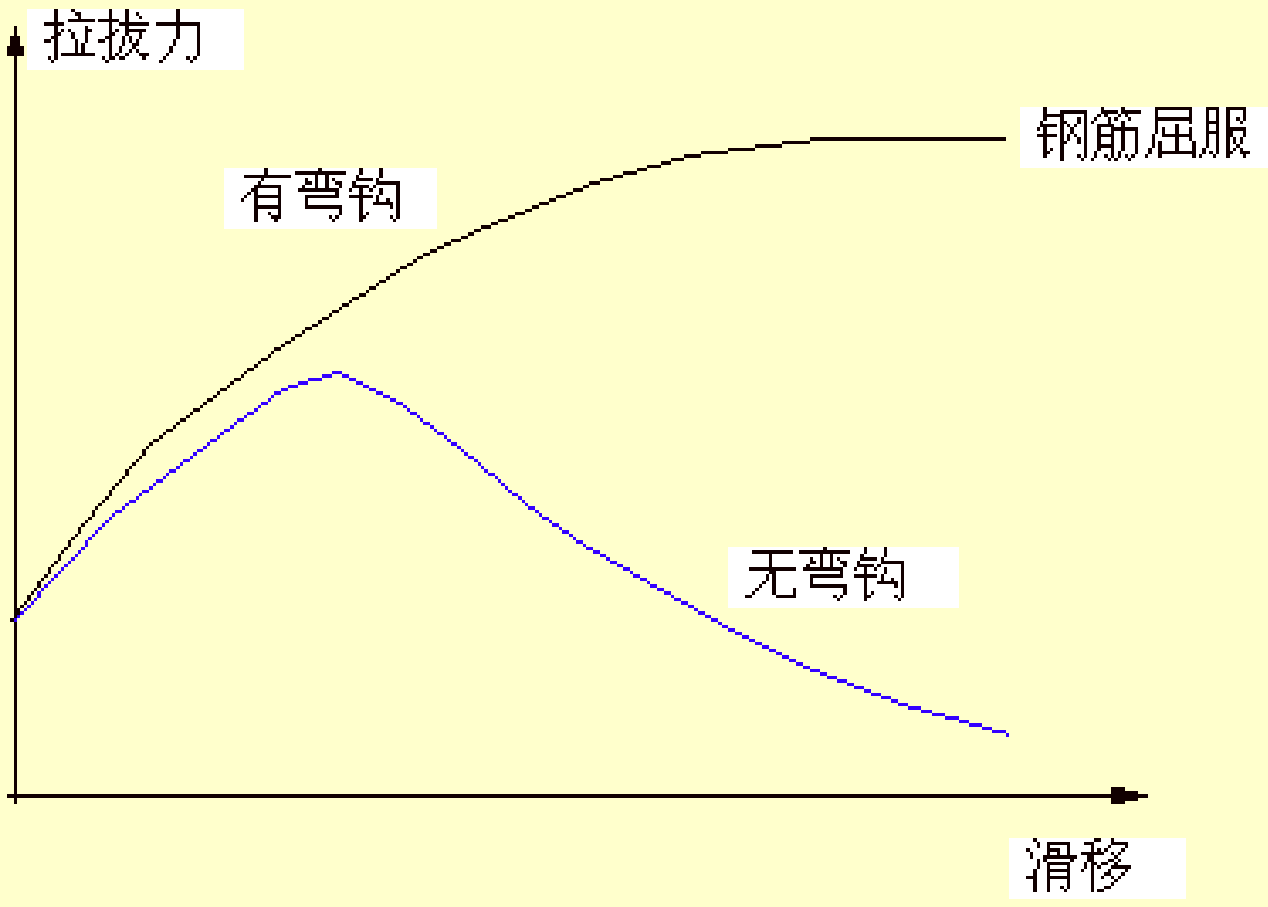


轻锈

无锈

除锈

混凝土抗拉强度

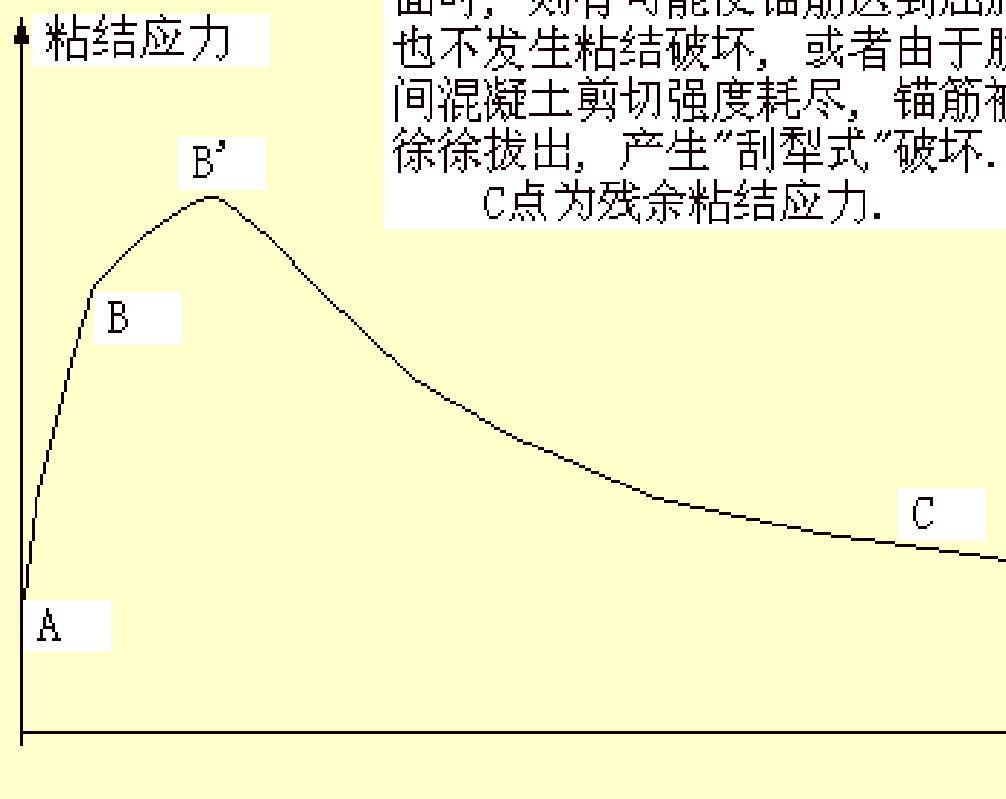


的出现仅表明粘结遭到局部破坏。粘结应力图形的峰值内移，达峰值B'点时，一般滑移较大，平均粘结应力 t_u 比短锚长试件低。

若锚筋周围布置箍筋或螺旋筋以阻止混凝土径向裂缝的发展，或锚筋周围混凝土保护层很厚，使径向裂缝很难发展到试件表面时，则有可能使锚筋达到屈服也不发生粘结破坏，或者由于肋间混凝土剪切强度耗尽，锚筋被徐徐拔出，产生“刮犁式”破坏。

C点为残余粘结应力。

2. 变形钢筋

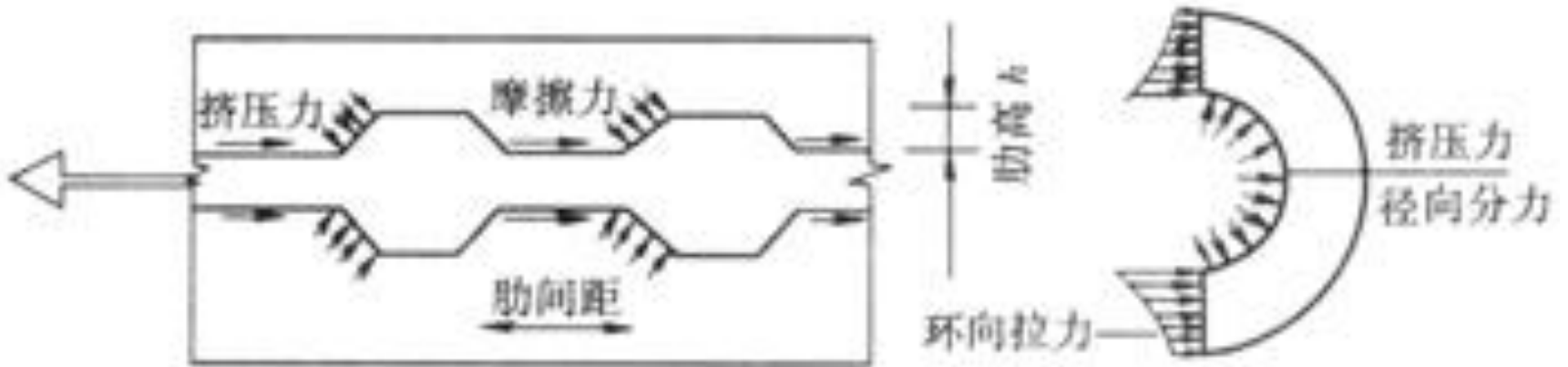


A点粘结力丧失，产生滑移。此后拉拔力由摩擦力的机械咬合力承担。当肋间挤压力引起的钢筋周围混凝土中环向拉应力或斜向拉应力达到抗拉强度时，相应产生径向或斜向锥形裂缝，之后滑移发展加快。

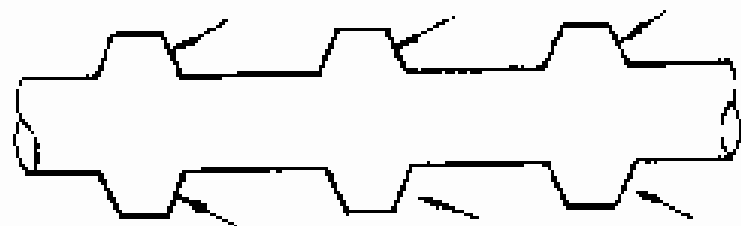
当加载端附近径向裂缝到达试件表面时，开始出现纵向劈裂裂缝，滑移显著增大，曲线明显转折(B点)。对于短锚长的试件，劈裂裂缝很快向自由端发展，到达平均粘结强度 t_u (B'点)。对于锚长较大的试件，斜向挤压力使肋间混凝土挤碎。加载端劈裂裂缝的出现仅表明粘结遭到局部破坏

粘结机理：

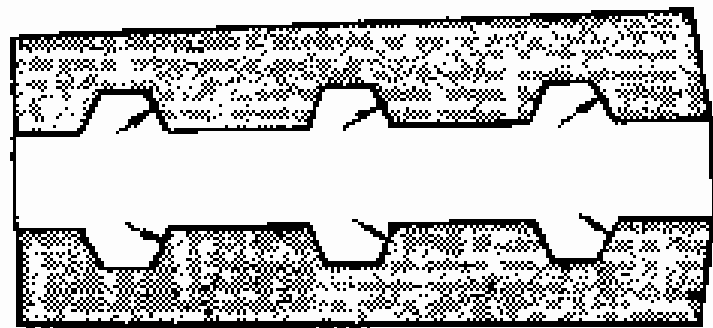
在滑移前主要产生胶结力，滑移后主要起作用的是摩阻力和机械咬合力，后者效果极为明显。



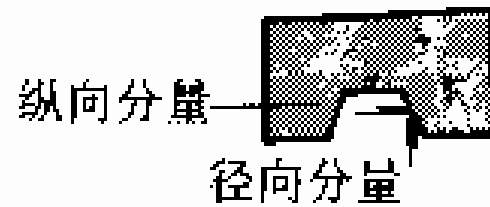
变形钢筋和混凝土的机械咬合作用



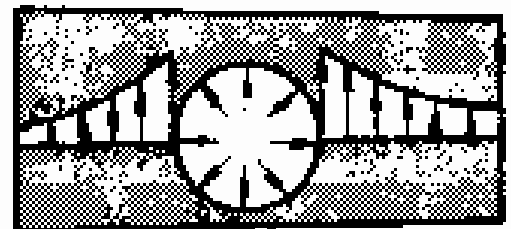
(a)



(b)



(c)



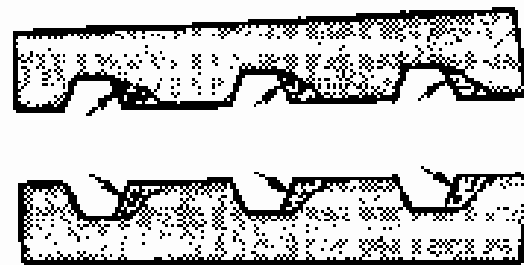
(d)

粘结传递机理

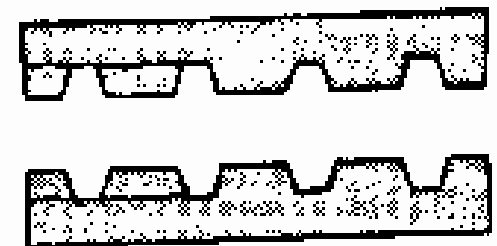
- (a) 作用于钢筋的力；(b) 作用于混凝土的力；(c) 作用于混凝土的力的分量；
(d) 混凝土的径向应力和钢筋截面的劈裂应力



(a)



(b)



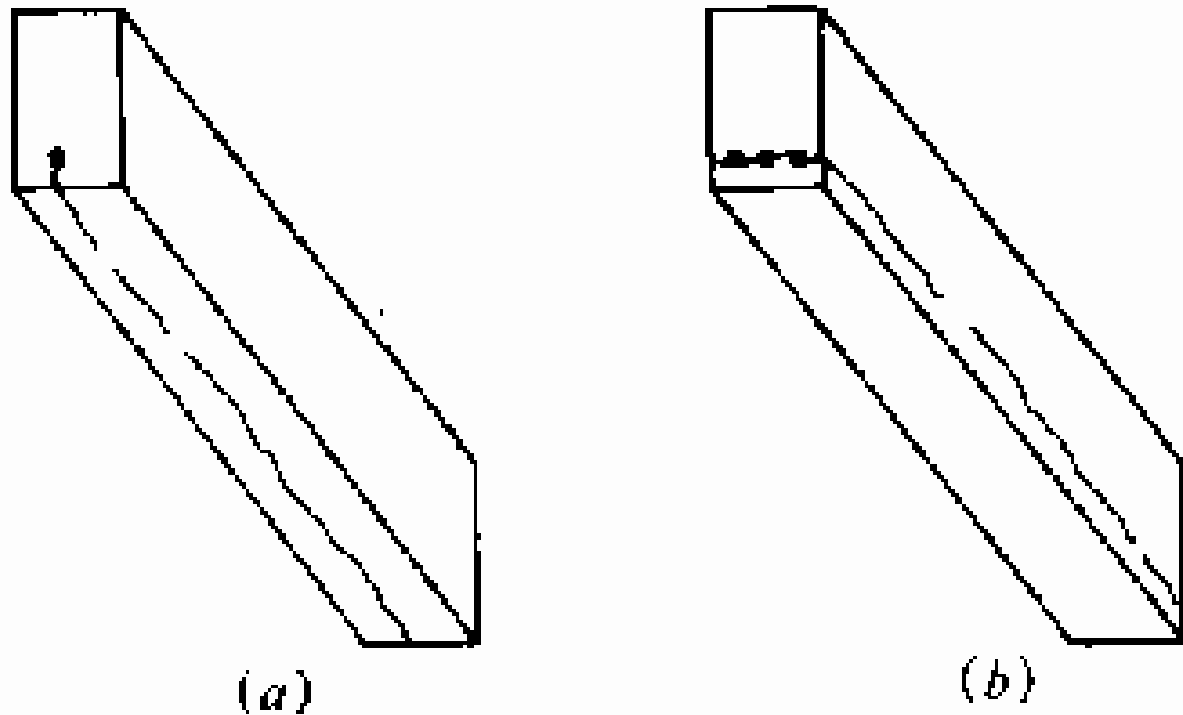
(c)

机械啮合对混凝土的影响

(a) 混凝土断裂；(b) 混凝土挤碎；(c) 刮出式破坏

3. 粘结破坏的形态

发生沿钢筋的劈裂。

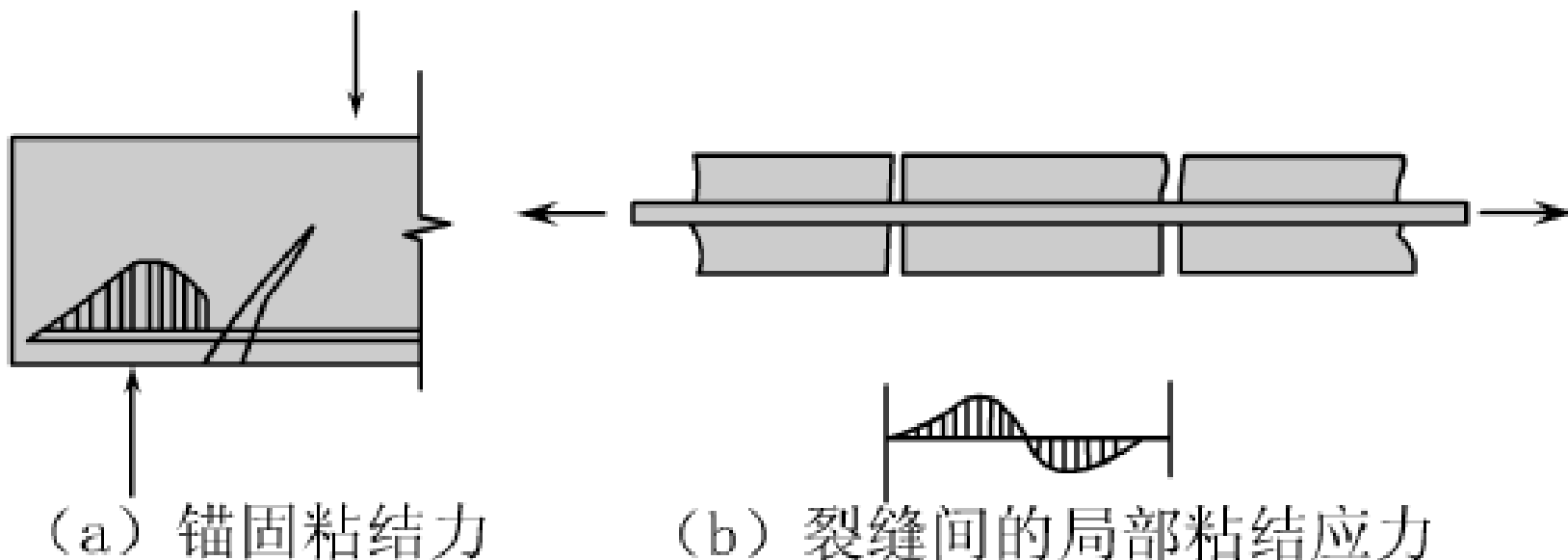


粘结破坏形态

(a) 豎直平面劈裂；(b) 水平平面劈裂

2.3.3 粘结强度

粘结分为缝间粘结和锚固粘结两大类



钢筋和混凝土之间粘结应力示意图

典型裂缝情况

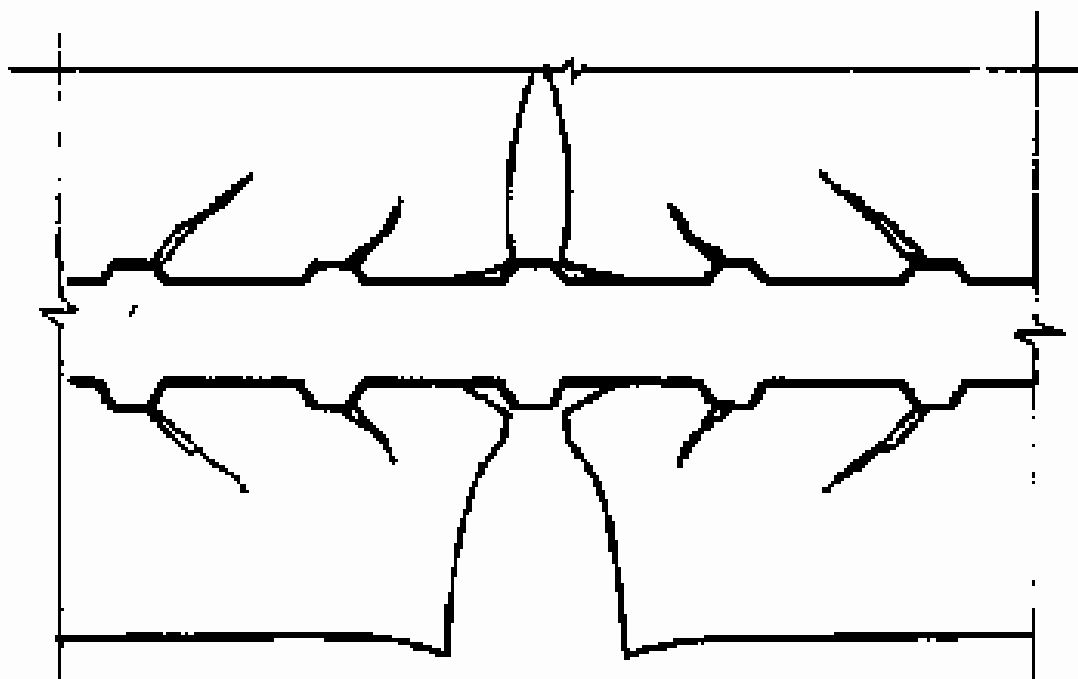
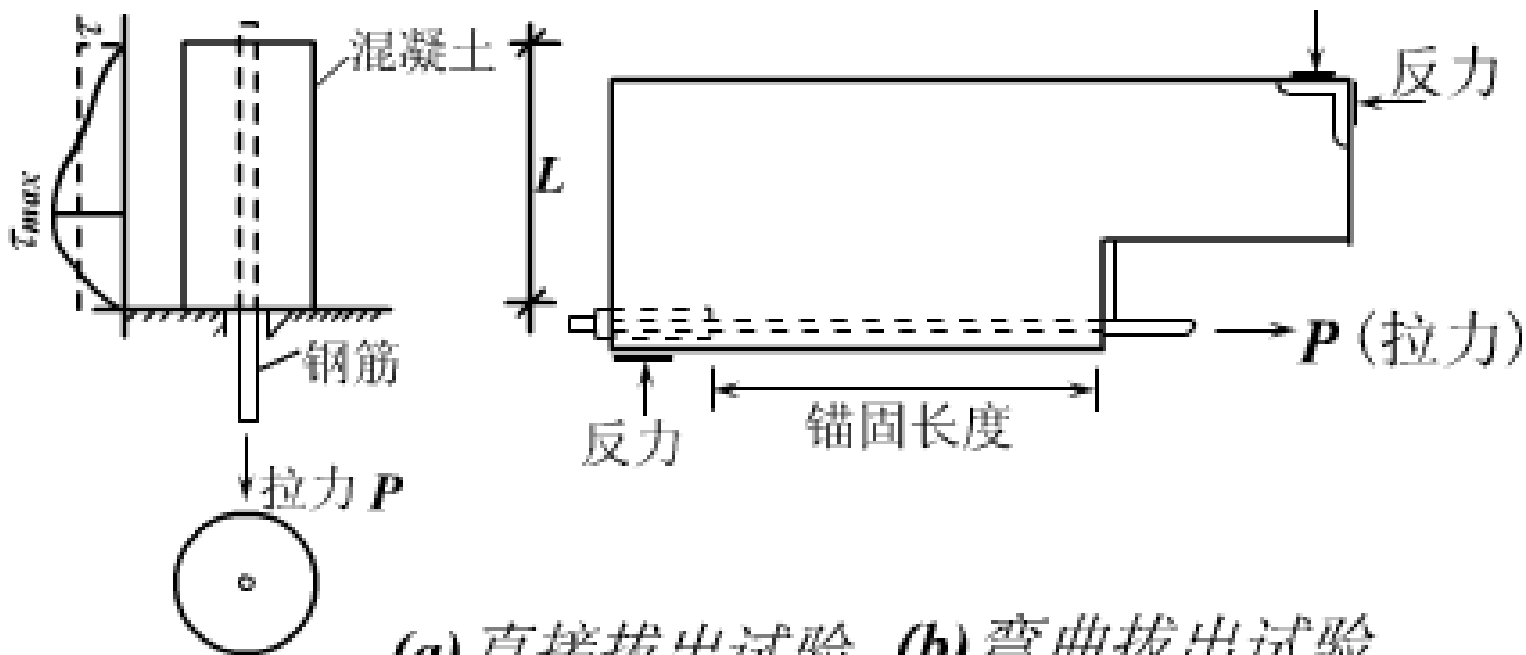


图 9-9 主裂缝和次裂缝

缝间粘结采用拉伸试件、梁式试件、锚固粘结用拔出试验。



(a) 直接拔出试验 (b) 弯曲拔出试验
测定粘结强度的两种拔出试验

$$\tau = \frac{P}{\pi d L}$$

试验结果：

- ①随 P 加大， τ_{\max} 逐渐内移。
- ②埋置长度 L 愈长， P 愈大，但尾部粘结应力很小，故过长不必。
- ③ τ 随混凝土强度等级提高而增大。
- ④变形钢筋的粘结强度要高于光圆钢筋，光圆钢筋在端部设弯钩粘结强度明显提高。
- ⑤平位浇注混凝土粘结强度低于竖位浇注。
- ⑥适当增加保护层厚度，保证钢筋净间距能提高粘结强度。
- ⑦设置横向钢筋、垂直压应力存在有利于粘结强度的提高。

2.3.4 保证钢筋和混凝土粘结力的措施

1. “锚固粘结”应保证受拉钢筋在支座中有足够的“锚固长度”。
“缝间粘结”，在同样钢筋面积下，应多采用细直径、变形钢筋。
2. 保证钢筋周围混凝土有足够厚度。
3. 光圆钢筋在末端应设弯钩。
4. 横向钢筋设置有利于限制微裂缝发展，提高粘结强度。
5. 对高度较大的梁应分层浇注，采用二次振捣。

2.3.5 钢筋的锚固与搭接

《混凝土规范》采用构造措施来保证钢筋的锚固与搭接要求。

1. 锚固长度

基本锚固长度的计算公式

$$L_a = a \cdot \frac{f_y}{f_t} \cdot d$$

a 锚固钢筋的外形系数, d 锚固钢筋的直径

f_y : 钢筋的抗拉强度

f_t : 混凝土的抗拉强度

钢筋为提高锚固强度可采用机械锚固形成（弯钩、贴焊钢筋及焊锚板等），此时锚固长度乘折减系数0.7。

钢筋锚固时必须大于规范规定的锚固长度。

2. 钢筋的搭接

原则：接头设在受力较小处，同一根钢筋应尽量少设接头，接头以机械连接为优，在采用搭接（绑扎）接头时。

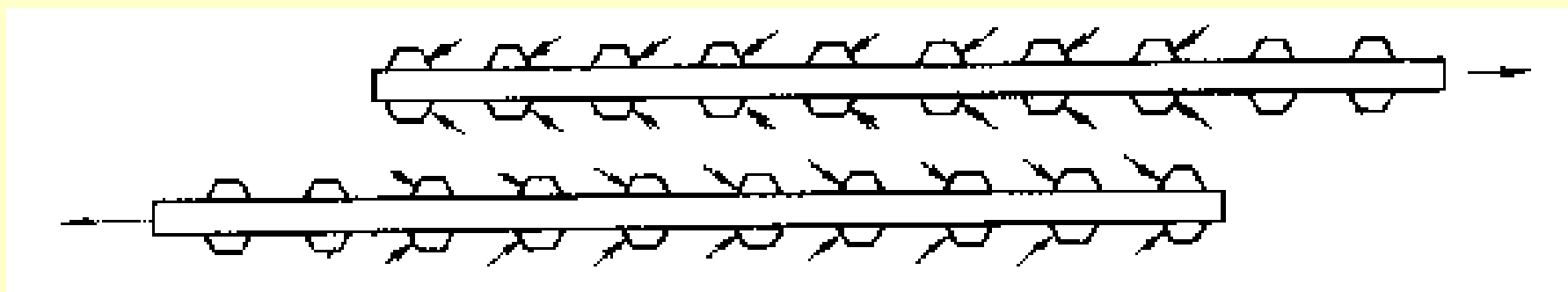
受拉钢筋：
$$L \geq L_L (= \xi L_a)$$

受压钢筋：
$$L \geq 0.7L_L$$

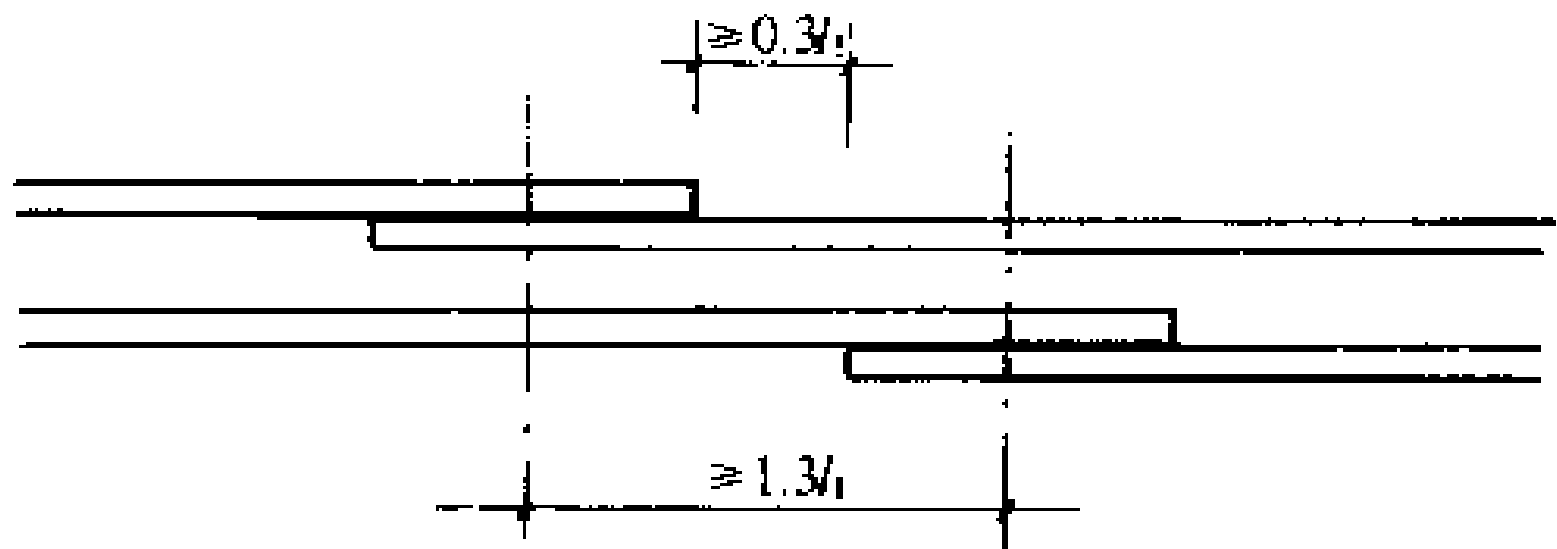
L 搭接长度

ξ ：纵向受拉钢筋的搭接长度修整系数，搭接的接头25% $\xi = 1.2$ ，50% $\xi = 1.4$ ，100% $\xi = 1.6$ 。

当混凝土构件中的钢筋长度不够时，或为构造要求需设施工缝或后浇带时，钢筋就需要搭接，即将两根钢筋的端头在一定长度内并放，通过搭接钢筋之间的混凝土，将一根钢筋的力传给另一根钢筋。对于采用搭接的受拉钢筋，在接头处钢筋的受力方向相反，位于两根搭接钢筋之间的混凝土受到钢筋的斜向挤压力作用，如图9-25 (a) 所示。



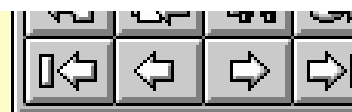
(a) 搭接处作用于钢筋的力



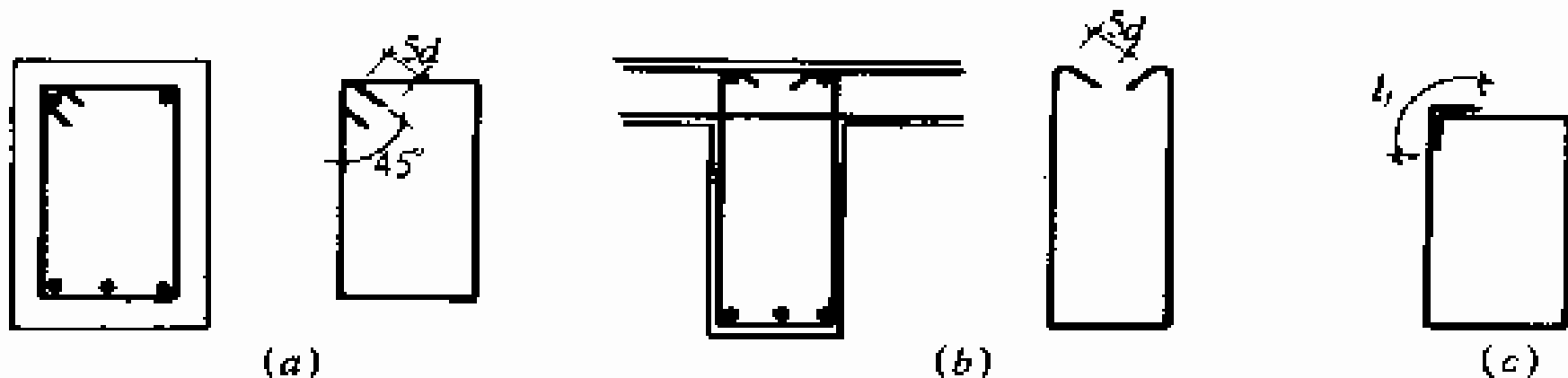
箍筋可以延缓内裂缝的发展，并可限制到达构件表面的劈裂裂缝的宽度，因而可提高粘结强度，为保证锚固和搭接的有效可靠，在纵筋锚固长度范围内应配置箍筋。箍筋直径不宜小于锚固钢筋直径或并筋等效直径的0.25倍；间距不应大于单根锚固钢筋直径的10倍，在采用机械锚固措施时不应大于单根锚固钢筋直径的5倍。在整个锚固范围内箍筋不应少于3个。当锚固钢筋或并筋的混凝土保护层厚度不小于钢筋直径或并筋等效直径的5倍时，可不受以上限制。

在受力钢筋搭接长度范围内也应配置箍筋。箍筋直径不宜小于搭接钢筋直径0.25倍；箍筋间距应满足以下要求：当为受拉搭接时，不应大于搭接钢筋较小直径的5倍，且不应大于100mm；当为受压搭接时，不应大于搭接钢筋较小直径的10倍，且不应大于200mm。当受压钢筋直径大于25mm时，为防止局部挤压裂缝，需在钢筋端部增配箍筋。

箍筋的锚固



不论受剪还是受扭，箍筋是受拉钢筋，它的主要作用就是把梁的受压区和受拉区牢固地联系在一起，把斜裂缝间混凝土齿状体的斜向压力传递到受压区混凝土。为此，除了箍筋的最小直径和最大间距要满足抗剪和抗扭的规定外，还应保证箍筋在受拉区和受压区都有足够的锚固。矩形截面梁的箍筋应采用封闭的矩形（图 9-28a）；T形截面构件，由于翼缘顶面通常设有横向钢筋，也可采用 U 形箍筋（图 9-28b）。箍筋的锚固可采用 135 度的弯钩，弯钩深入核心混凝土不小于 s_d ，为施工方便，也可采用 90 度弯折（图 9-28c），此时应保证箍筋接头具有不小于 $11d$ 的搭接长度；否则，将会导致角部混凝土的崩落。



箍筋的锚固