

* 第二章 混凝土结构 材料的物理力学性能

内蒙古科技大学建筑与土木工程学院

2.1 混凝土

一、混凝土的强度

1、混凝土立方体抗压强度

由于立方体试件的强度比较稳定，我国把**立方体抗压强度**值作为混凝土强度的基本指标。

混凝土立方体抗压强度的测定：边长**150mm**立方体标准试件，在标准条件下（ $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ ， $\geq 90\%$ 湿度）养护28天，按照标准试验方法（两端不涂润滑剂）测得的**具有95%保证率**的抗压强度，作为混凝土的**立方体抗压强度**。

2. 混凝土的强度等级

混凝土的强度等级按立方体抗压强度确定。

混凝土的强度等级一般可划分为：C15 C20 C25
C30 C35 C40 C45 C50 C55 C60 C65 C70
C75 C80，共14个等级。

3. 混凝土立方体抗压强度与哪些因素有关？

- (1) 试验方法 (2) 加载速度 (3) 试件尺寸



表 4.1.3-1 混凝土轴心抗压强度标准值 (N/mm^2)

强度	混凝土强度等级													
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
f_{ck}	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2

表 4.1.4-1 混凝土轴心抗压强度设计值 (N/mm^2)

强度	混凝土强度等级													
	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
f_c	7.2	9.6	11.9	14.3	16.7	19.1	21.1	23.1	25.3	27.5	29.7	31.8	33.8	35.9

《规范》规定：

4.1.2 素混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C15；钢筋混凝土结构的混凝土强度等级不应低于 C20；采用强度级别 400MPa 及以上的钢筋时，混凝土强度等级不应低于 C25。

承受重复荷载的钢筋混凝土构件，混凝土强度等级不应低于 C30。

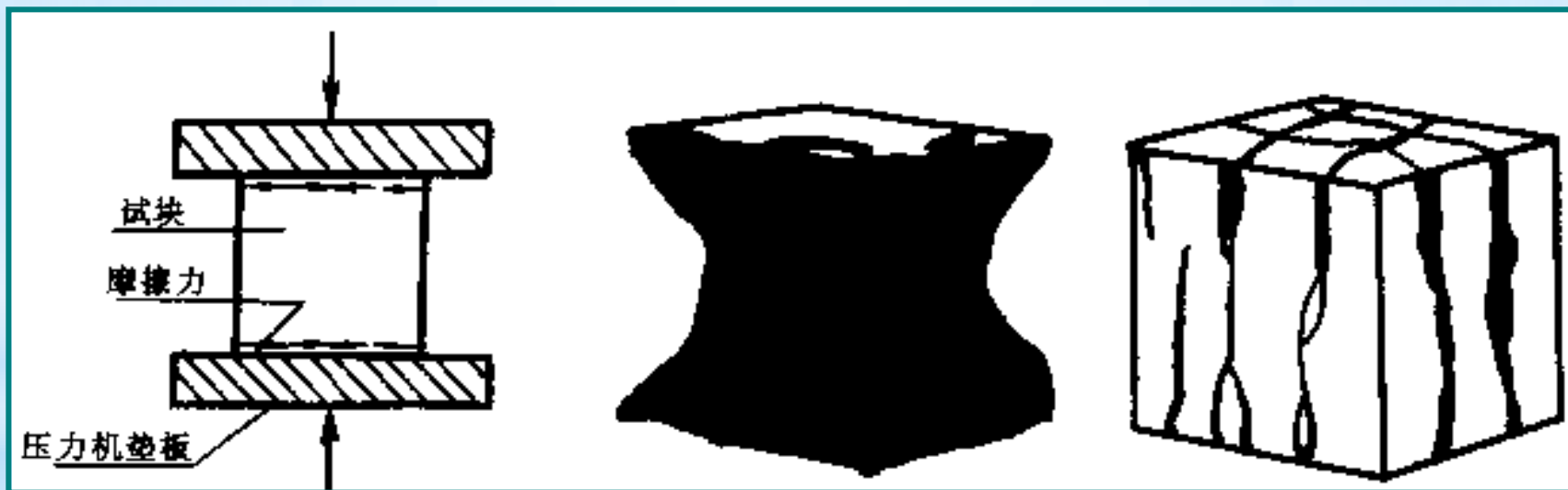
预应力混凝土结构的混凝土强度等级不宜低于 C40，且不应低于 C30。



试验方法

试件在试验机上受压时，竖向缩短，横向扩张，由于混凝土与压力机垫板**弹性模量**与**横向变形系数**的差异，压力机垫板的横向变形明显小于混凝土的横向变形。因此垫板便通过接触面上的摩擦力对混凝土试件的横向变形产生约束，这就好像在试件上下端各加了一个**套箍**，致使混凝土破坏时形成两个**对顶的角锥形破坏面**，抗压强度比没有约束时高。

如果在试件上下表面涂一些**润滑剂**，这时试件与压力机垫板间的摩擦力大大减小，其横向变形几乎不受约束，试件沿着与力的作用方向**平行地产生几条裂缝而破坏**，测得的抗压强度值偏低。



混凝土立方体试块的破坏情况



2、混凝土轴心抗压强度

混凝土的抗压强度不仅与试件的**尺寸**有关，还与它的**形状**有关。考虑到混凝土结构的实际情况，受压构件往往不是立方体，而是棱柱体，所以采用**棱柱体试件**比**立方体试件**能更好地反应混凝土结构的实际抗压能力。用标准棱柱体试件测得的混凝土抗压强度称为**混凝土轴心抗压强度**，用 f_c 表示。

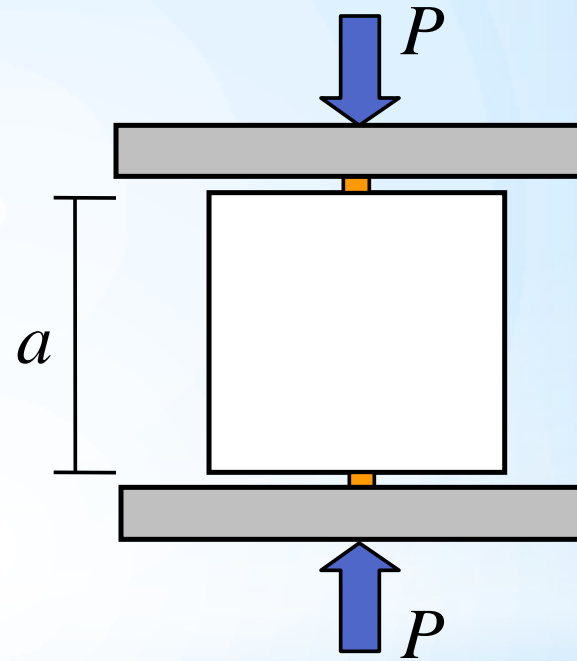
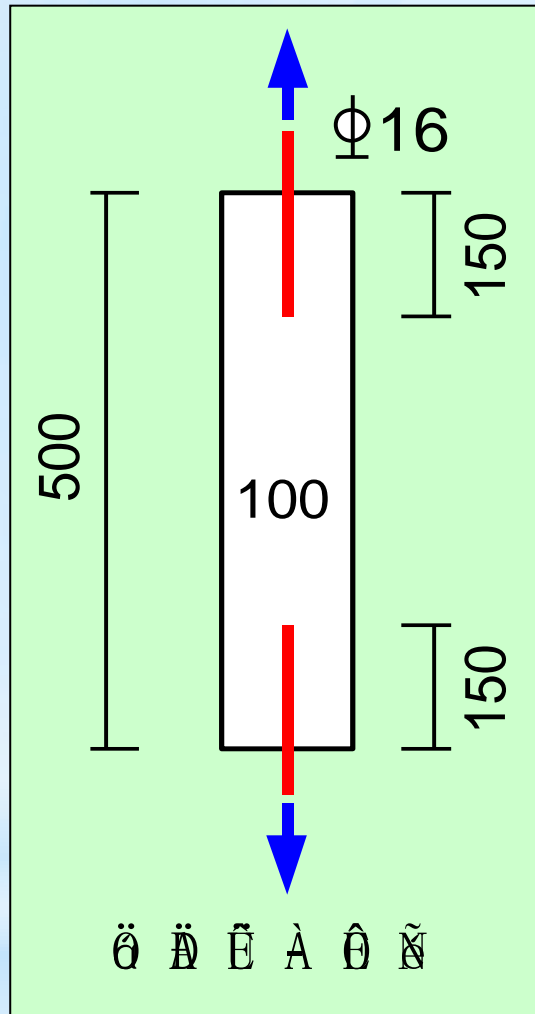
标准棱柱体试件**尺寸**：**150mmx150mmx300mm**

试件**高宽比**的范围：**2~3**（原因理解）

3、混凝土轴心抗拉强度

混凝土抗拉强度远小于其抗压强度，一般只有抗压强度的 $1/17\sim 1/8$ 。在钢筋混凝土结构中，如果计算混凝土构件开裂之前的承载力，或者控制混凝土构件的开裂，都必须知道混凝土的抗拉强度，混凝土轴心抗拉强度用 f_t 表示。

混凝土抗拉强度的测定方法：（1）直接测试法
（2）劈裂试验



劈拉试验

4、复合应力状态下混凝土的强度

在钢筋混凝土结构中，混凝土理想单轴受压的情况很少，多数构件处在复杂的受力状态下。

复合应力状态包括：

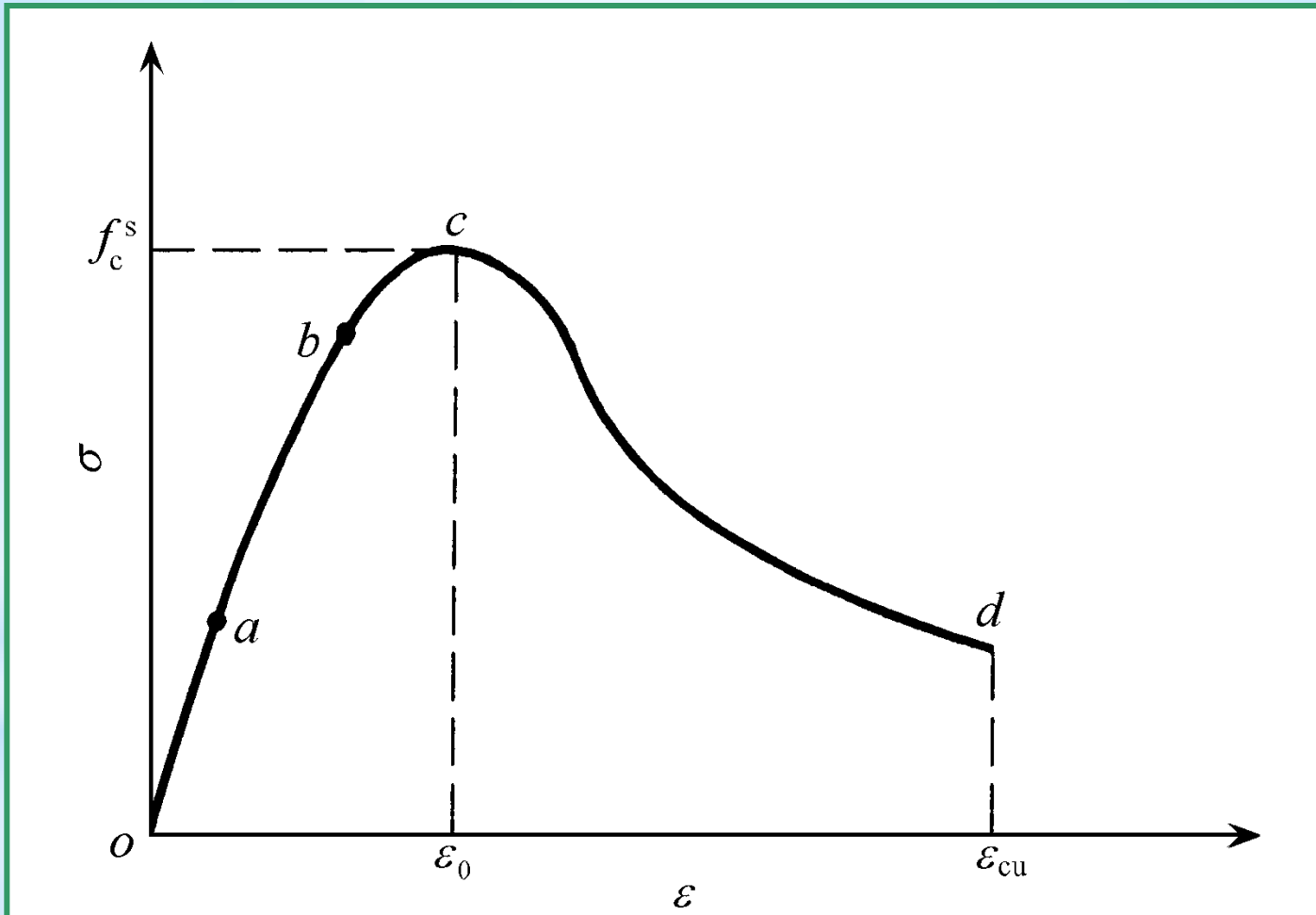
- (1) 双向受力（双向受拉，双向受压，一拉一压）
- (2) 三向受压（对混凝土的横向变形加以约束）

混凝土三向受压时，强度提高，变形能力增加

工程实例：螺旋箍筋柱，钢管混凝土柱

二、混凝土的变形

1. 一次短期加荷下混凝土的变形性能

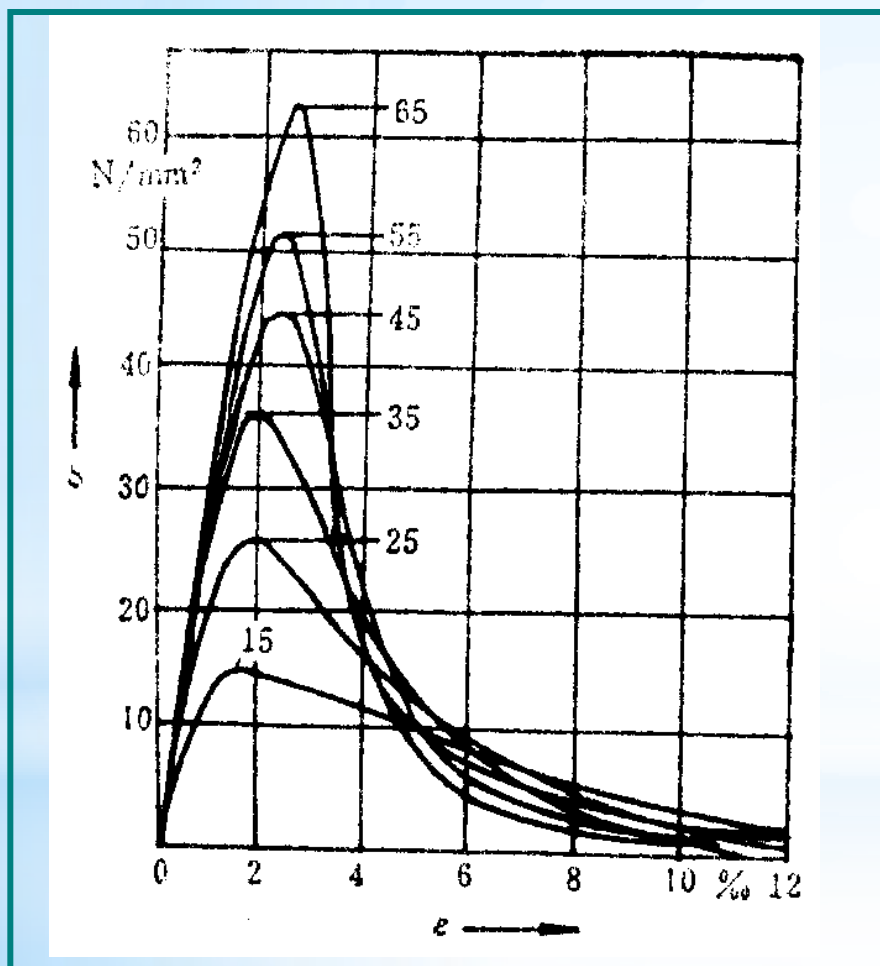


C点：峰值应力点，在该点混凝土发挥出它受压时的最大承载能力，即轴心抗压强度。相应的应变称为峰值应变，其值随混凝土强度的不同可在 $1.5 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-3}$ 间波动，通常取平均值 2×10^{-3} 。

由混凝土的应力——应变曲线可知：混凝土是一种**弹塑性材料**，只有当压应力很小时，才可将其视为弹性材料。曲线分为上升段和下降段，说明混凝土在破坏过程中，承载力有一个**从增加到减少**的过程，当混凝土的压应力达到最大时，并不意味着立即破坏。

影响混凝土应力——应变曲线形状的因素？

- (1) 混凝土的强度 (2) 加载速度 (3) 约束情况

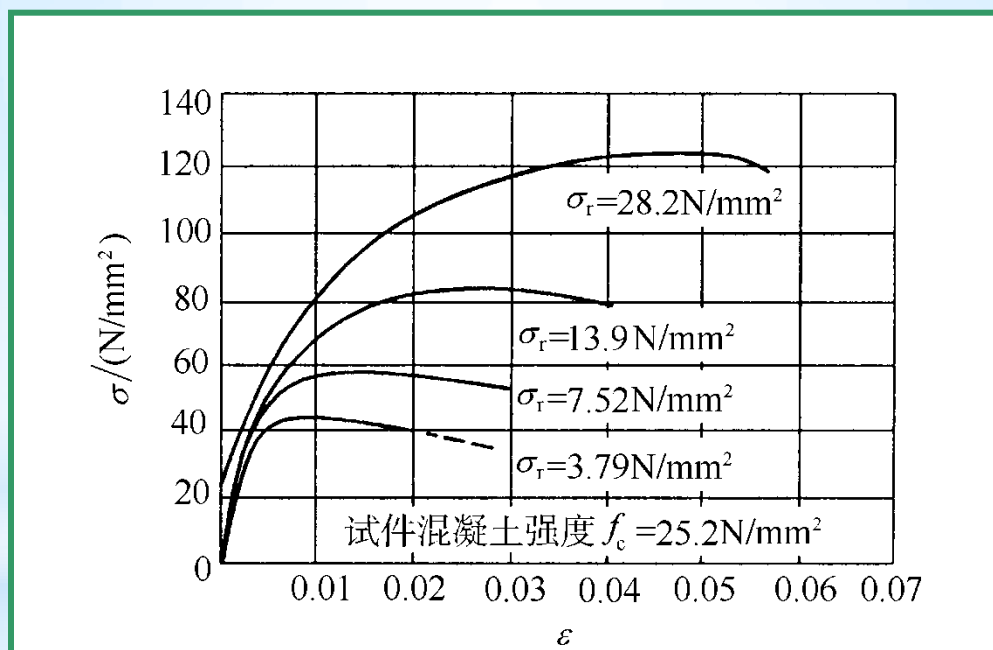


混凝土强度越高，曲线的上升段和峰值应变的变化不显著，而下降段越陡峭。

在高强混凝土中，砂浆与骨料的粘结很强，密实性好，微裂缝很少，最后的破坏往往是骨料破坏，破坏时脆性越显著，下降段越陡。

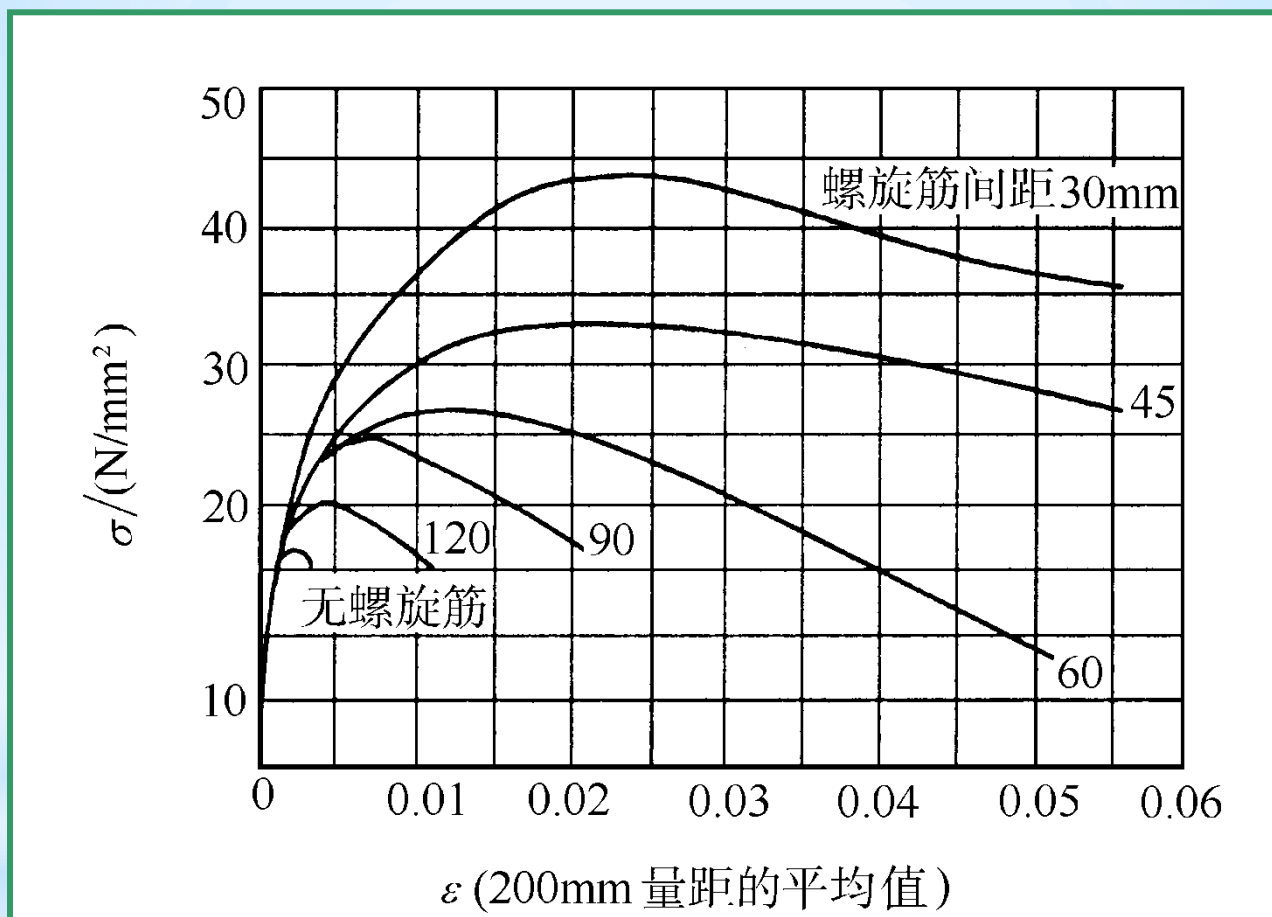
混凝土三向受压时的应力—应变曲线

试件纵向受压时，混凝土的横向膨胀受到约束，使核心混凝土处于三向受压状态，内部微裂缝的发展受到抑制，从而提高了试件的纵向强度和延性，特别是延性大为提高。



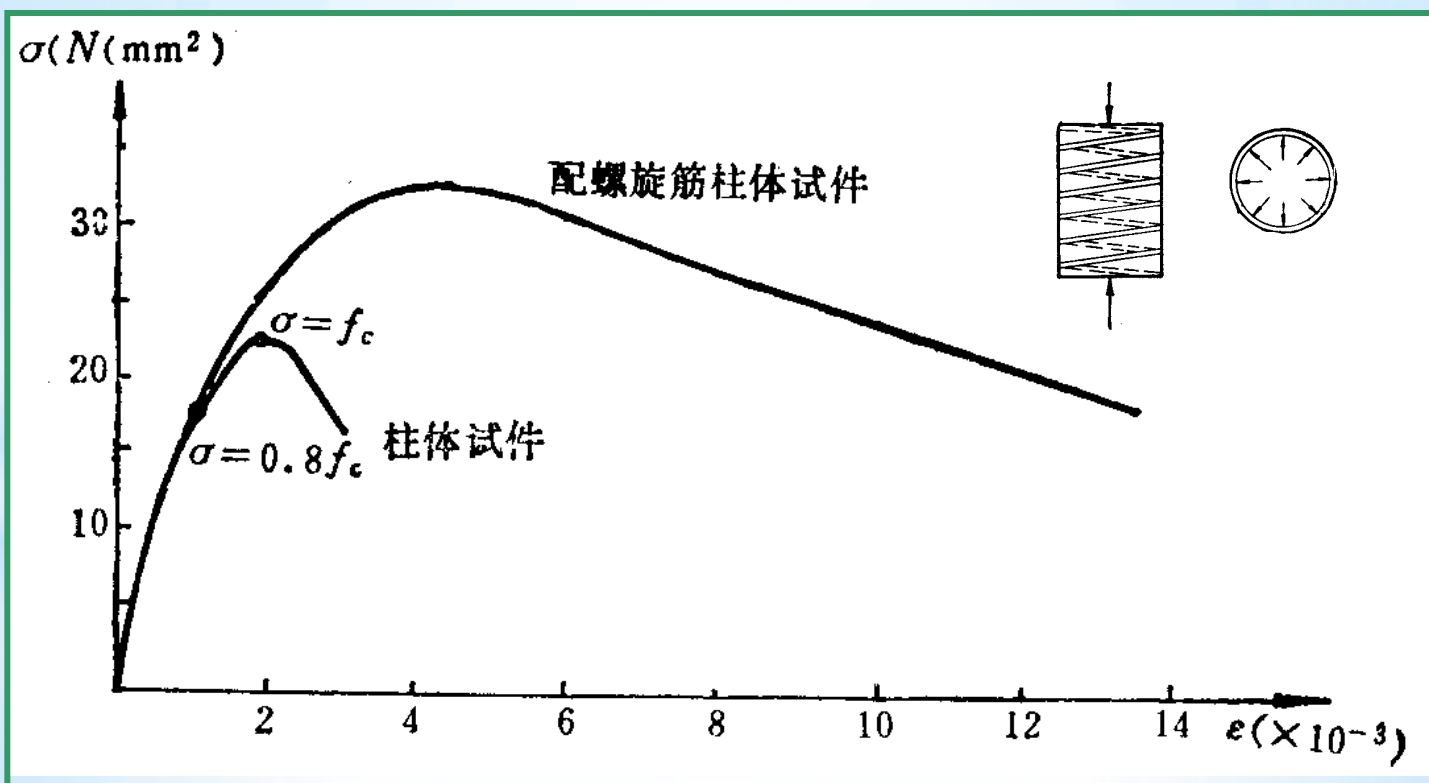
混凝土圆柱体三向受压时轴向应力—应变曲线

混凝土三向受压时的应力—应变曲线



螺旋箍筋圆柱体约束混凝土的应力—应变曲线

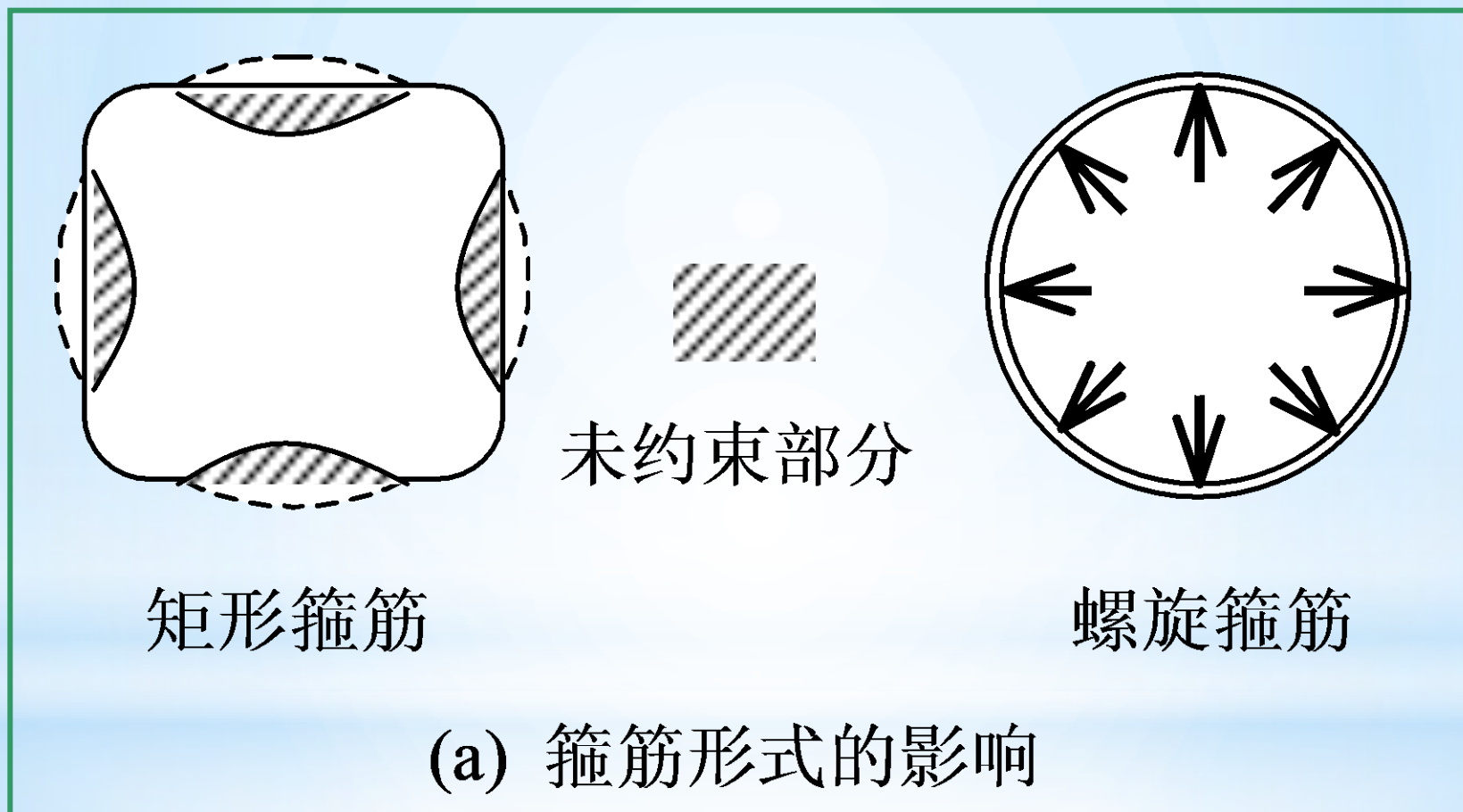
由螺旋箍筋约束混凝土的应力-应变曲线可知，当应力较小时，横向变形很小，箍筋的约束作用不明显；当应力超过某一点的应力时，由于混凝土的横向变形开始显著增大，侧向膨胀使螺旋箍筋产生环向拉应力，其反作用力使混凝土的横向变形受到约束，从而使混凝土的强度和变形能力都得到提高。



“**约束混凝土**”的概念在工程中许多地方都有应用，如螺旋箍筋柱、后张法预应力锚具下局部受压区域配置的钢筋网或螺旋筋等。而**钢管混凝土**对内部混凝土的约束效果更好，因此近年来在我国工程中得到许多应用。

约束混凝土可以提高混凝土的强度，**但更值得注意的是可以提高混凝土的变形能力**，这一点对于抗震结构非常重要。在抗震结构对于可能出现塑性铰的区域，均要求加密箍筋配置来提高构件的变形能力，达到坏而不倒的目的。

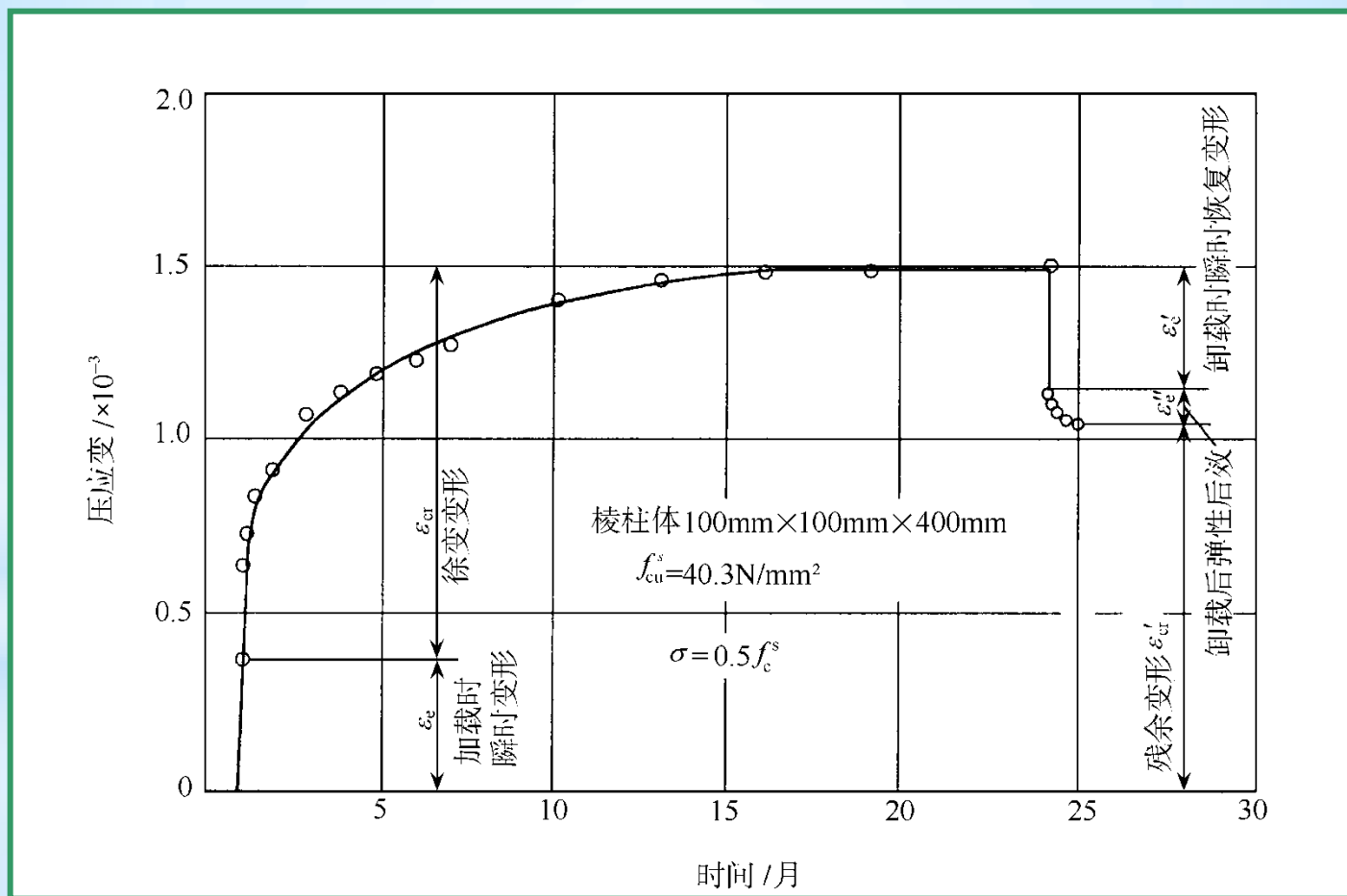
箍筋形式不同对混凝土的影响：



2. 长期荷载作用下混凝土的变形性能

➤ 混凝土的徐变

定义：在荷载长期作用下，混凝土的变形随时间继续增长的现象。



影响徐变的因素：

- ①持续应力的**大小**
- ②加载时的**龄期**
- ③混凝土的组成成分（**水泥用量、水灰比、骨料性质**）
- ④**振捣、养护条件及环境温湿度**

徐变对结构设计的影响：

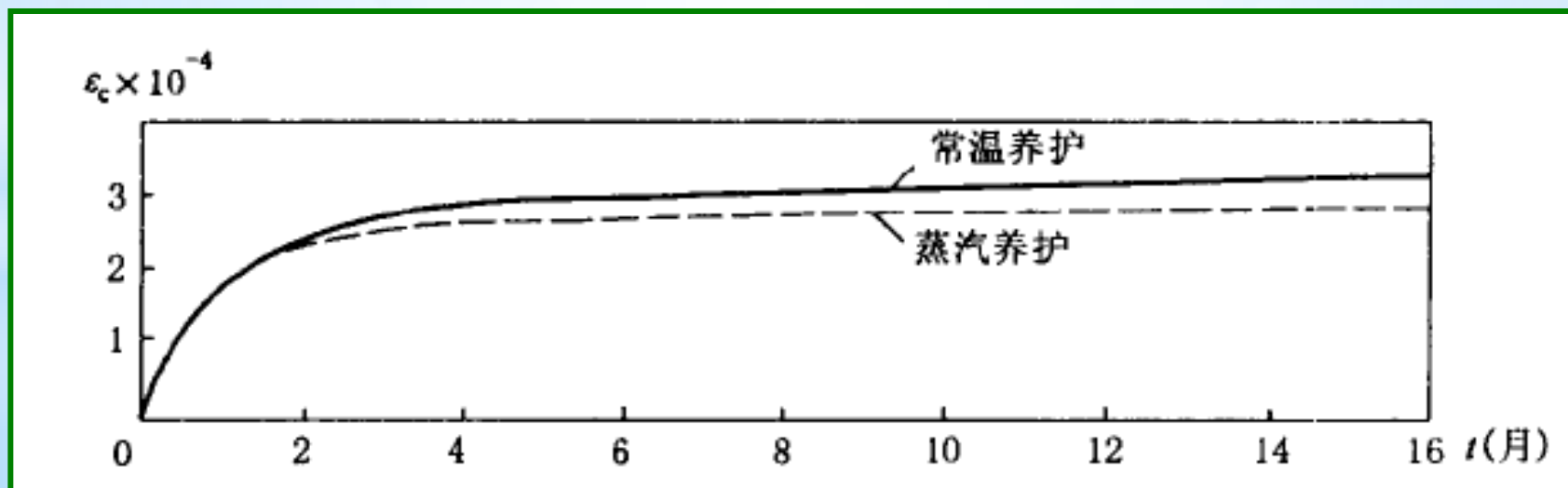
- ①使钢筋混凝土构件截面产生**内力重分布**；
- ②使受弯构件和偏压构件的**变形加大**；
- ③使预应力混凝土构件产生**预应力损失**。

➤ 混凝土的收缩

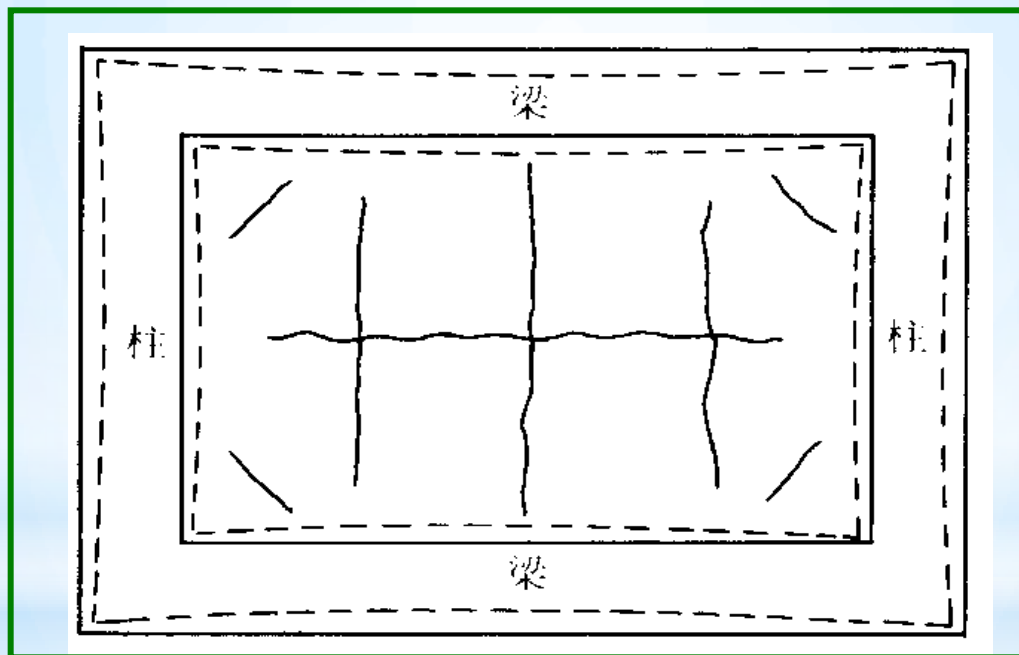
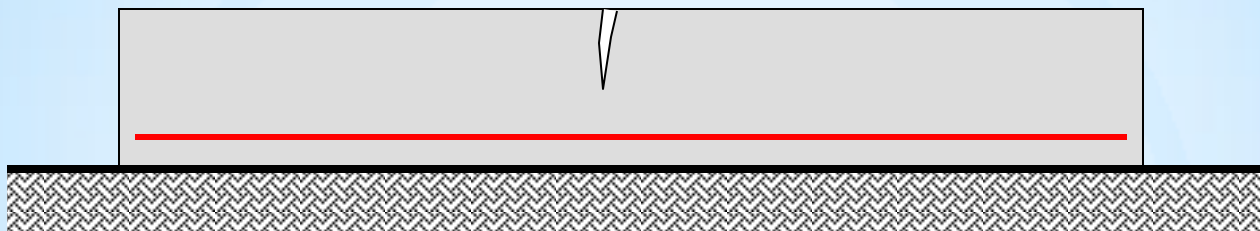
定义：混凝土在空气中结硬时其体积会缩小，这种现象称为混凝土的**收缩**；混凝土在水中结硬时体积会**膨胀**。通常收缩值比膨胀值大很多。

影响收缩的因素：

- ① 混凝土的组成成分
(水泥用量、水灰比、骨料性质)
- ② 振捣、养护条件及环境温湿度



收缩对结构受力的影响：



墙板干燥收缩裂缝与边框架的变形

混凝土收缩的工程意义：

- ▶ 如果混凝土构件处于完全自由的状态时，它产生的收缩只会引起构件的**缩短**而不会产生**裂缝**。
- ▶ 收缩是混凝土在不受外力的情况下因体积变化产生的变形。当这种自发的变形受到外部（支座）或内部（钢筋）的约束时，将使混凝土中产生拉应力，甚至**引起混凝土的开裂**。
- ▶ 混凝土收缩会使预应力混凝土构件**产生预应力损失**。

实际工程中一般采用设置施工缝来减小收缩应力。

3. 重复荷载作用下混凝土的变形性能

定义：混凝土在荷载重复作用下引起的破坏称为**疲劳破坏**。

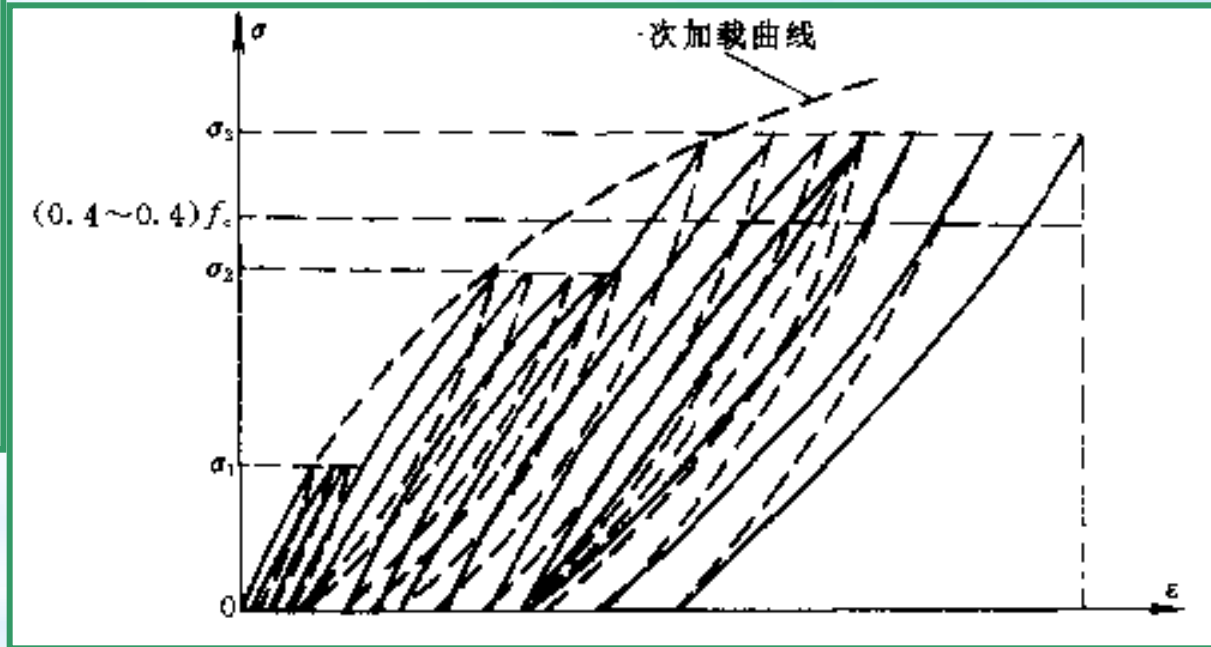
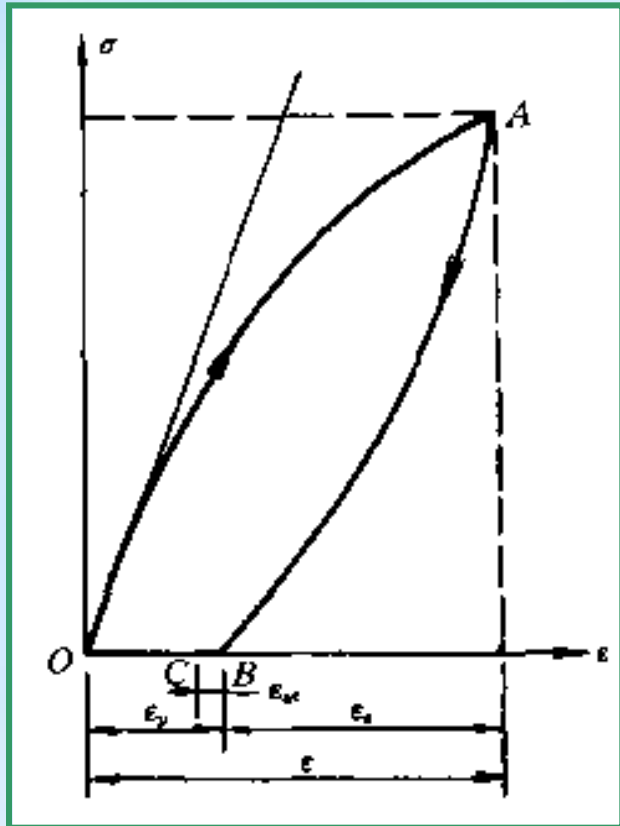
疲劳现象实例：

钢筋混凝土吊车梁受到重复荷载的作用

钢筋混凝土道桥受到车辆振动的影响

港口海岸的混凝土结构受到波浪冲击而损伤。

疲劳破坏的特征： **裂缝小而变形集中**。



混凝土在重复荷载作用下的应力-应变曲线

2.2 钢筋

1 钢筋的种类及符号说明

热轧钢筋是由**低碳钢**、**普通低合金钢**或**细晶粒钢**在高温状态下轧制而成。

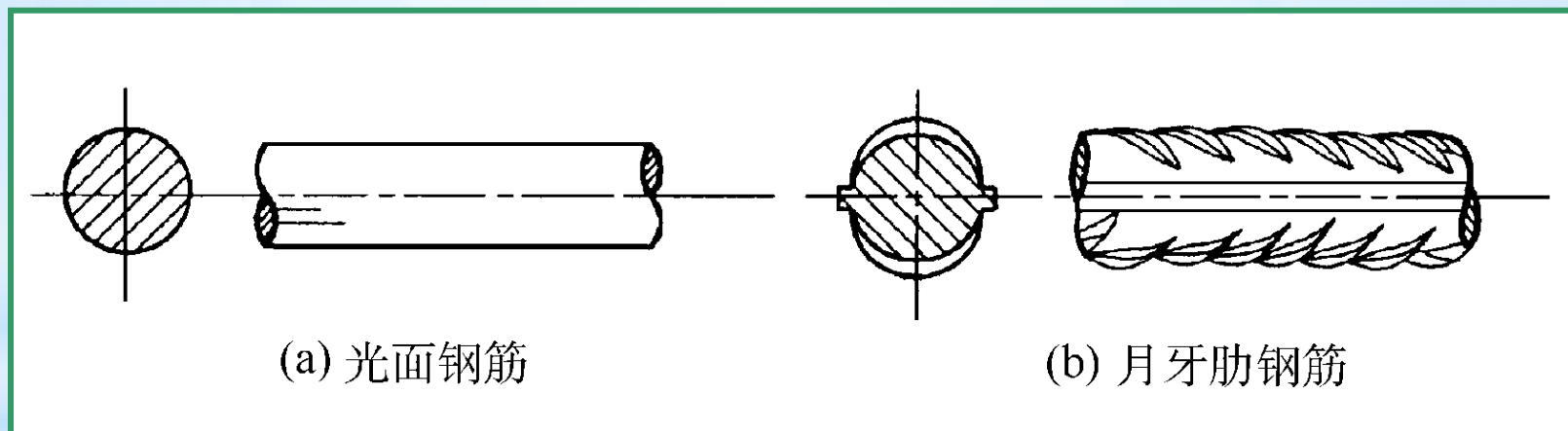
在钢材中加入少量的合金元素即制成**低合金钢**，既可以提高钢筋的强度，又可以是钢筋保持较好的塑性。

细晶粒钢不需要添加或只需添加很少的合金元素，通过控制轧钢的温度形成细晶粒的金相组织，达到与添加合金元素相同的效果。

2.2 钢筋

1 钢筋的种类及符号说明

热轧钢筋是由**低碳钢、普通低合金钢或细晶粒钢**在高温状态下轧制而成。



热轧钢筋的外形

1 钢筋的种类及符号说明

◆ 热轧钢筋的屈服强度标准值

低碳钢

表 4.2.2-1 普通钢筋强度标准值

普通低合金钢

牌号	符号	公称直径 d (mm)	屈服强度标准值 f_{yk} (N/mm ²)	极限强度标准值 f_{stk} (N/mm ²)
HPB300	Φ	6~22	300	420
HRB335	Φ	6~50	335	455
<u>HRBF335</u>	Φ^F			
HRB400	Φ	6~50	400	540
<u>HRBF400</u>	Φ^F			
RRB400	Φ^R			
HRB500	Φ	6~50	500	630
<u>HRBF500</u>	Φ^F			

细晶粒
钢筋

余热处理月牙纹变形钢筋

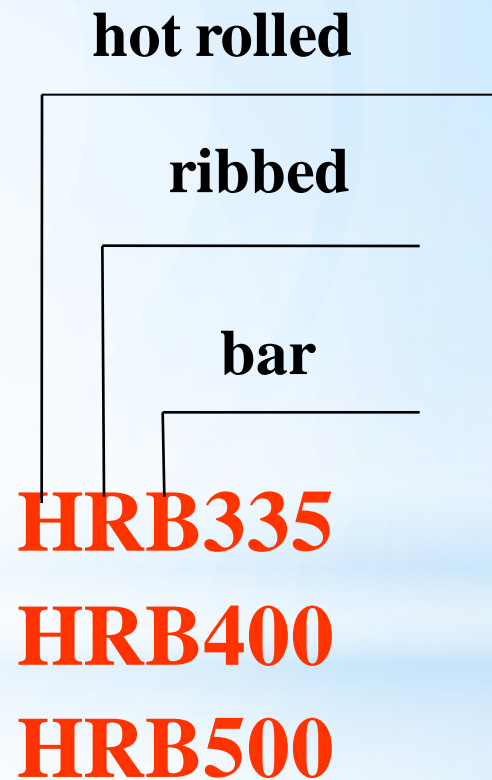
1 钢筋的种类及符号说明

◆ 热轧钢筋的屈服强度设计值

表 4.2.3-1 普通钢筋强度设计值 (N/mm²)

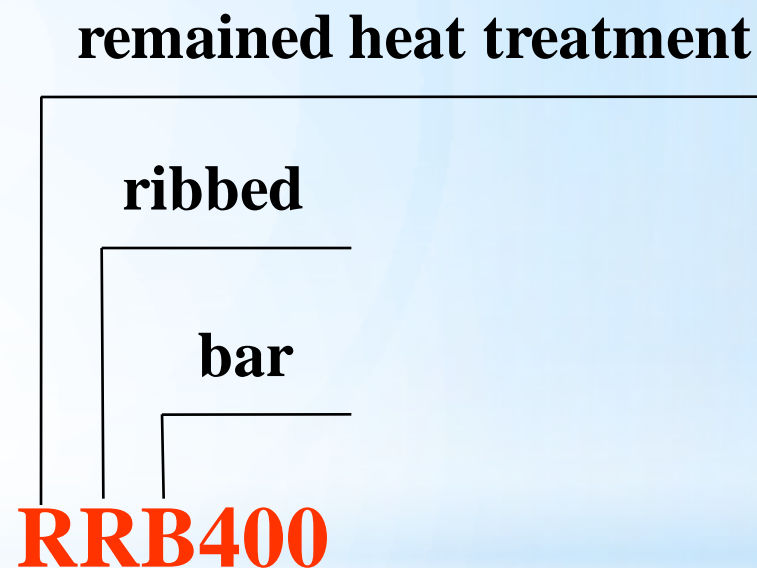
牌号	抗拉强度设计值 f_y	抗压强度设计值 f'_y
HPB300	270	270
HRB335、HRBF335	300	300
HRB400、HRBF400、RRB400	360	360
HRB500、HRBF500	435	435

◆ 热轧钢筋的符号说明



1 钢筋的种类及符号说明

✦ 热轧钢筋的符号说明





预应力钢筋的屈服强度标准值

种类		符号	公称直径 d (mm)	屈服强度 标准值 f_{pyk}	极限强度标准值 f_{pk}	
中强度预应力 钢丝	光面	Φ^{PM}	5、7、9	620	800	
	螺旋肋	Φ^{HM}		780	970	
				980	1270	
预应力螺纹钢 筋	螺纹	Φ^T	18、25、 32、 40、50	785	980	
				930	1080	
				1080	1230	
消除应力钢丝	光面	Φ^P	5	1380	1570	
				1640	1860	
	螺旋肋	Φ^H	7	1380	1570	
				9	1290	1470
					1380	1570
				钢绞线	1×3 (三股)	Φ^S
1670	1860					
1760	1960					
1×7 (七股)	9.5、12.7、 15.2、17.8	1540	1720			
		1670	1860			
		1760	1960			
21.6		1590	1770			
		1670	1860			

1 钢筋的种类及符号说明

◆ 预应力钢筋的符号说明

ϕ^{PM} 中强度预应力钢丝 PM——Plain

ϕ^{HM} 中强度预应力钢丝 HM——Helix

ϕ^P 消除应力钢丝 P——Plain

ϕ^H 消除应力钢丝 H——Helix

ϕ^S 钢绞线 S——Strand

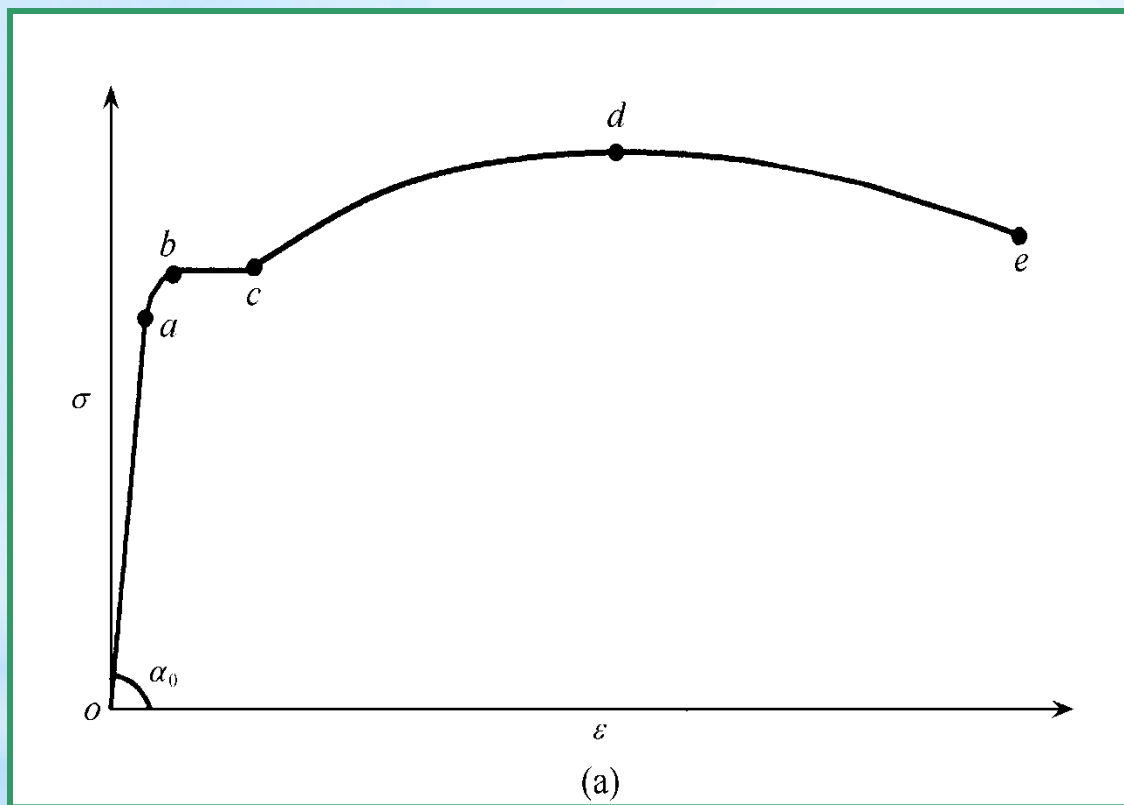
ϕ^T 预应力螺纹钢筋 T

预应力钢筋的屈服强度设计值

表 4.2.3-2 预应力筋强度设计值 (N/mm²)

种类	f_{ptk}	抗拉强度设计值 f_{py}	抗压强度设计值 f'_{py}
中强度预应力钢丝	800	510	410
	970	650	
	1270	810	
消除应力钢丝	1470	1040	410
	1570	1110	
	1860	1320	
钢绞线	1570	1110	390
	1720	1220	
	1860	1320	
	1960	1390	
预应力螺纹钢筋	980	650	435
	1080	770	
	1230	900	

2 软钢的应力—应变曲线



a ——比例极限

b ——弹性极限

d ——极限抗拉强度

e ——极限应变

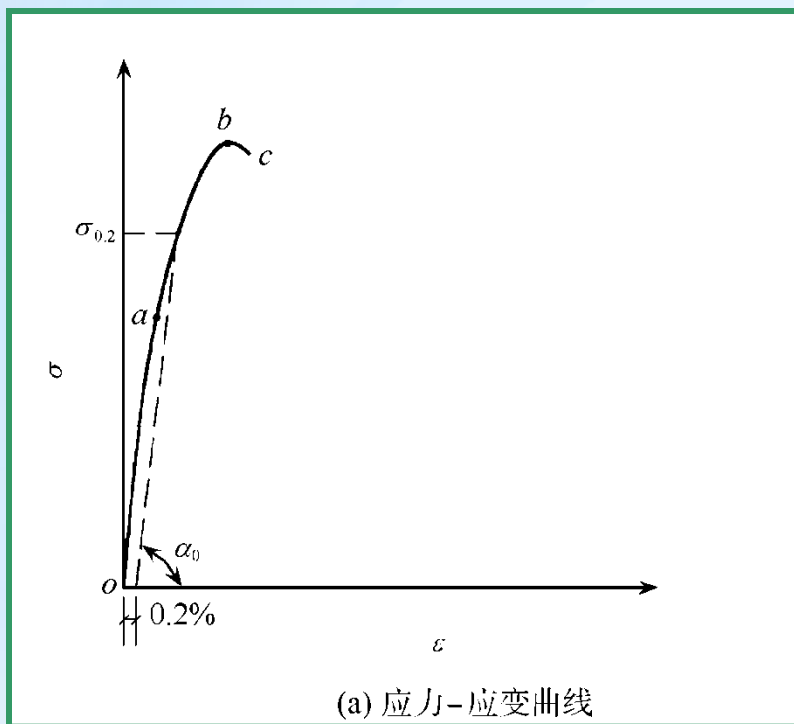
ob ——弹性阶段

bc ——屈服阶段

cd ——强化阶段

de ——破坏阶段

3 硬钢的应力—应变曲线



d —— 极限抗拉强度

e —— 极限应变

◆ 条件屈服强度:

取残余应变为0.2%时的应力 ($\sigma_{0.2}$) 作为无明显流幅钢筋的强度限值, 通常称为**条件屈服强度**。《规范》取

$$\sigma_{0.2} = 0.85\sigma_b$$

4 钢筋的变形性能

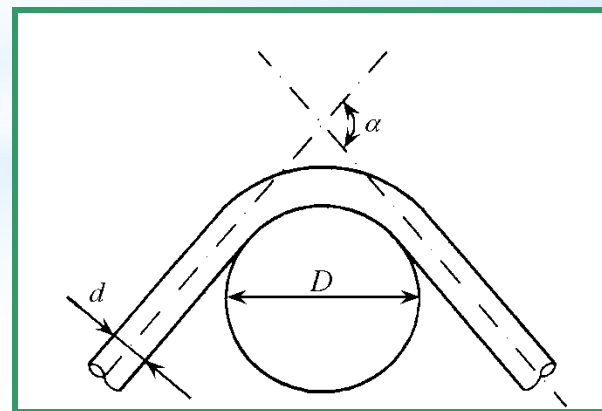
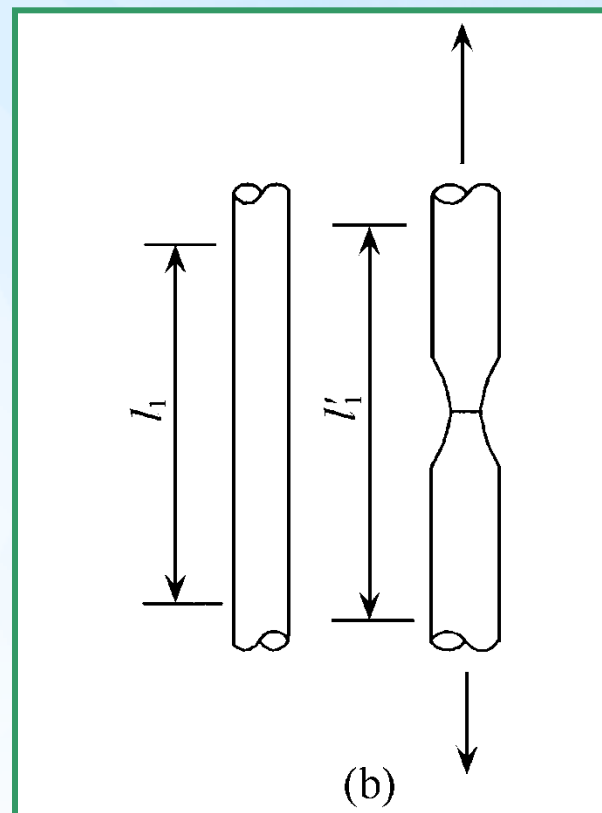
(1) 延伸率:

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

延伸率越大，钢筋的**塑性**和**变形能力**越好。

(2) 冷弯性能:

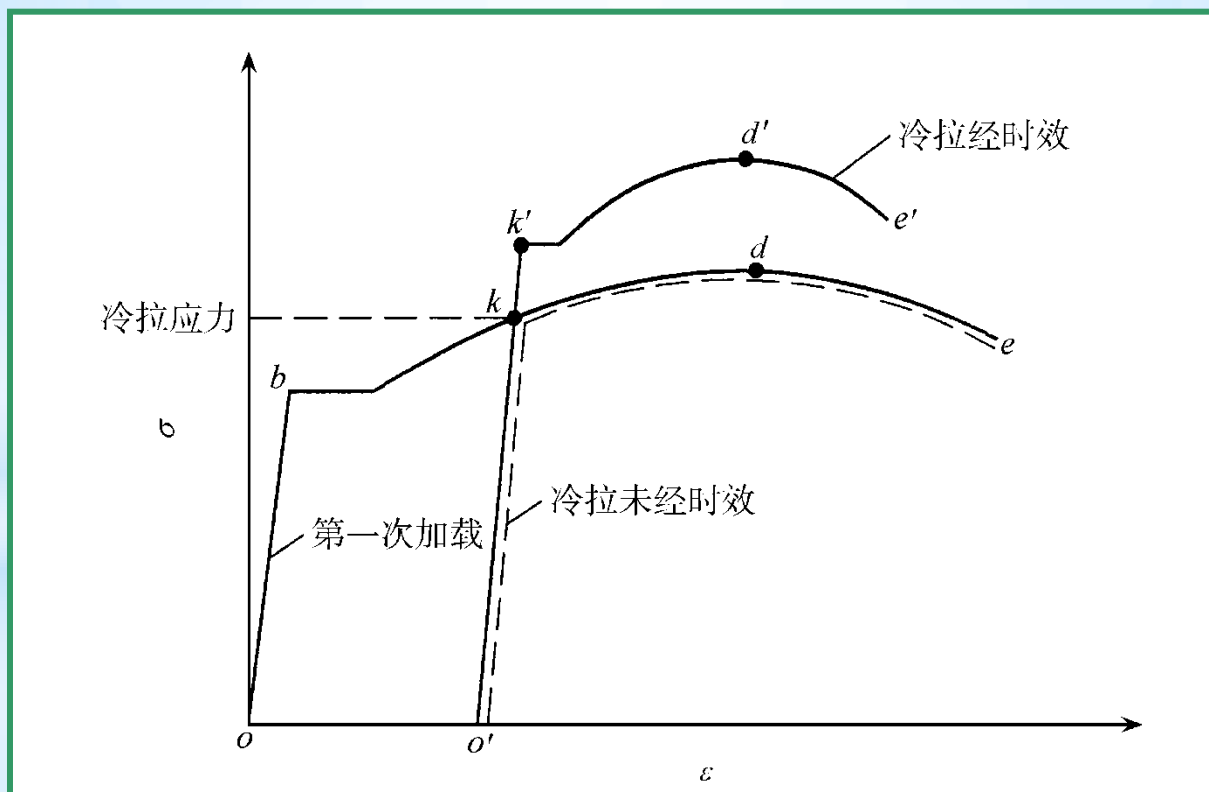
弯心**直径**越小，弯过的**角度**越大，冷弯性能越好，钢筋的**塑性**性能越好。



5 钢筋的冷加工

冷拉:

在常温下用机械方法将有明显流幅的钢筋拉到超过屈服强度的某一应力值，然后卸载至零。

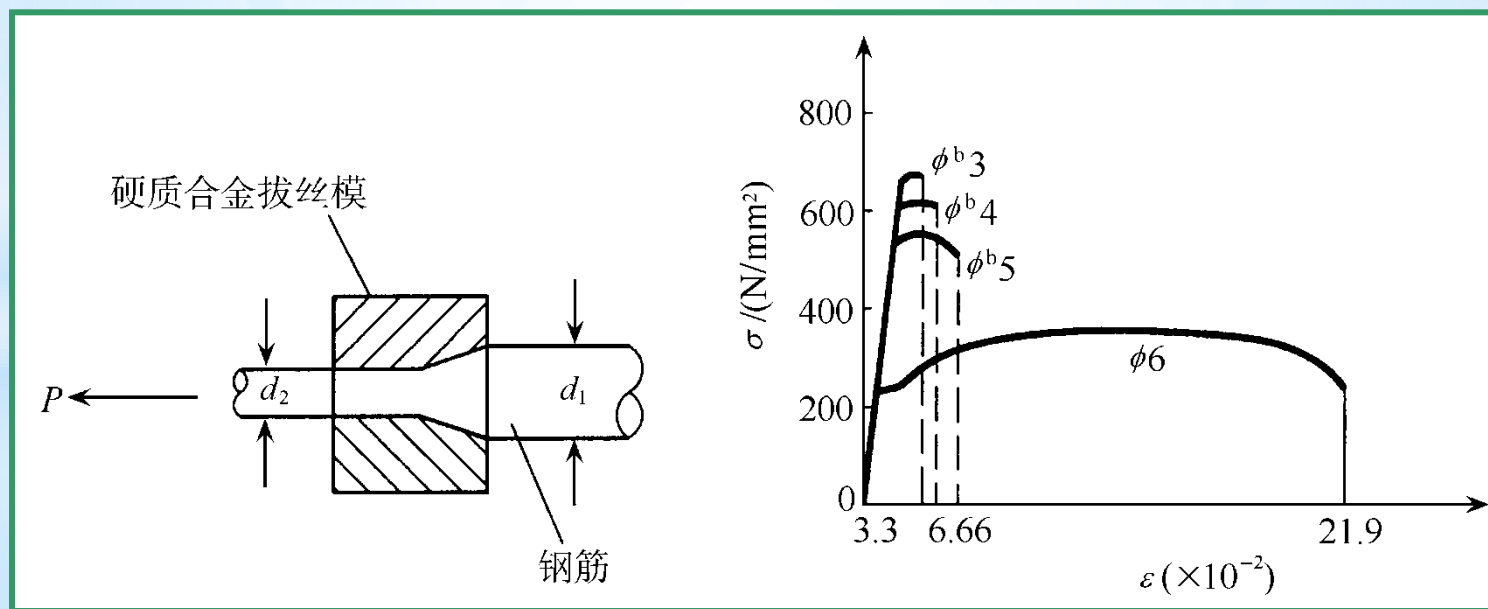


5 钢筋的冷加工

冷拔:

将**HPB235**级热轧钢筋**强行**拔过小于其直径的**硬质合金拔丝模具**。

经过几次冷拔的钢丝，抗拉、抗压**强度均**大大提高，但**塑性**降低。



6 混凝土结构对钢筋性能的要求

钢筋的屈服强度是构件承载力计算的依据。

- (1) 适当的强度和屈强比，保证构件具有一定的**强度储备**。
- (2) 足够的塑性，避免发生**脆性破坏**。
- (3) 可焊性，要求钢筋具备良好的**焊接性能**。
- (4) 耐久性和耐火性，必要的混凝土保护层厚度以满足对构件**耐火极限**的要求。
- (5) 与混凝土具有良好的**粘结**。
- (6) 寒冷地区，防止钢筋**低温冷脆**导致破坏。

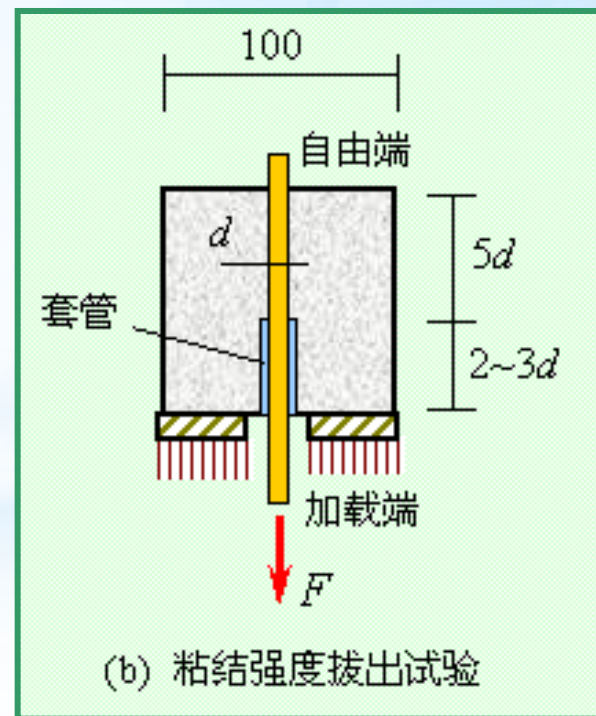
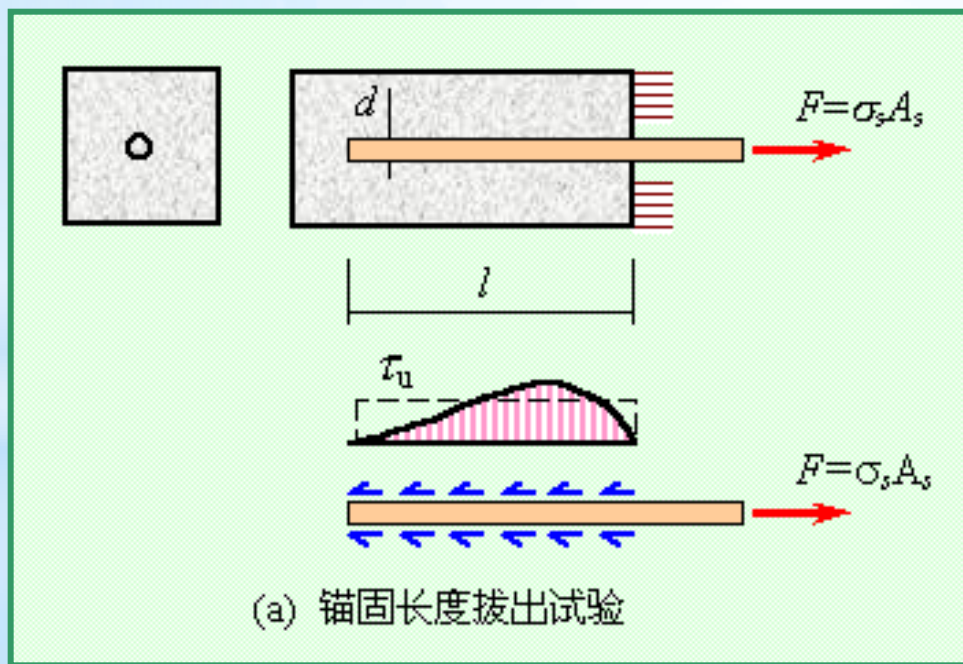
2.3 钢筋与混凝土之间的粘结

1 粘结应力的定义

钢筋与混凝土接触面上产生的沿钢筋纵向的剪应力。

✦ **粘结强度**：粘结失效时的最大粘结应力。

✦ **拔出试验**：



2 粘结应力的组成

- ✦ 钢筋与混凝土表面的**化学胶着力**；
- ✦ 钢筋与混凝土接触面的**摩擦力**；
- ✦ 钢筋与混凝土表面凹凸不平的**机械咬合力**。

3 粘结破坏机理

(1) 光圆钢筋的粘结破坏：

粘结作用在钢筋与混凝土间出现相对滑移前主要取决于化学胶着力，发生滑移后则由摩擦力和机械咬合力提供。

(2) 变形钢筋的粘结破坏：

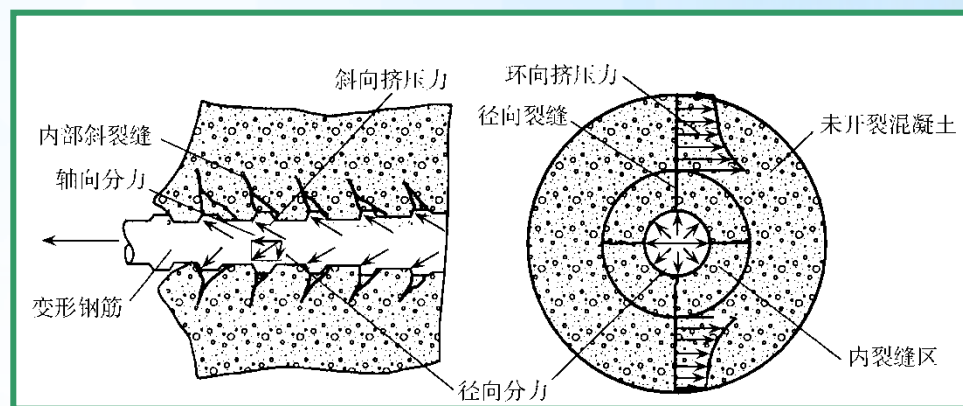
- ▶ 粘结强度仍由胶着力、摩擦力和机械咬合力组成。但主要为机械咬合力。
- ▶ 钢筋开始滑移后，粘结力主要由钢筋凸肋对混凝土的斜向挤压力和界面上的摩擦力组成。
- ▶ 若钢筋外围混凝土很薄且没有环向箍筋约束，形成纵向劈裂裂缝，沿钢筋纵向产生劈裂破坏。

3 粘结破坏机理

▶若有环向箍筋约束混凝土的变形，纵向劈裂裂缝的发展受到限制，最后钢筋沿肋外径的圆柱面出现**整体滑移**，发生**刮犁式破坏**（剪切破坏）。

4 影响**粘结强度**的因素

- ① 混凝土的强度；
- ② 横向配筋的数量；
- ③ 钢筋的外形；
- ④ 混凝土的保护层厚度及钢筋间距；
- ⑤ 锚固区的横向压力；
- ⑥ 侧向压应力。



2.4 钢筋的锚固与搭接

✦ 锚固：

通过混凝土中**钢筋埋置段**或**机械措施**将钢筋所受的力传给混凝土。

➤ 受拉钢筋基本**锚固长度**：
$$l_{ab} = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \quad l_{ab} = \alpha \frac{f_{py}}{f_t} d$$

式中： l_{ab} ——受拉钢筋的基本锚固长度；

f_y 、 f_{py} ——普通钢筋、预应力筋的抗拉强度设计值；

f_t ——混凝土轴心抗拉强度设计值，当混凝土强度等级高于 C60 时，按 C60 取值；

d ——锚固钢筋的直径；

α ——锚固钢筋的外形系数，按表 8.3.1 取用。

2.4 钢筋的锚固与搭接

✦ 锚固：

通过混凝土中**钢筋埋置段**或**机械措施**将钢筋所受的力传给混凝土。

➤ 受拉钢筋基本**锚固长度**： $l_{ab} = \alpha \frac{f_y}{f_t} d$ $l_{ab} = \alpha \frac{f_{py}}{f_t} d$

表 3.1 锚固钢筋的外形系数 α

钢筋类型	光面钢筋	带肋钢筋	螺旋肋钢丝	三股钢绞线	七股钢绞线
α	0.16	0.14	0.13	0.16	0.17

注：光面钢筋末端应做 180° 弯钩，弯后平直段长度不应小于 3 d ，但作受压钢筋时可不做弯钩。

2.4 钢筋的锚固与搭接

▶ 受拉钢筋锚固长度为： $l_a = \zeta_a l_{ab}$ ，且不小于200mm。

ζ_a ——锚固长度修正系数，按本规范第 8.3.2 条的规定取用，当多于一项时，可接连乘计算，但不应小于 0.6。

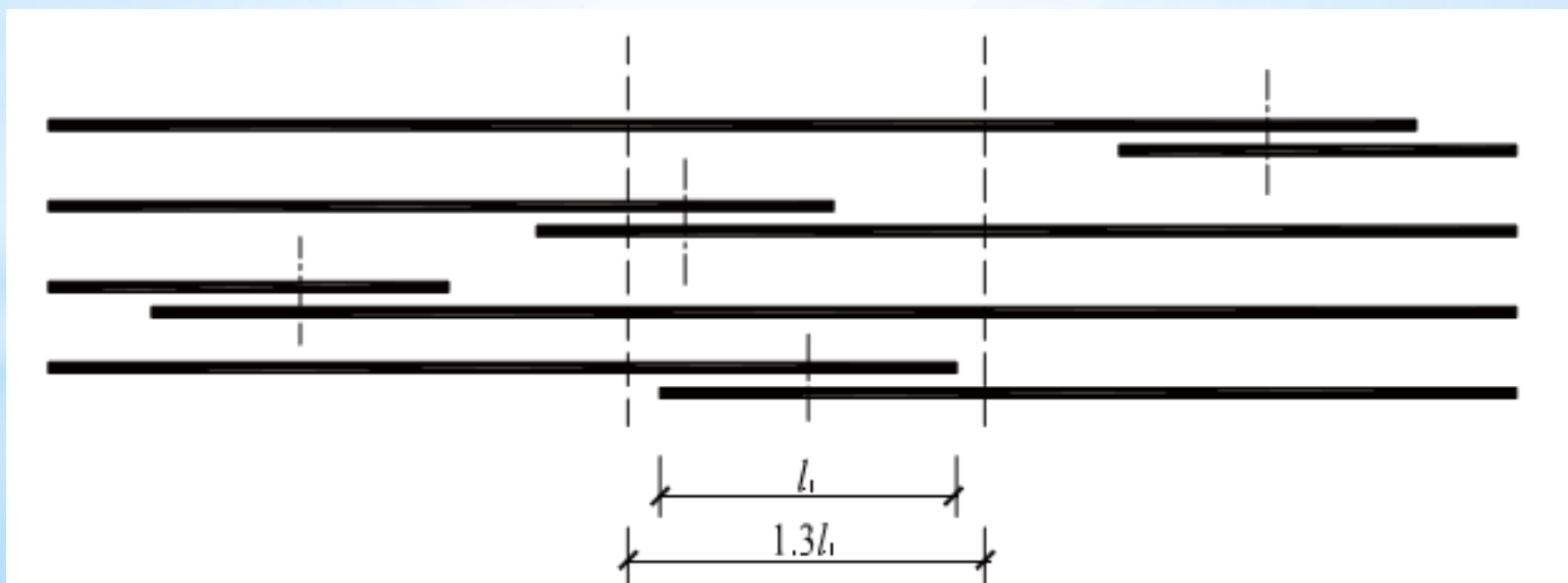
8.3.2 纵向受拉普通钢筋的锚固长度修正系数 ζ_a 应根据钢筋的锚固条件按下列规定取用：

- 1 当带肋钢筋的公称直径大于 25mm 时取 1.10；
- 2 环氧树脂涂层带肋钢筋取 1.25；
- 3 施工过程中易受扰动的钢筋取 1.10；
- 4 当纵向受力钢筋的实际配筋面积大于其设计计算面积时，修正系数取设计计算面积与实际配筋面积的比值，但对有抗震设防要求及直接承受动力荷载的结构构件，不应考虑此项修正；
- 5 锚固区保护层厚度为 $3d$ 时修正系数可取 0.80，保护层厚度为 $5d$ 时修正系数可取 0.70，中间按内插取值，此处 d 为纵向受力带肋钢筋的直径。

- * 为反映粗直径带肋钢筋相对肋高减小对锚固作用降低的影响，直径大于25mm的粗直径带肋钢筋的锚固长度应适当加大，乘以修正系数1.10。
- * 为反映环氧树脂涂层钢筋表面光滑状态对锚固的不利影响，其锚固长度应乘以修正系数1.25。
- * 为反映施工扰动对钢筋锚固作用的不利影响，取修正系数1.10。
- * 配筋设计时实际配筋面积往往因构造原因大于计算值，故钢筋实际应力通常小于强度设计值。因此受力钢筋的锚固长度可以按比例缩短，修正系数取决于配筋裕量的数值。但其适用范围有一定限制：不应用于抗震设计及直接承受动力荷载结构中的受力钢筋锚固。
- * 锚固钢筋常因外围混凝土的纵向劈裂而削弱锚固作用，当混凝土保护层厚度较大时，握裹作用加强，锚固长度可以减短。根据工程实践经验，当保护层厚度大于锚固钢筋直径的3倍时，可乘修正系数0.80；保护层厚度大于锚固钢筋直径的5倍时，可乘修正系数0.70；中间情况插值。

✦ 钢筋的连接

- **原则：混凝土结构中受力钢筋的连接接头宜设置在受力较小处。在同一根受力钢筋上宜少设接头。在结构的重要构件和关键传力部位，纵向受力钢筋不宜设置连接接头。**
- **同一构件中相邻纵向受力钢筋的绑扎搭接接头宜互相错开。**



- * 纵向受拉钢筋绑扎搭接接头的搭接长度，应根据位于同一连接区段内的钢筋搭接接头面积百分率按下列公式计算，且不应小于300mm。

$$l_l = \zeta_l l_a$$

式中： l_l ——纵向受拉钢筋的搭接长度；

ζ_l ——纵向受拉钢筋搭接长度的修正系数，按表 8.4.4 取用。当纵向搭接钢筋接头面积百分率为表的中间值时，修正系数可按内插取值。

表 8.4.4 纵向受拉钢筋搭接长度修正系数

纵向搭接钢筋接头面积百分率(%)	≤25	50	100
ζ_l	1.2	1.4	1.6

- * 纵向受拉钢筋绑扎搭接接头的搭接长度，应根据位于同一连接区段内的钢筋搭接接头面积百分率按下列公式计算，且不应小于300mm。

$$l_l = \zeta_l l_a$$

式中： l_l ——纵向受拉钢筋的搭接长度；

ζ_l ——纵向受拉钢筋搭接长度的修正系数，按表 8.4.4 取用。当纵向搭接钢筋接头面积百分率为表的中间值时，修正系数可按内插取值。

- * 构件中的纵向受压钢筋当采用搭接连接时，其受压搭接长度不应小于本规范第8.4.4条纵向受拉钢筋搭接长度的0.7倍，且不应小于200mm。

***混凝土保护层厚度的定义：从最外层钢筋（包括箍筋、构造筋、分布筋等）的外缘到最近的混凝土外边缘的距离。**

- 1 构件中受力钢筋的保护层厚度不应小于钢筋的直径 d 。
- 2 设计使用年限为 50 年的混凝土结构，最外层钢筋的保护层厚度应符合表 8.2.1 的规定；设计使用年限为 100 年的混凝土结构，应符合本规范第 3.5.4 条的规定。

表 8.2.1 混凝土保护层的最小厚度 c ()

环境等级	板 墙 壳	梁 柱
一	15	20
二 a	20	25
二 b	25	35
三 a	30	40
三 b	40	50

注：1 混凝土强度等级不大于 C25 时，表中保护层厚度数值应增加 5mm；

- 2 钢筋混凝土基础宜设置混凝土垫层，其受力钢筋的混凝土保护层厚度应从垫层顶面算起，且不应小于 40mm。

- * 混凝土保护层厚度不小于受力钢筋直径（单筋的公称直径或并筋的等效直径）的要求，是为了保证握裹层混凝土对受力钢筋的锚固。
- * 从混凝土碳化、脱钝和钢筋锈蚀的耐久性角度考虑，以最外层钢筋（包括箍筋、构造筋、分布筋等）的外缘计算混凝土保护层厚度。因此本次修订后的保护层实际厚度比原规范实际厚度普遍加大。
- * 根据第3.5节对结构所处耐久性环境类别的划分，调整混凝土保护层厚度的数值。对一般情况下混凝土结构的保护层厚度稍有增加；而对恶劣环境下的保护层厚度增幅较大。
- * 根据混凝土碳化反应的差异和构件的重要性，按平面构件（板、墙、壳）及杆状构件（梁、柱）分两类确定保护层厚度；表中不再列入强度等级的影响，C30以上统一取值，C25及以下均增加5mm。
- * 考虑碳化速度的影响，使用年限100年的结构，保护层厚度取1.4倍。
- * 为保证基础钢筋的耐久性，根据工程经验基础底面要求做垫层，基底保护层厚度仍取40mm。