



新疆大学

混凝土结构 设计原理





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

2.2 钢筋的物理力学性能

2.3 混凝土与钢筋的粘结



2.1 混凝土的物理力学性能



2.1.1 单轴向应力状态下的混凝土强度

❖ 立方体抗压强度（强度等级）

1. 标准尺寸： $150\text{mm} \times 150\text{mm} \times 150\text{mm}$
2. 养护条件： $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $\geq 90\%$ ；28d
3. 加荷方法：加荷速度 $0.15 \sim 0.25\text{MPa/s}$ ，
垫板不涂油或垫橡胶板。
4. 强度保证率：95%， $f = \mu - 1.645\sigma$



2.1 混凝土的物理力学性能



5. 非标准试块强度换算系数:

200mm × 200mm × 200mm: 1.05;

100mm × 100mm × 100mm: 0.95。

6" × 12" 圆柱体: 1.20 (1" = 2.54cm)

6" × 12" 棱柱体: 1.32

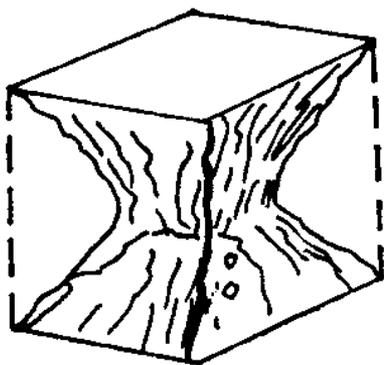
6. 分级: C15, C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50, C55, C60, C65, C70, C75, C80 (高强混凝土), 共14个等级。

C—Concrete, 单位: N/mm²或MPa。

混凝土结构设计原理精品课程

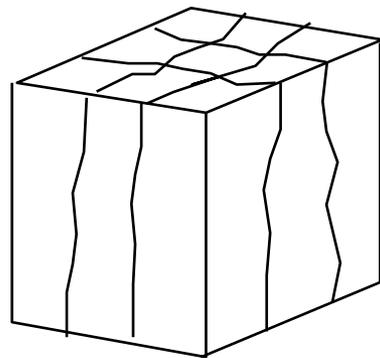
2.1 混凝土的物理力学性能

混凝土的破坏机理



不涂润滑剂

>



涂润滑剂

≈



2.1 混凝土的物理力学性能





2.1 混凝土的物理力学性能



加载前



加载过程中

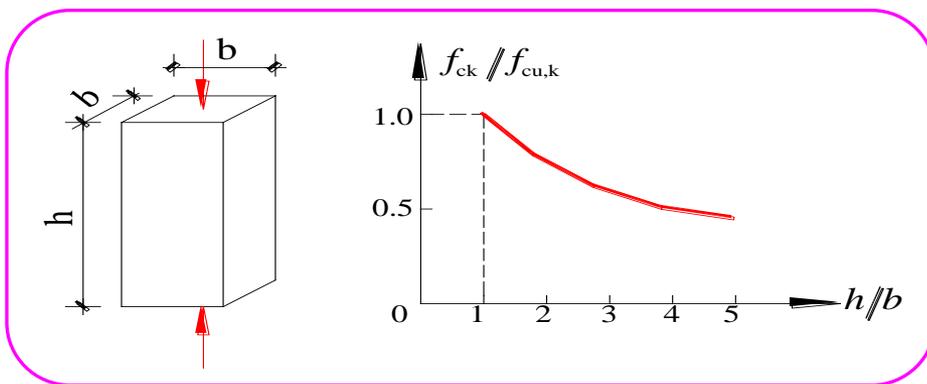


破坏



2.1 混凝土的物理力学性能

❖ 轴心抗压强度



$$f_{ck} = 0.88\alpha_{c1}\alpha_{c2}f_{cu,k}$$

混凝土强度与试块混凝土强度的修正系数

棱柱体强度与立方体强度之比值

脆性影响系数

2.1 混凝土的物理力学性能

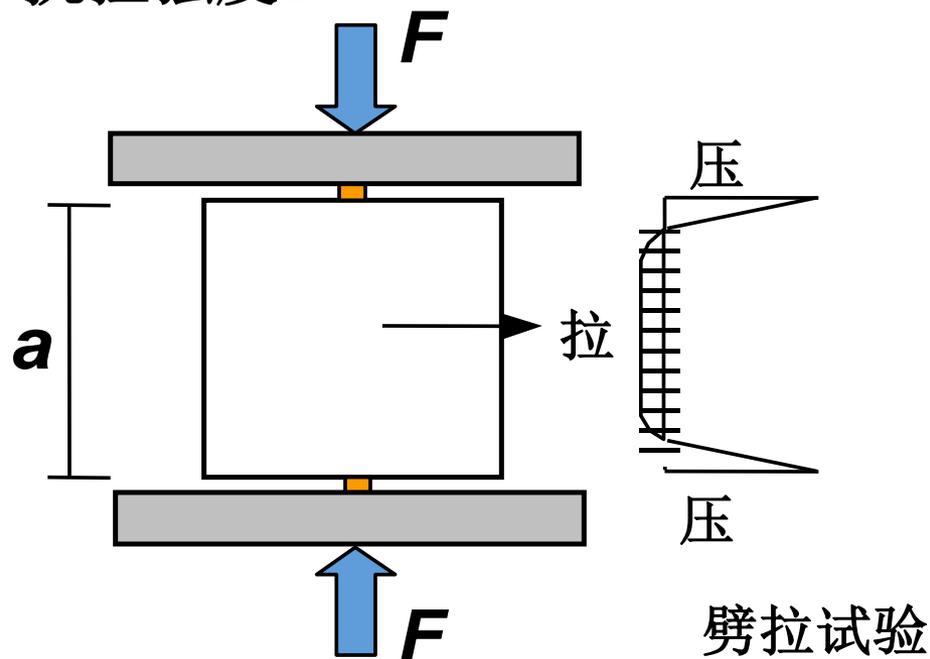
α_{c1} 和 α_{c2} 值

混凝土 强度 等级	\leq C40	C45	C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
α_{c1}	0.76	0.76	0.76	0.77	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82
α_{c2}	4.00	0.984	0.968	0.951	0.935	0.919	0.903	$\frac{0.88}{7}$	0.87

2.1 混凝土的物理力学性能

❖ 轴心抗拉强度

混凝土的轴心抗拉强度可以采用直接轴心受拉的试验方法来测定，但由于试验比较困难，目前国内外主要采用圆柱体或立方体的劈裂试验来间接测试混凝土的轴心抗拉强度。



$$f_{sp} = \frac{2F}{\pi \cdot a^2}$$

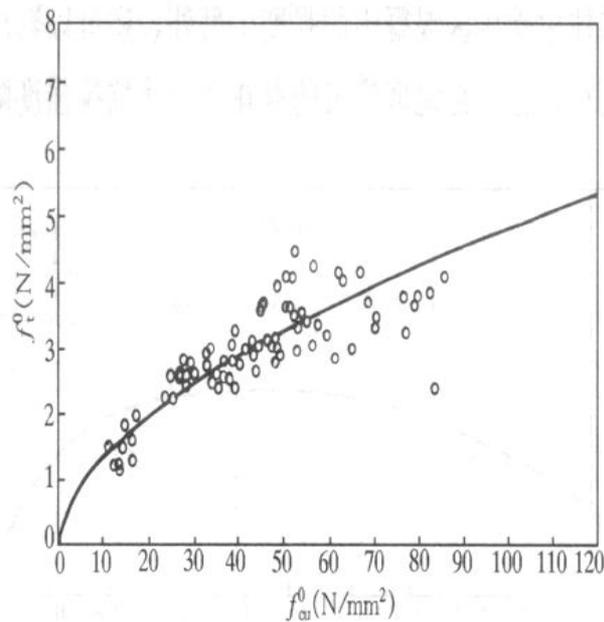
2.1 混凝土的物理力学性能

轴心抗拉强度与
立方体抗压强度
的折算系数

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

试验离散性的
影响系数

试验离散
性系数



混凝土轴心抗拉强度与立方体抗压强度的关系



2.1 混凝土的物理力学性能



2.1.2 复合应力状态下的混凝土强度

在平面应力状态下，当两方向应力均为压应力时，抗压强度相互提高，最大可增加**27%**，而当一方向为压应力，另一方向为拉应力时，强度相互降低。

当压应力不太高时，其存在可提高混凝土的抗剪强度，拉应力的存在会降低混凝土的抗剪强度。剪应力的存在降低混凝土的抗压和抗拉强度。

侧向压应力的存在可提高混凝土的抗压强度，关系为：

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

式中

f'_{cc} ——被约束混凝土的轴心抗压强度；

f'_c ——非约束混凝土的轴心抗压强度；

f_l ——侧向约束压应力。

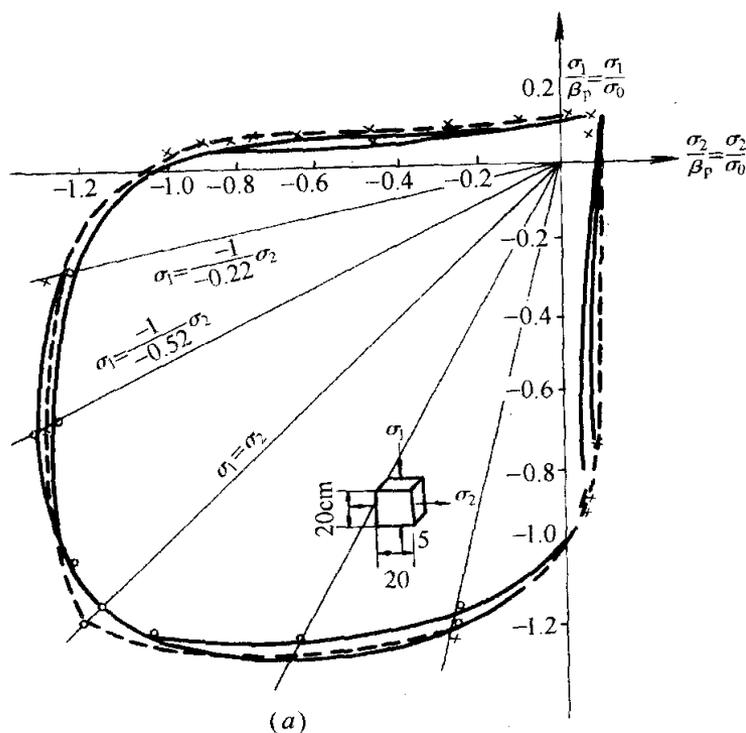
侧向压应力的存在还可提高混凝土的延性。

2.1 混凝土的物理力学性能

实际结构中，混凝土很少处于单向受力状态。

更多的是处于双向或三向受力状态。

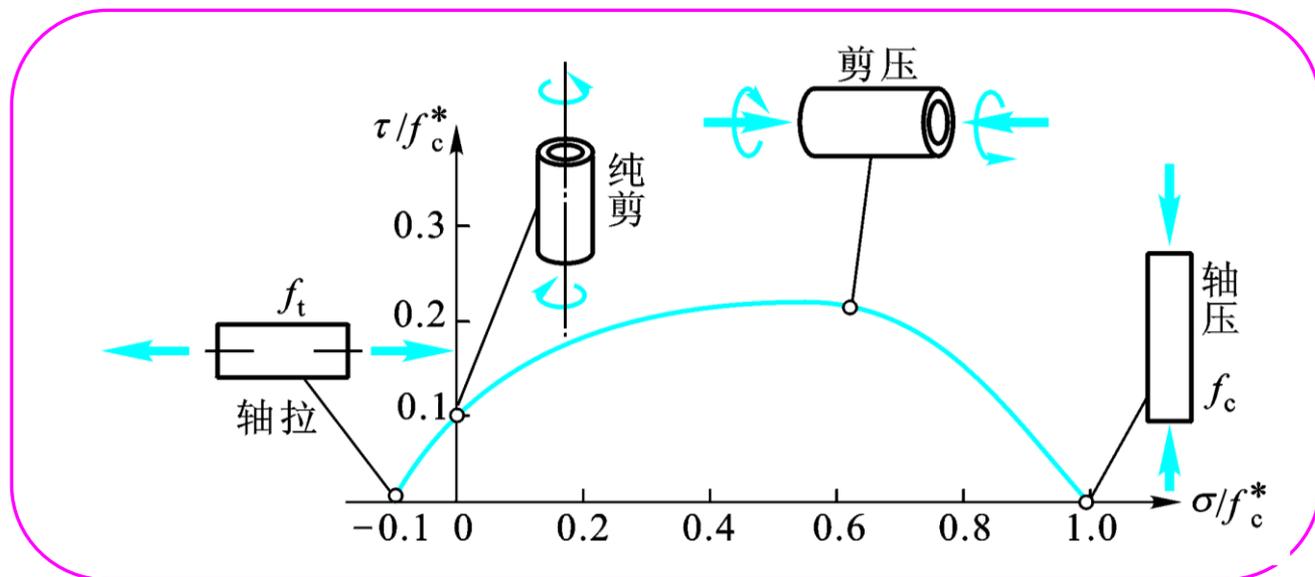
◆ 双轴应力状态



双向受压强度大于单向受压强度，最大受压强度发生在两个压应力之比为0.3~0.6之间，约 $(1.25 \sim 1.60) f_c$ 。双轴受压状态下混凝土的应力-应变关系与单轴受压曲线相似，但峰值应变均超过单轴受压时的峰值应变。

2.1 混凝土的物理力学性能

构件受剪或受扭时常遇到剪应力 t 和正应力 s 共同作用下的复合受力情况。



拉-剪：抗拉、抗剪强度都降低；

压-剪：当 $\sigma / f_c \leq 0.6$ 时，抗剪强度随压应力提高而增大；

当 $\sigma / f_c > 0.6$ 时，内部裂缝增加，抗剪抗压强度均降低。

混凝土结构设计原理精品课程



2.1 混凝土的物理力学性能



◆ 三轴应力状态

三轴应力状态有多种组合，实际工程遇到较多的螺旋箍筋柱和钢管混凝土柱中的混凝土为三向受压状态。三向受压试验一般采用圆柱体在等侧压条件进行。

由试验得到的经验公式为：

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

式中

f'_{cc} ——被约束混凝土的轴心抗压强度；

f'_c ——非约束混凝土的轴心抗压强度；

f_l ——侧向约束压应力。

侧向压应力的存在还可提高混凝土的延性。

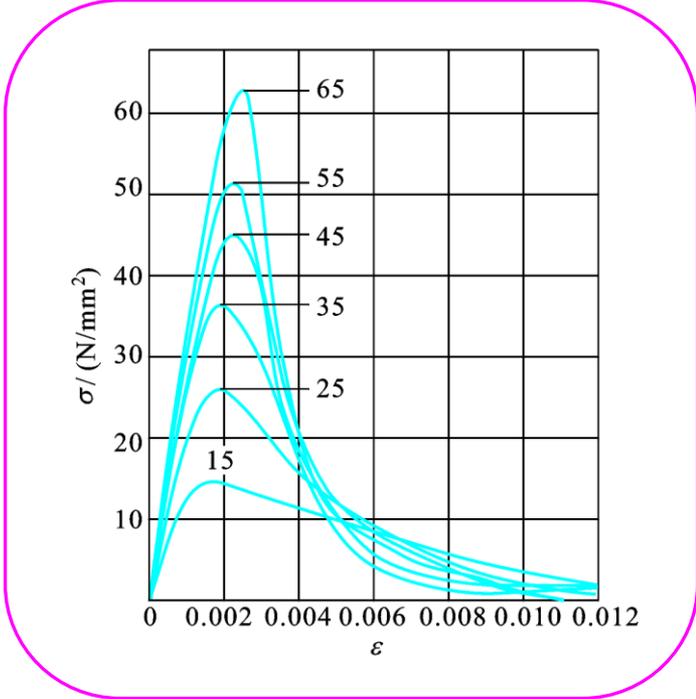
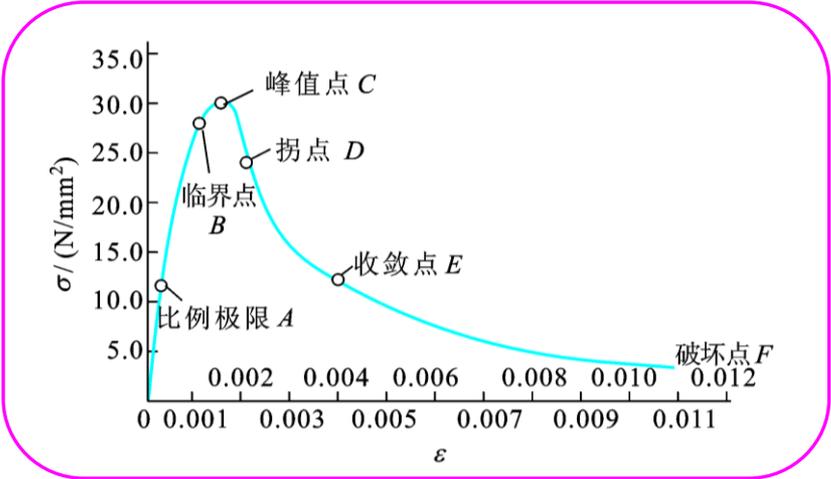
混凝土结构设计原理精品课程



2.1 混凝土的物理力学性能

2.1.3 混凝土的变形

❖ 一次加载时

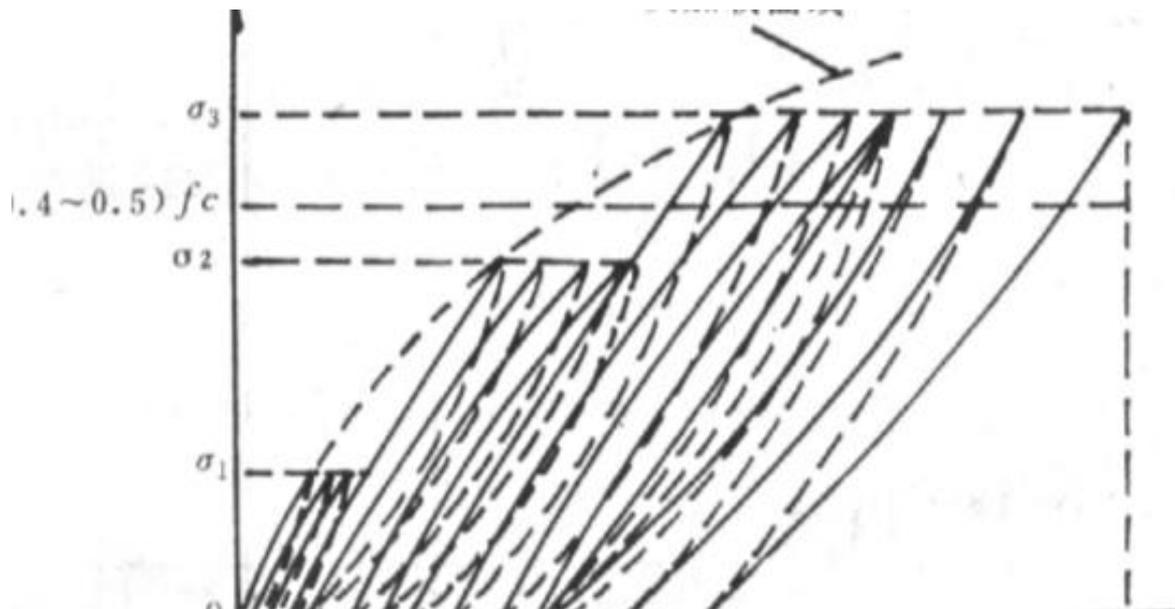


- 0→A:近似弹性
- A→B:非线性
- B→C:体积增大
- C→F:破坏

高强混凝土: $\nearrow \epsilon_0 \searrow \epsilon_{cu}$

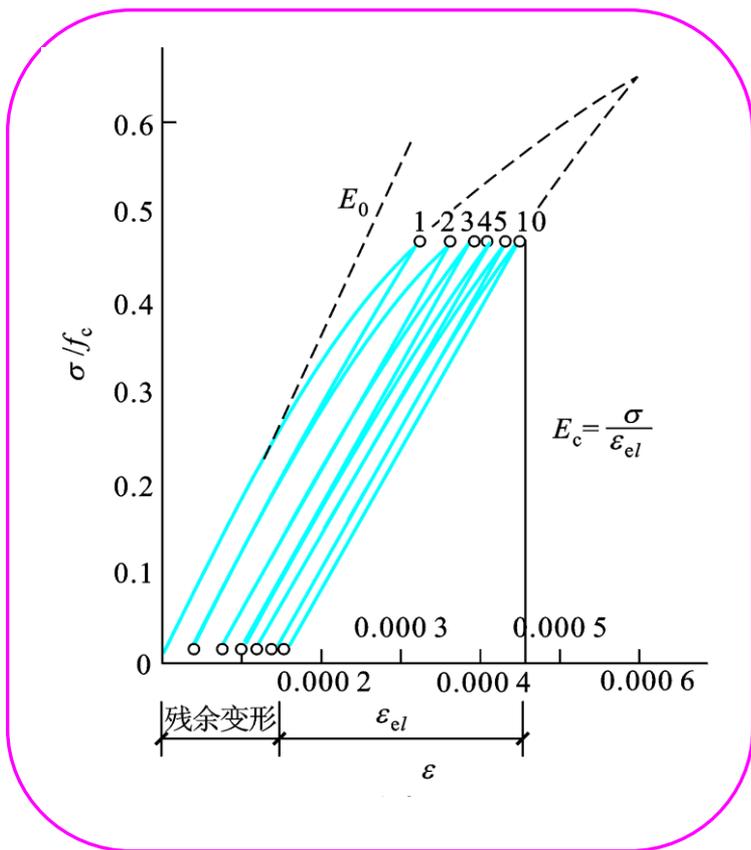
2.1 混凝土的物理力学性能

❖ 多次加载:



2.1 混凝土的物理力学性能

弹性模量



割线模量。棱柱体试件。

受压：

$$E_c = \tan \alpha = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}}}$$

受拉： $E_c' = 0.5 E_c$

剪切模量： $G_c = 0.4 E_c$

泊松比 = 横向应变/纵向应变

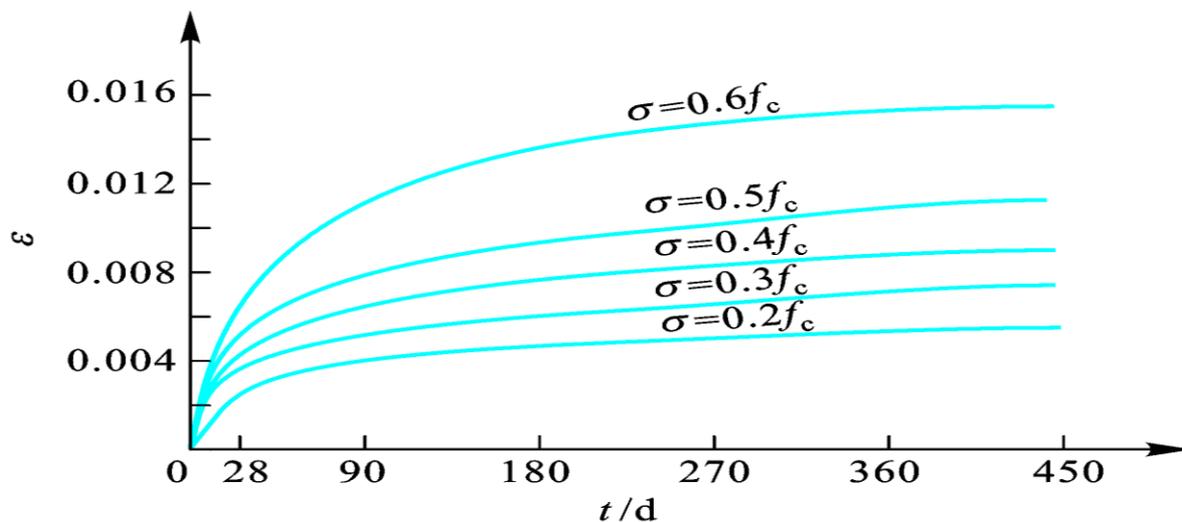
$$= 0.2$$

2.1 混凝土的物理力学性能

❖ 徐变

定义：在荷载保持不变的情况下，变形随时间推移继续增大的现象。

特点：早期发展快，但可以延续数年。





2.1 混凝土的物理力学性能

影响因素： 加载时的混凝土龄期；
持续压力大小；
混凝土的组成材料及配合比；
混凝土的制作养护条件。

徐变对结构的影响：

- 使构件变形增大；
- 在轴压构件中，使钢筋应力增加，混凝土应力减小；
- 在预应力构件中，使预应力发生损失；
- 在超静定结构中，使内力发生重分布。

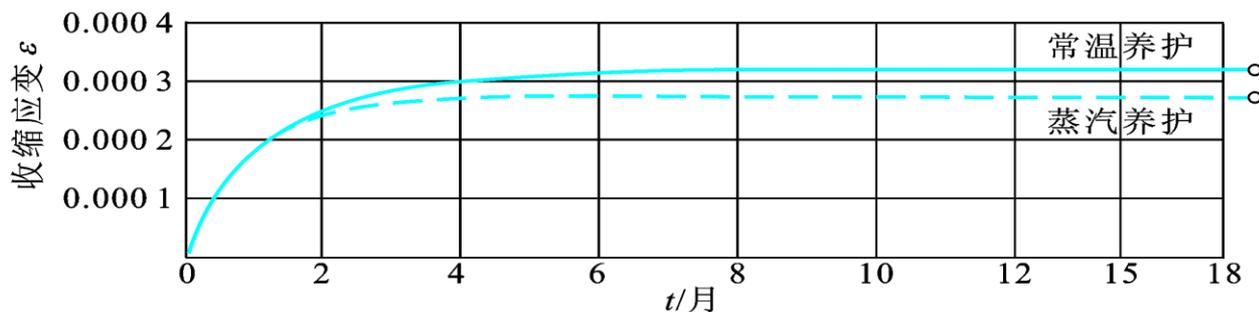
2.1 混凝土的物理力学性能

❖ 收缩

定义：混凝土在空气中结硬时体积减小的现象。

收缩率： 3×10^{-4} 。收缩=凝缩+干缩

特点：早期快，可延续1~2年。



试件尺寸 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$, $f_{\text{cu}}=42.3 \text{ N/mm}^2$

水灰比=0.45, 525号硅酸盐水泥

恒温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 恒温 $65 \pm 5^\circ\text{C}$



2.1 混凝土的物理力学性能

影响因素：

混凝土的组成及配合比，尤其是水灰比；
养护条件；使用时的温度与湿度。

收缩对结构的影响：

当收缩受到约束时，引起构件开裂。

减少收缩的措施：

限制水泥用量；减小水灰比；加强振捣和养护；
构造钢筋数量加强；设置变形缝；掺膨胀剂。



2.1 混凝土的物理力学性能

2.1.4 混凝土的疲劳

混凝土在重复荷载作用下的破坏称为**疲劳破坏**。

◆ 疲劳强度

混凝土的疲劳强度由疲劳试验测定。采用100mm×100mm×300mm 或者150mm×150mm×450mm的棱柱体，把棱柱体试件承受200万次或其以上循环荷载而发生破坏的压应力值称为**混凝土的疲劳抗压强度 f_f^c** 。

◆ 影响因素

施加荷载时的应力大小是影响应力-应变曲线不同的发展和变化的关键因素，即混凝土的疲劳强度与重复作用时应力变化的幅度有关。在相同的重复次数下，**疲劳强度随着疲劳应力比值的增大而增大**。

2.2 钢筋的物理力学性能

2.2.1 钢筋的种类

❖ 热轧钢筋

种 类	符号	$d/(m)$ m)	$f_{yk}/(N/mm^2)$
HPB235(Q235)	ϕ	8~20	235
HRB335(20MnSi)	Φ	6~50	335
HRB400(20MnSiV, 20MnSiNb,20MnTi)	Φ	6~50	400
RRB400(K20MnSi)	Φ^R	8~40	400

2.2 钢筋的物理力学性能

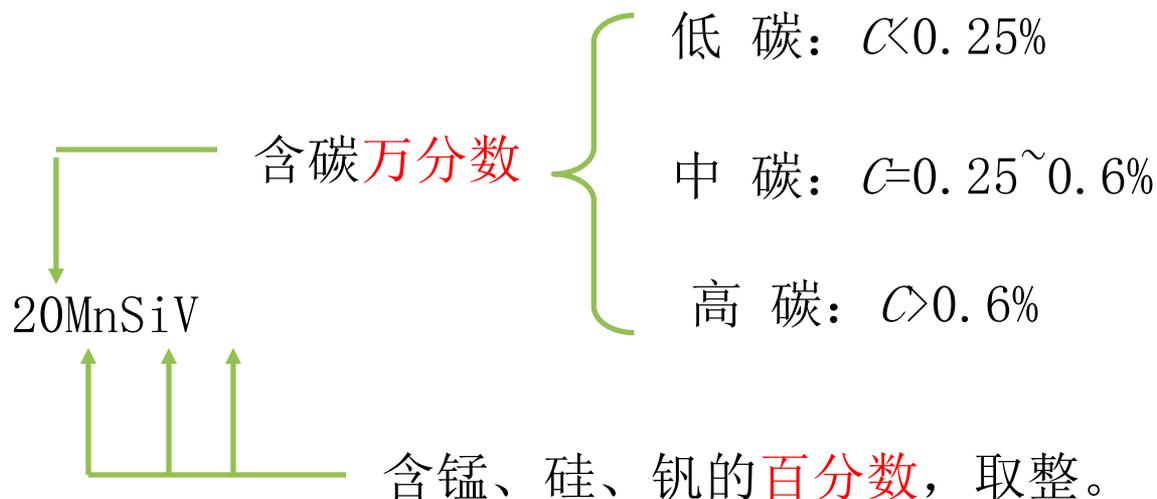
HPB — 热轧光面钢筋，桥梁规范用R表示；

HRB — 热轧带肋钢筋；

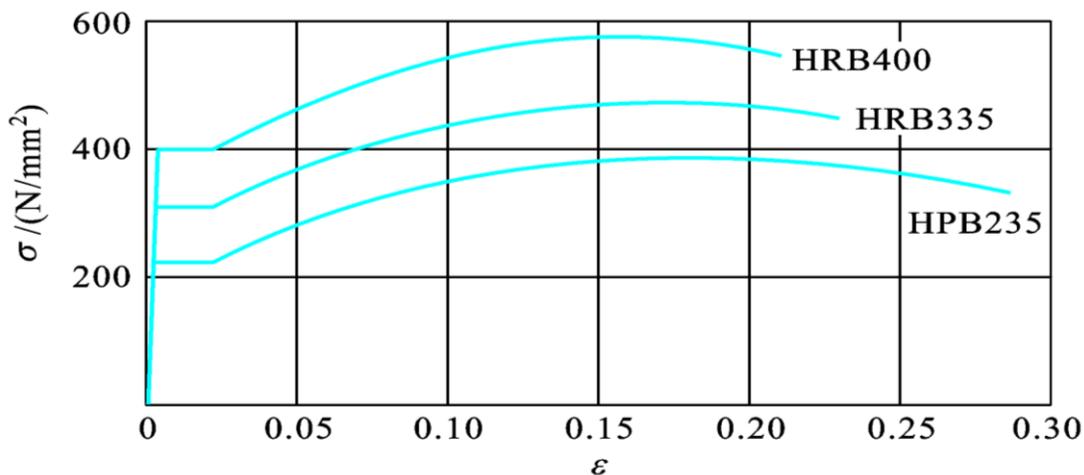
RRB — 余热处理钢，桥梁规范用KL表示。

Mn —— 锰， Si —— 硅， V —— 钒，

Nb —— 铌， Ti —— 钛， C —— 碳



2.2 钢筋的物理力学性能



❖ 中、高强钢丝、钢绞线

中强: $800 \sim 1370 \text{MPa}$

高强: $1470 \sim 1860 \text{MPa}$

} $\delta_{100} = 3.5\% \sim 4\%$

➤ 做预应力筋用。

2.2 钢筋的物理力学性能

❖ 热处理钢筋

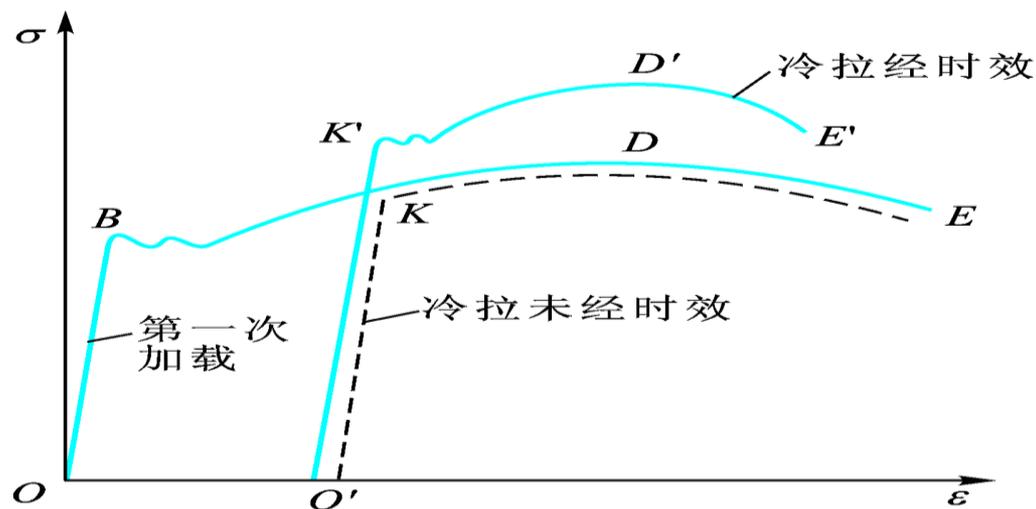
经淬火处理得， $f_{ptk}=1470\text{MPa}$ ，无明显屈服点。

❖ 冷加工钢筋

冷加工工艺：冷拉、冷拔、冷轧、冷轧扭。

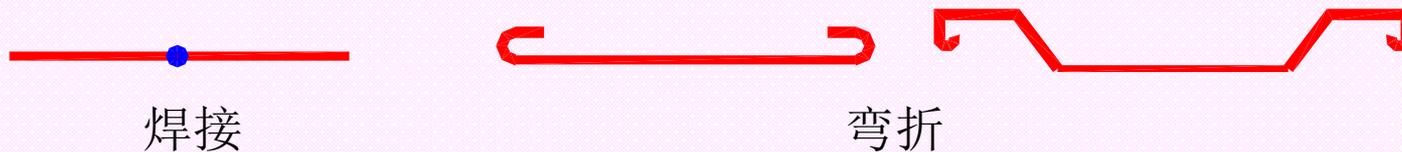
目的：提高强度，节约钢材。但塑性减小。

➤ 冷拉钢筋仍有屈服台阶。



2.2 钢筋的物理力学性能

❖ 可加工性好



❖ 与混凝土粘结锚固性好





2.2 钢筋的物理力学性能



❖ 钢筋的直径

$d=6\sim 50\text{mm}$

常用：6mm，6.5mm，8mm，8.2mm，10mm，12mm，14mm，16mm，18mm，20mm，22mm，25mm，28mm，32mm，36mm，40mm，50mm。其中，8.2mm仅适用有纵肋的热处理钢筋。

❖ 钢筋的选用

普通钢筋：宜用HRB400和HRB335钢筋

可用HPB235、RRB400和冷加工钢筋

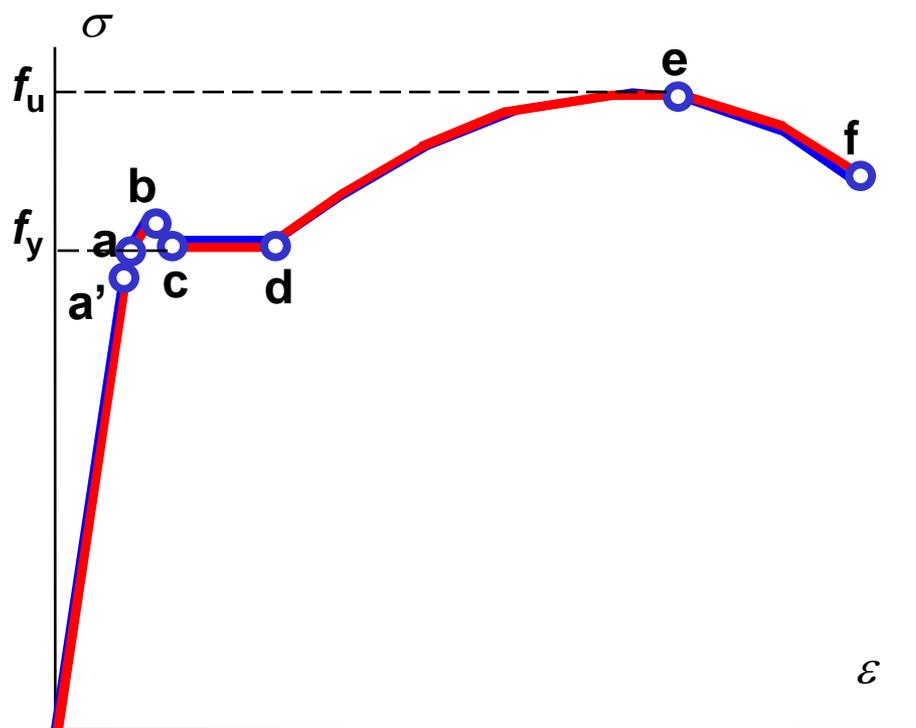
预应力筋：宜用钢绞线、钢丝

可用热处理钢筋和强度较高的冷加工钢筋

2.2 钢筋的物理力学性能

2.2.2 钢筋的强度与变形

有明显屈服点的钢筋



a' 为比例极限

oa为弹性阶段

b为屈服上限

c为屈服下限，即屈服强度 f_y

cd为屈服台阶

de为强化阶段

e为极限抗拉强度 f_u

ef为颈缩阶段

2.2 钢筋的物理力学性能

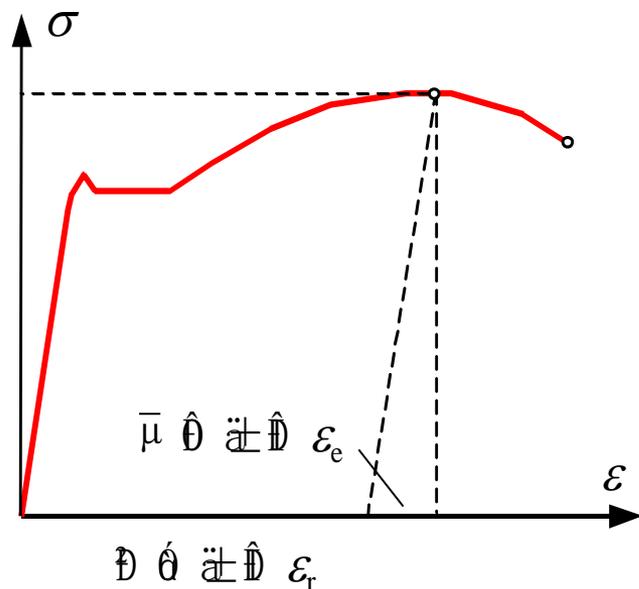
几个指标：

屈服强度：是钢筋强度的设计依据，因为钢筋屈服后将发生很大的塑性变形，且卸载时这部分变形不可恢复，这会使钢筋混凝土构件产生很大的变形和不可闭合的裂缝。屈服上限与加载速度有关，不太稳定，一般取屈服下限作为屈服强度。

延伸率：钢筋拉断后的伸长值与原长的比率，是反映钢筋塑性性能的指标。延伸率大的钢筋，在拉断前有足够预兆，延性较好。

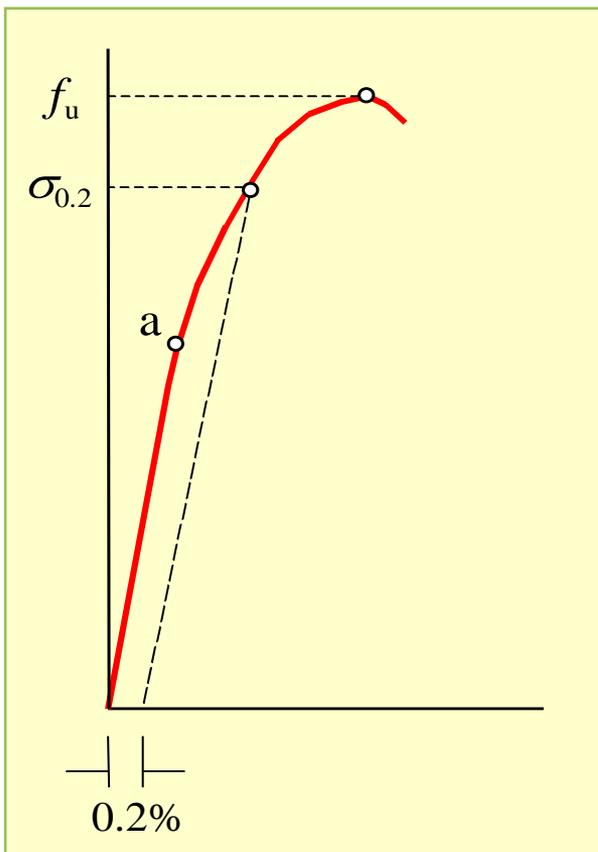
$$\delta_{5 \text{ or } 10} = \frac{l - l_0}{l_0}$$

屈强比：反映钢筋的强度储备， $f_y/f_u=0.6\sim 0.7$ 。



2.2 钢筋的物理力学性能

无明显屈服点的钢筋



a点：比例极限，约为 $0.65f_u$

a点前：应力-应变关系为线弹性

a点后：应力-应变关系为非线性，有一定塑性变形，且没有明显的屈服点

强度设计指标——条件屈服点

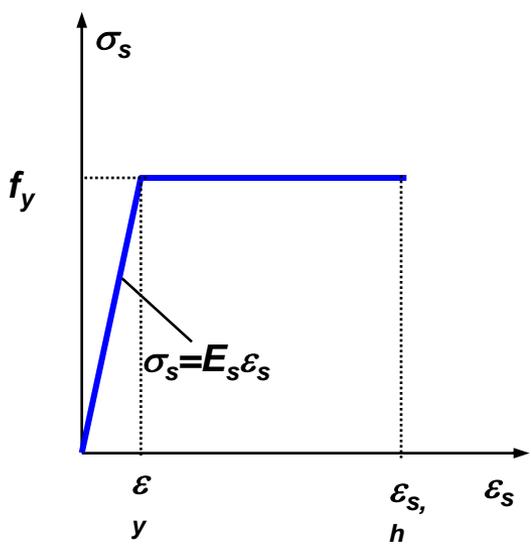
残余应变为 0.2% 所对应的应力

《规范》取 $s_{0.2} = 0.85 f_u$

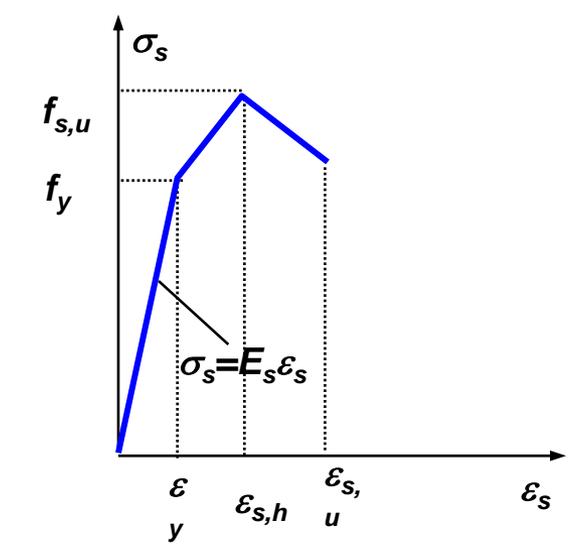
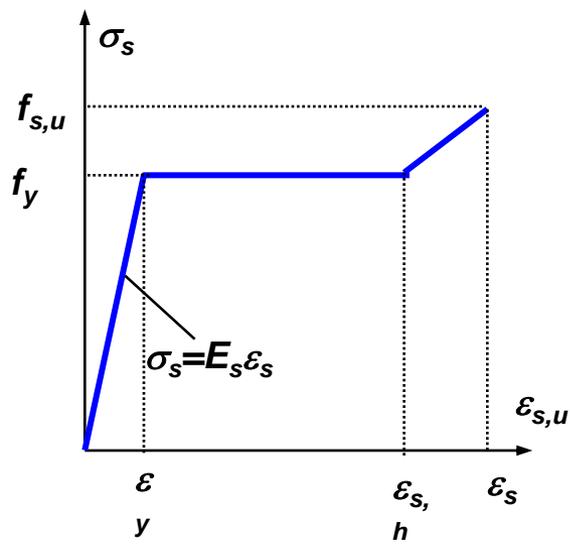


2.2 钢筋的物理力学性能

2.2.3 钢筋应力—应变曲线的数学模型



有明显流幅的钢筋



无明显流幅的钢筋



2.2 钢筋的物理力学性能

2.2.4 钢筋的疲劳

重复荷载作用下，钢筋的强度静载作用下的强度

规定的应力幅度内，经一定次数的重复荷载后，发生疲劳破坏的最大应力值称为疲劳强度。对钢筋用疲劳应力幅来表示其疲劳强度。

试验方法

- 单根钢筋的轴拉疲劳
- 钢筋埋入混凝土中重复受拉或受弯



2.2 钢筋的物理力学性能

2.2.5 混凝土结构对钢筋性能的要求

1 强度

钢筋的**屈服强度**是设计依据，**极限强度**表示钢筋拉断时的实际强度。

2 塑性

(1) 伸长率（伸长率越大，表示钢筋塑性或延性越好）

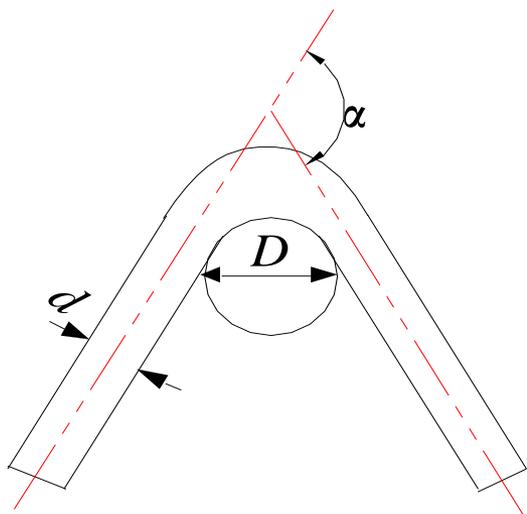
钢筋的断后伸长率：

$$\delta = \frac{l'_1 - l_1}{l_1}$$

(2) 冷弯性能

2.2 钢筋的物理力学性能

冷弯



$\alpha=90^\circ$, 180° , 反复弯曲要求: 冷弯过程中无裂缝、鳞落或断裂。

D 愈小, 要求愈高。

反复次数愈高, 要求愈高。

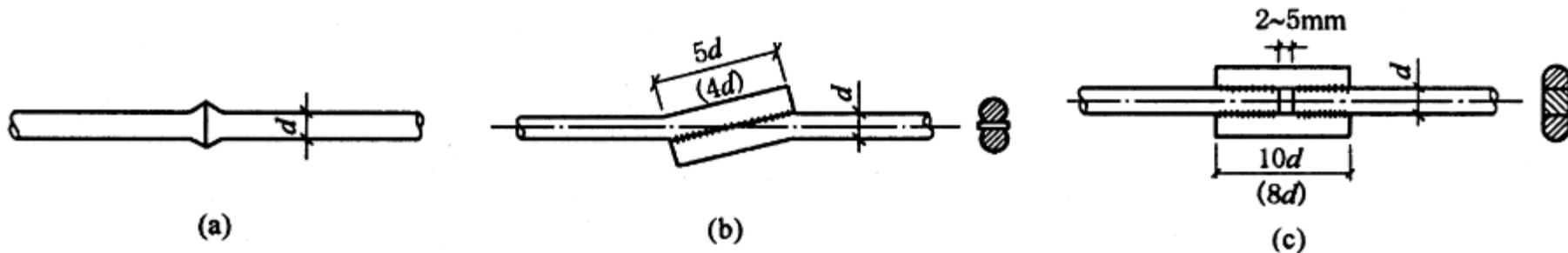
➤ 冷弯是检验钢筋局部变形能力的指标。
钢筋塑性愈好, 构件破坏前预兆愈明显。

2.2 钢筋的物理力学性能

*对有明显屈服点的钢筋：检验屈服强度、极限抗拉强度、伸长率、冷弯性能四项指标

*对没有明显屈服点的钢筋：只须检验极限抗拉强度、伸长率、冷弯性能三项指标。

3 可焊



钢筋的焊接接头

(a) 对头接触电焊(闪光对焊);(b) 两条焊缝的搭接电弧焊;(c) 四条焊缝的帮条电弧焊

4 与混凝土的粘结力：要求钢筋与混凝土之间有足够的粘结力，以保证两者共同工作。



2.3 混凝土与钢筋的粘结

2.3.1 粘结的意义

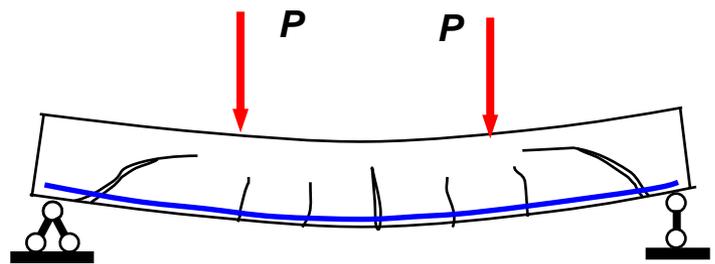
钢筋和混凝土之间的粘结，是保证钢筋和混凝土这两种力学性能截然不同的材料在结构中共同工作的基本前提。

定义：当钢筋于混凝土之间产生相对变形（滑移），在钢筋和混凝土的交界面上产生沿钢筋轴线方向的相互作用力，此作用力称为粘结力。

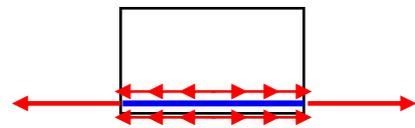
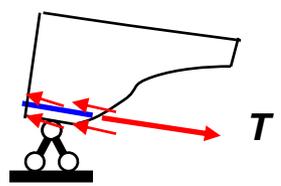


2.3 混凝土与钢筋的粘结

裂缝出现后的粘结作用



两种粘结作用

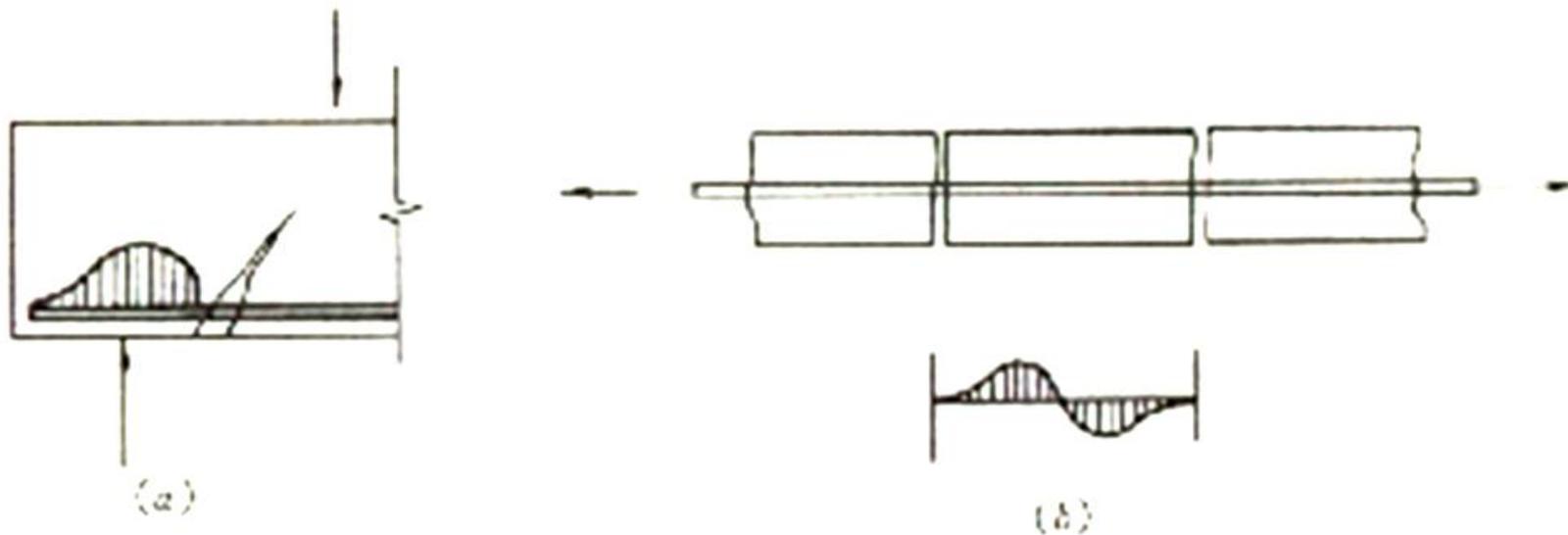


保证钢筋和混凝土共同工作

锚固粘结

缝间粘结 改善钢筋混凝土的耗能性能

2.3 混凝土与钢筋的粘结



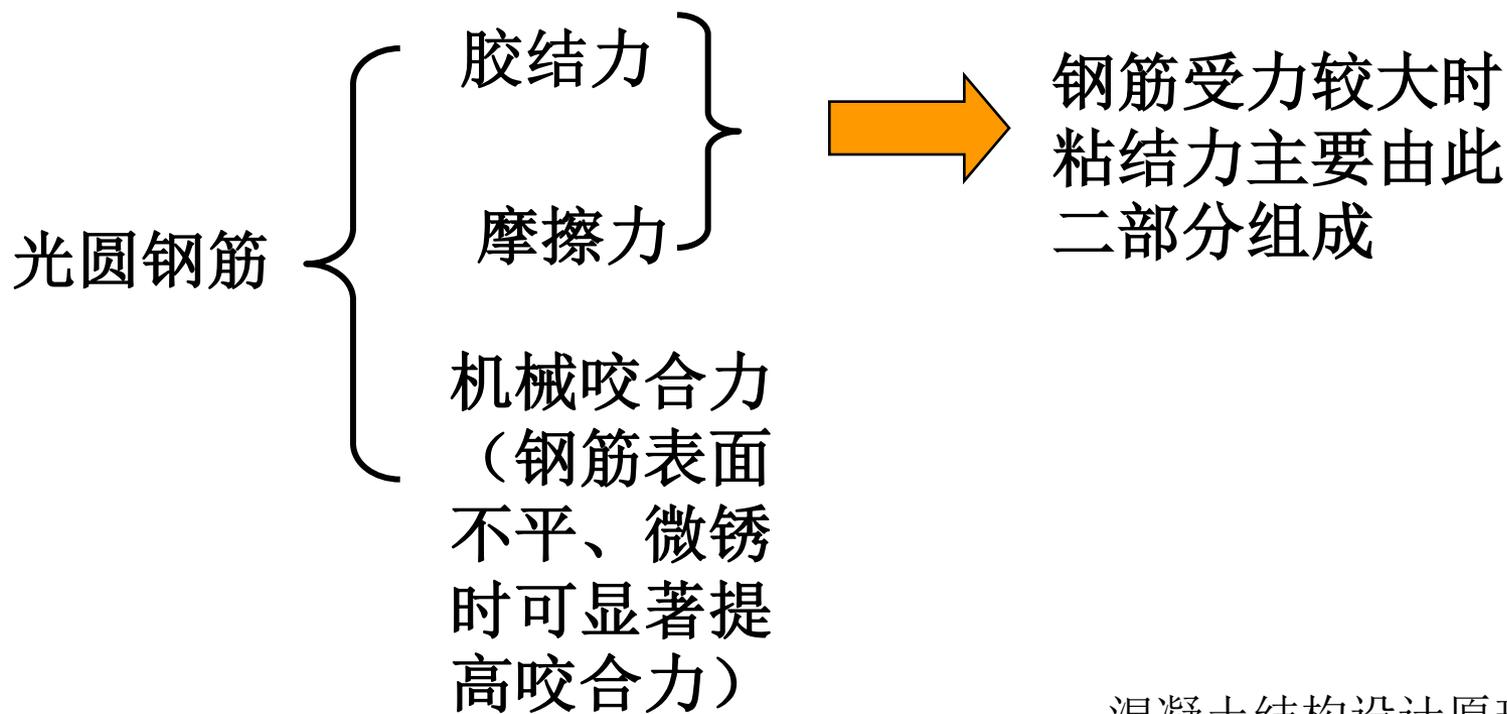
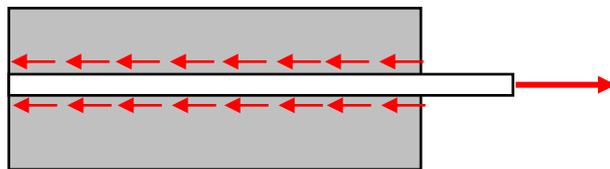
钢筋与混凝土之间粘结应力示意图

(a) 锚固粘结应力

(b) 裂缝间的局部粘结应力

2.3 混凝土与钢筋的粘结

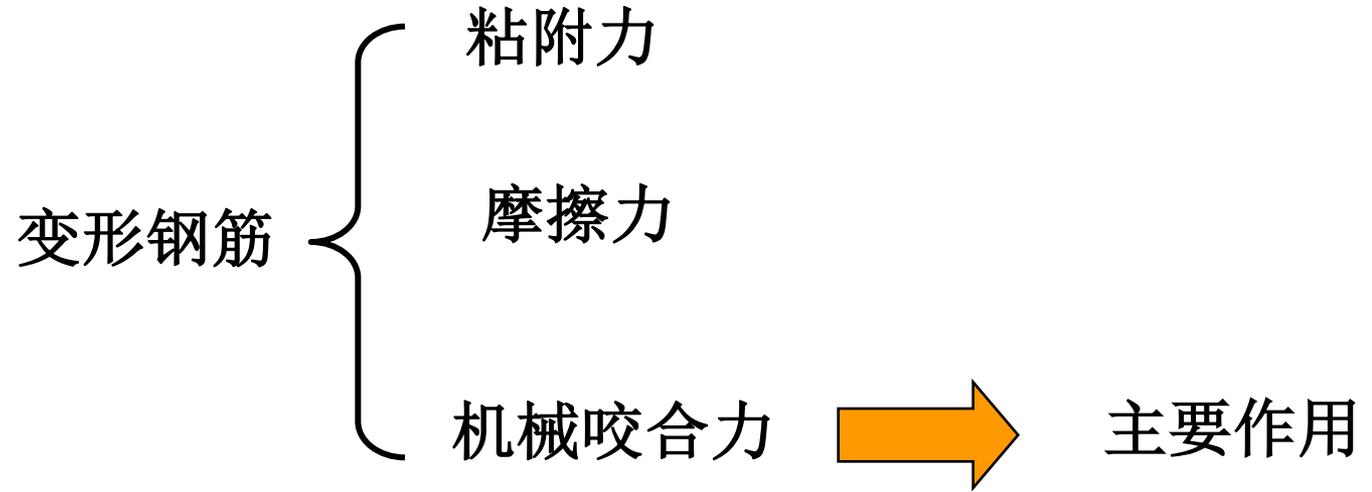
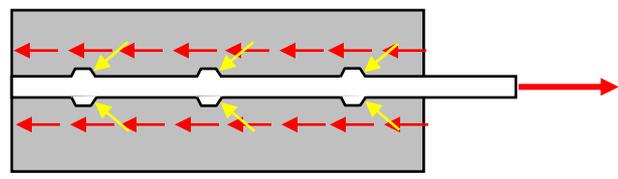
2.3.2 粘结力的组成





2.3 混凝土与钢筋的粘结

2.3.2 粘结力的组成

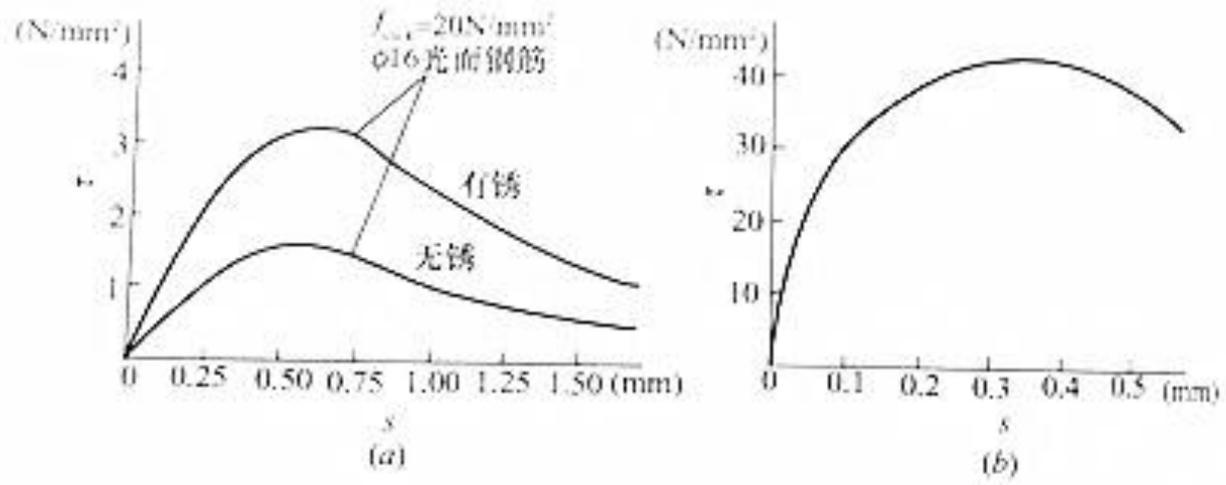




2.3 混凝土与钢筋的粘结

2.3.3 粘结应力——滑移曲线

钢筋与混凝土的粘结性能主要是由两者之间的粘结应力与相对应的应力滑移曲线对应的。

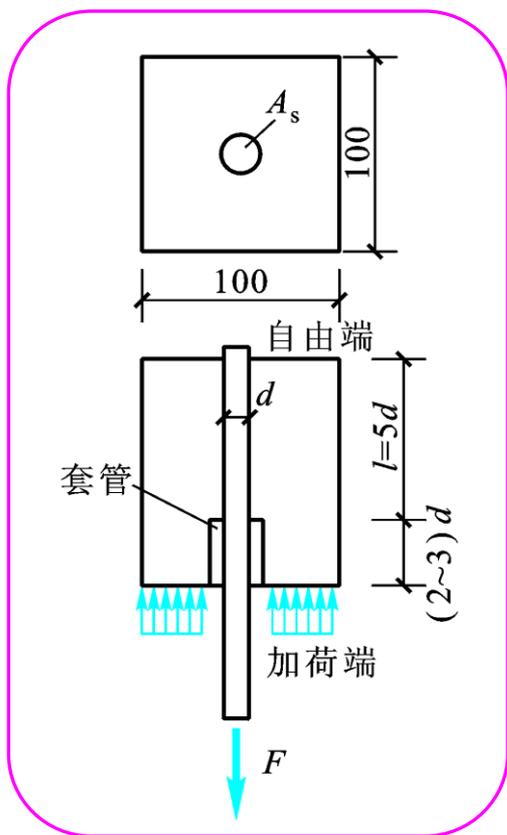


ef为颈缩阶段

2.3 混凝土与钢筋的粘结

2.3.4 钢筋的锚固

❖ 粘结锚固长度



平均粘结应力

$$\tau_m = \frac{F}{\pi d l_a}$$

光面钢筋 $\tau_m = 1.5 \sim 3.5 \text{ N/mm}^2$

带肋钢筋 $\tau_m = 2.5 \sim 6.0 \text{ N/mm}^2$

由 τ_m 和钢筋强度可推算出锚固长度 l_a

2.3 混凝土与钢筋的粘结

普通钢筋锚固长度 按下列公式计算：

钢筋抗拉强度设计值

钢筋直径

$$l_a = \alpha \frac{f_y}{f_t} d$$

钢筋外形系数

混凝土轴心抗拉强度设计值

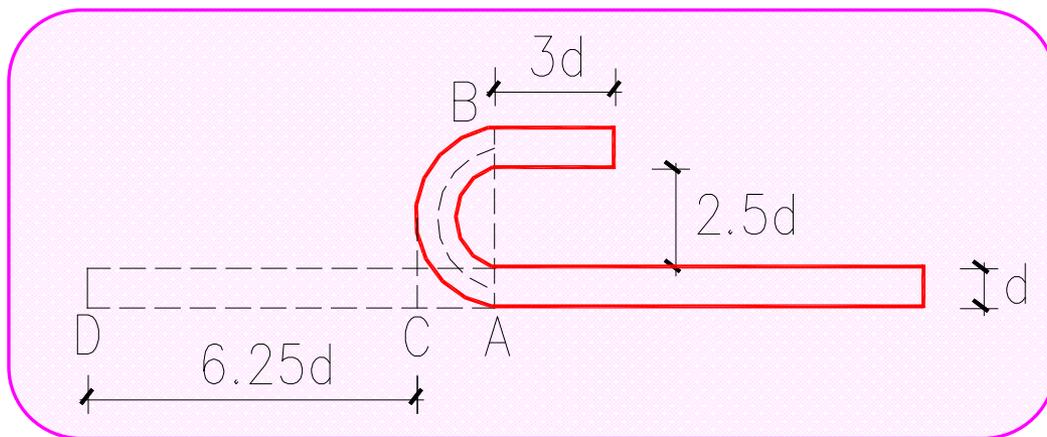
钢筋类型	光面钢筋	带肋钢筋
α	0.16	0.14

2.3 混凝土与钢筋的粘结

❖ 增加粘结锚固的措施

➤ 光面钢筋端部做弯钩:

手工
弯钩:

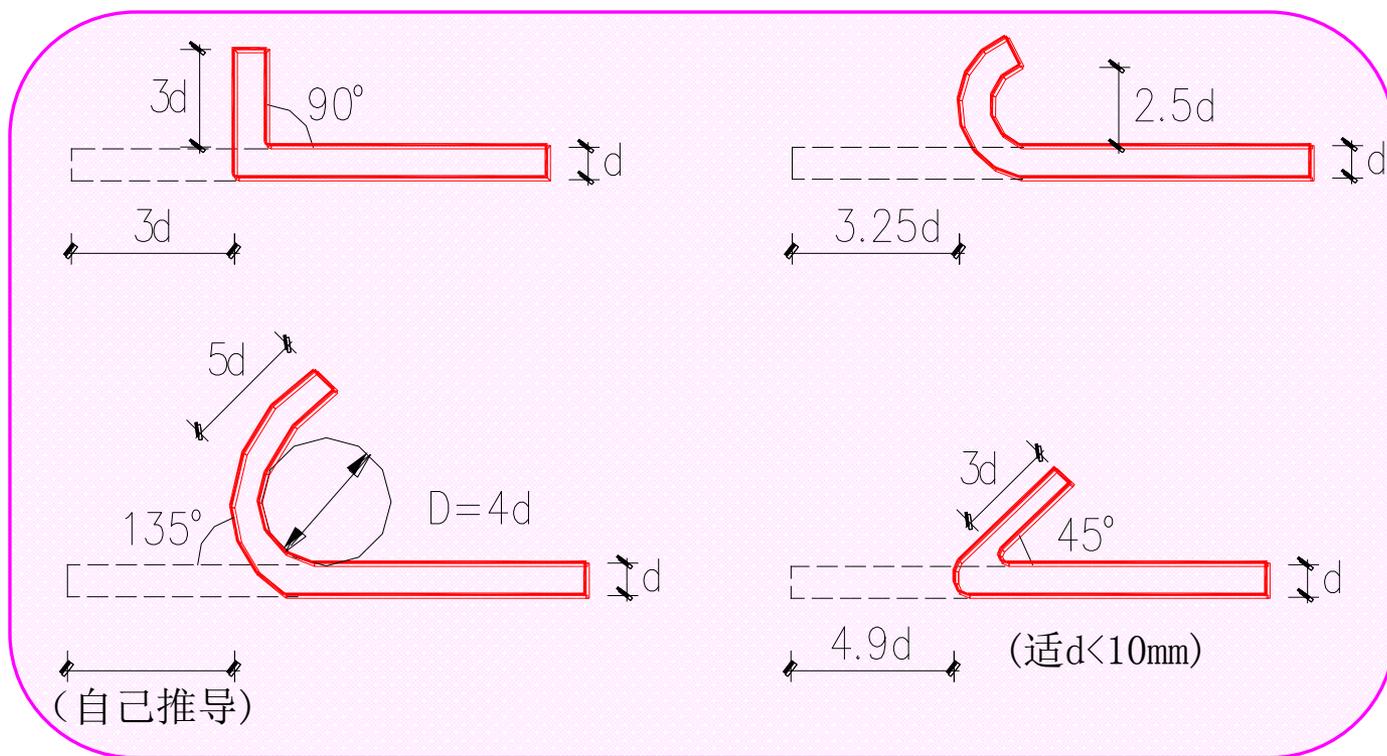


$$AB = \pi R = (1.25d + 0.5d)\pi = 5.5d$$

$$DC = AB + 3d - AC = 5.5d + 3d - (1.25d + d) = 6.25d$$

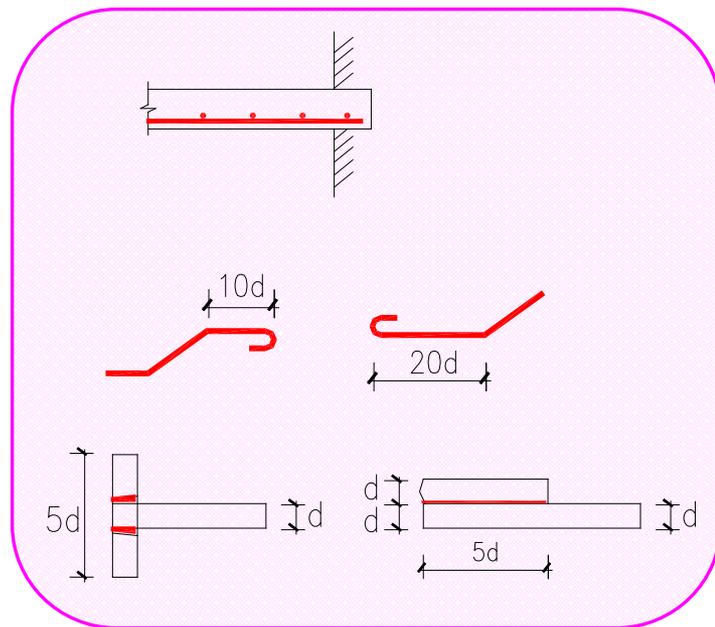
2.3 混凝土与钢筋的粘结

机械弯钩:



2.3 混凝土与钢筋的粘结

- 钢筋表面带肋；
- 纵向钢筋端部焊横向钢筋；
- 纵向钢筋端部加箍筋；
- 采用高强混凝土；
- 弯起钢筋端部加水平锚固段；
- 在纵向钢筋端部焊锚板；
- 将钢筋焊在预埋件上。





新疆大学



谢谢大家！