



第二章 钢筋与混凝土材料的基本性能

任晓丹

同济大学建筑工程系

rxdtj@tongji.edu.cn

同济大学土木楼A413



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

钢筋的基本性质



➤ 钢筋的应力-应变曲线

- 钢筋拉伸试验





➤ 钢筋的应力-应变曲线

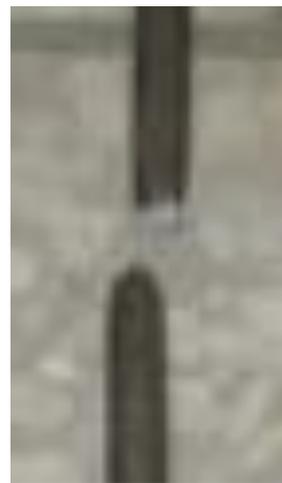
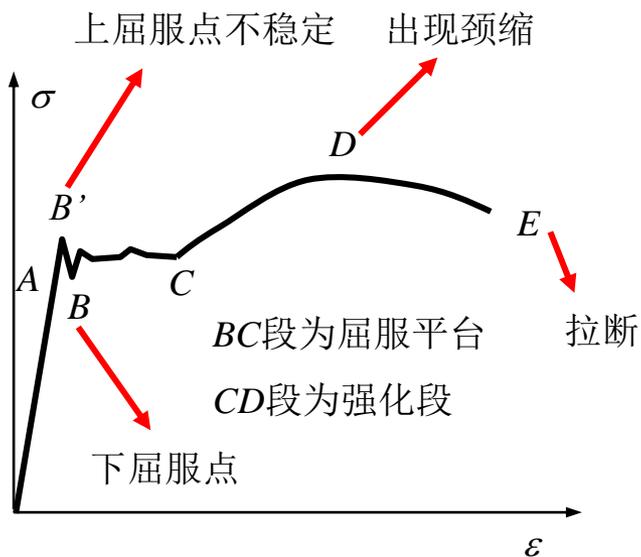
- 钢筋拉伸试验





➤ 钢筋的应力-应变曲线

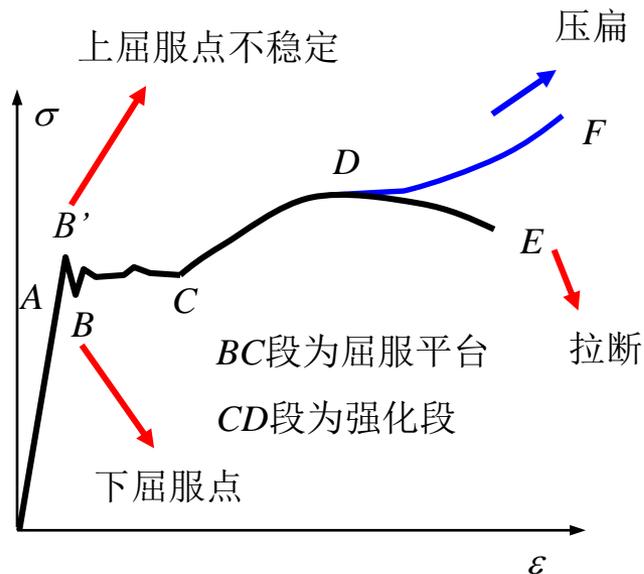
• 钢筋拉伸试验





➤ 钢筋的应力-应变曲线

• 钢筋拉伸试验

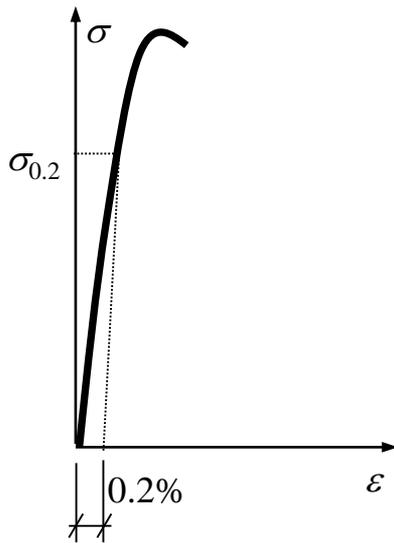


钢筋受压和受拉时的应力-应变曲线“几乎”相同



➤ 钢筋的应力-应变曲线

- 钢筋拉伸试验



无明显流幅的钢筋

钢筋受压和受拉时的应力-应变曲线“几乎”相同

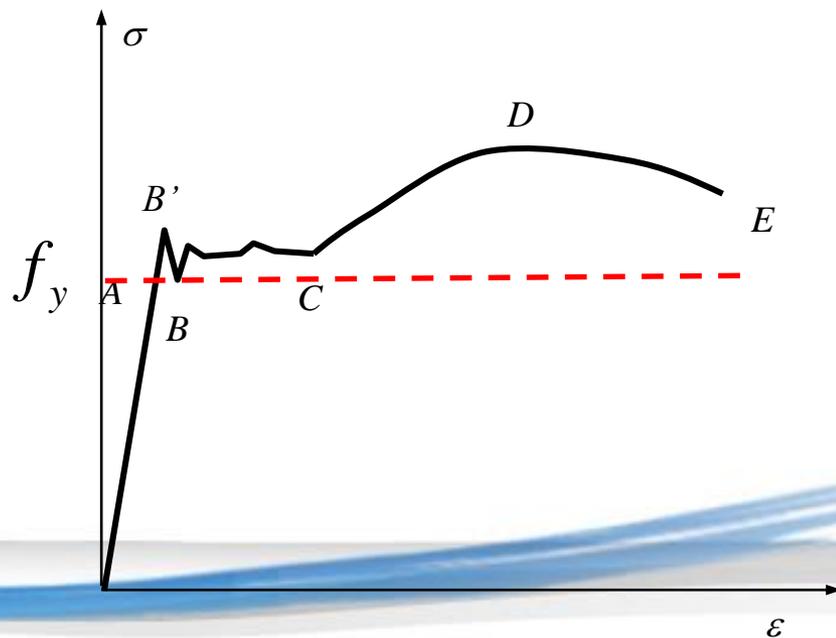


➤ 钢筋的应力-应变曲线

- 钢筋的强度指标

- **强度**：材料在**破坏**之前所能承受的**最大应力**

明显流幅的钢筋：**下屈服点**对应的强度作为设计强度的依据，因为，钢筋屈服后会产生大的塑性变形，钢筋混凝土构件会产生不可恢复的变形和不可闭合的裂缝，以至不能使用



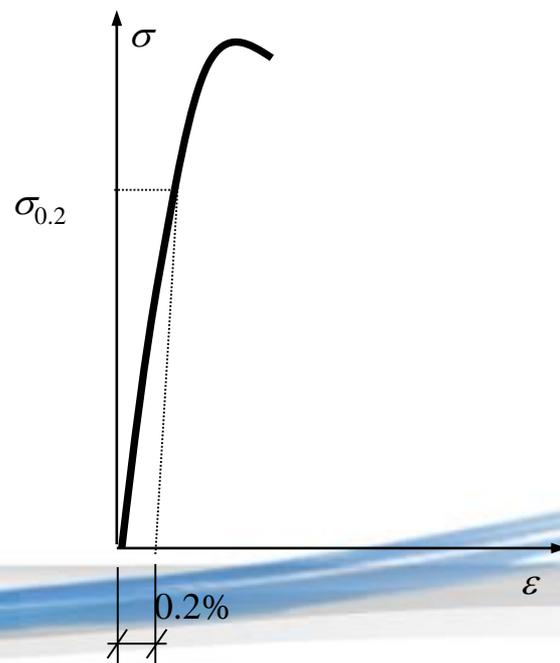


➤ 钢筋的应力-应变曲线

- 钢筋的强度指标

- **强度**：材料在**破坏**之前所能承受的**最大应力**

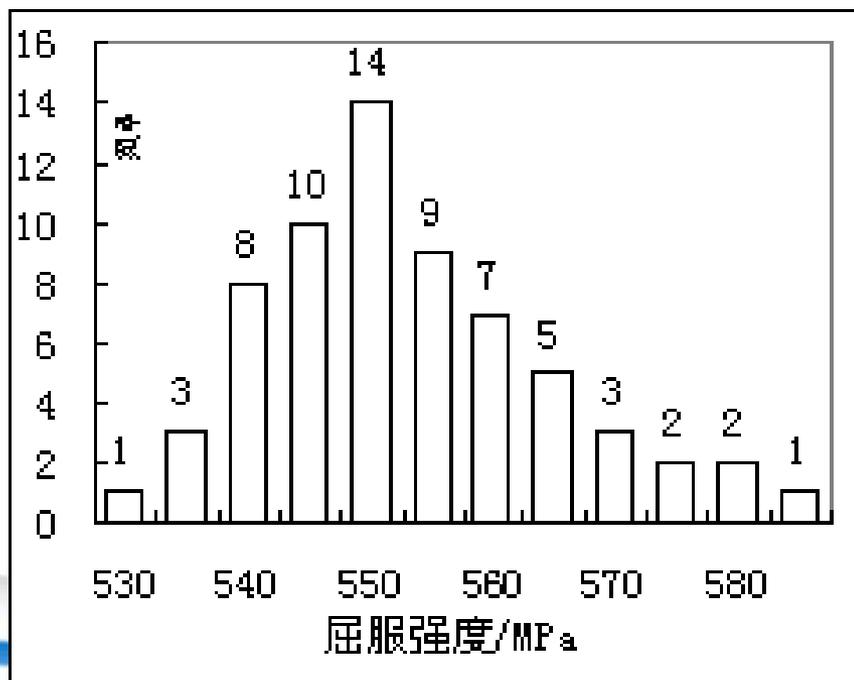
无明显流幅的钢筋：**残余应变**为0.2%时所对应的应力作为条件屈服强度，随着冶金系统采用国际标准及质量的提高，在相应的产品标准中明确规定**屈服强度** $\sigma_{0.2}$ 不得小于极限抗拉强度 σ_b 的85% ($0.85 \sigma_b$)。因此，实际应用中可取极限抗拉强度 σ_b 的85%作为条件屈服点





➤ 钢筋的应力-应变曲线

- 钢筋的强度指标
 - 强度指标的确定

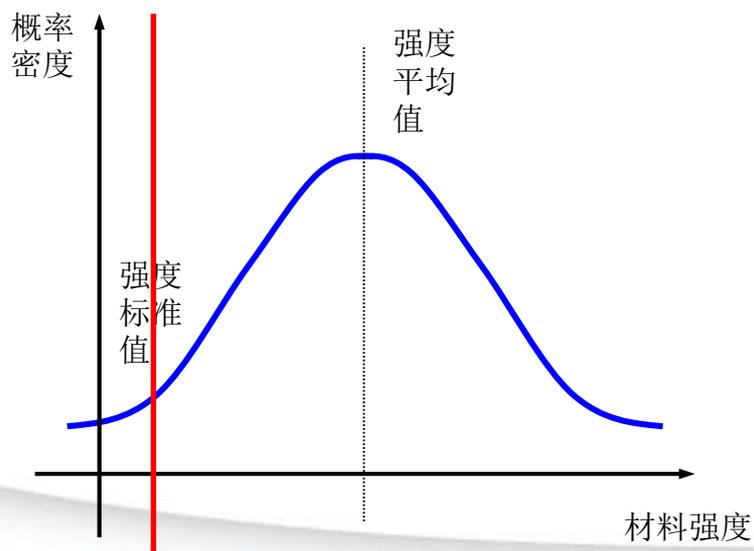


试验结果的**随机性**!



➤ 钢筋的应力-应变曲线

- 钢筋的强度指标
 - 强度指标的确定



根据统计资料，运用数理统计方法确定的具有一定保证率（钢筋为**97.73%**）的统计特征值：

强度标准值=强度平均值- $2 \times$ 均方差



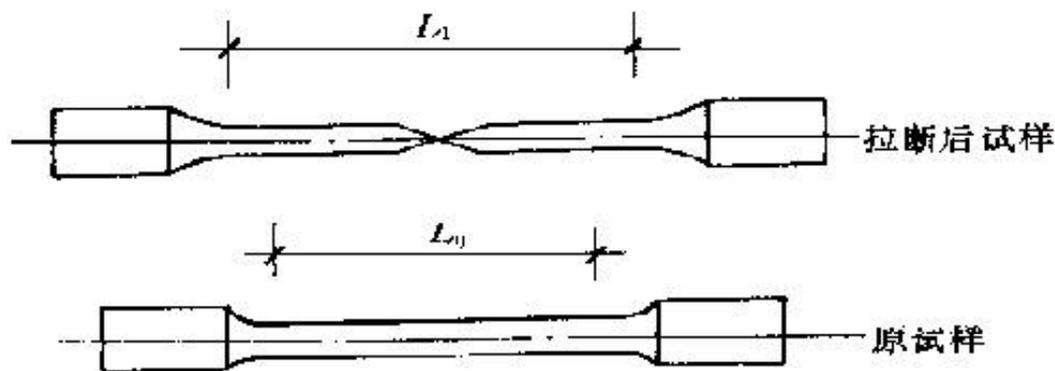
➤ 钢筋的应力-应变曲线

- 钢筋的强度指标
- 钢筋的变形指标

伸长率:

钢筋拉断后的伸长与原长的比值

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

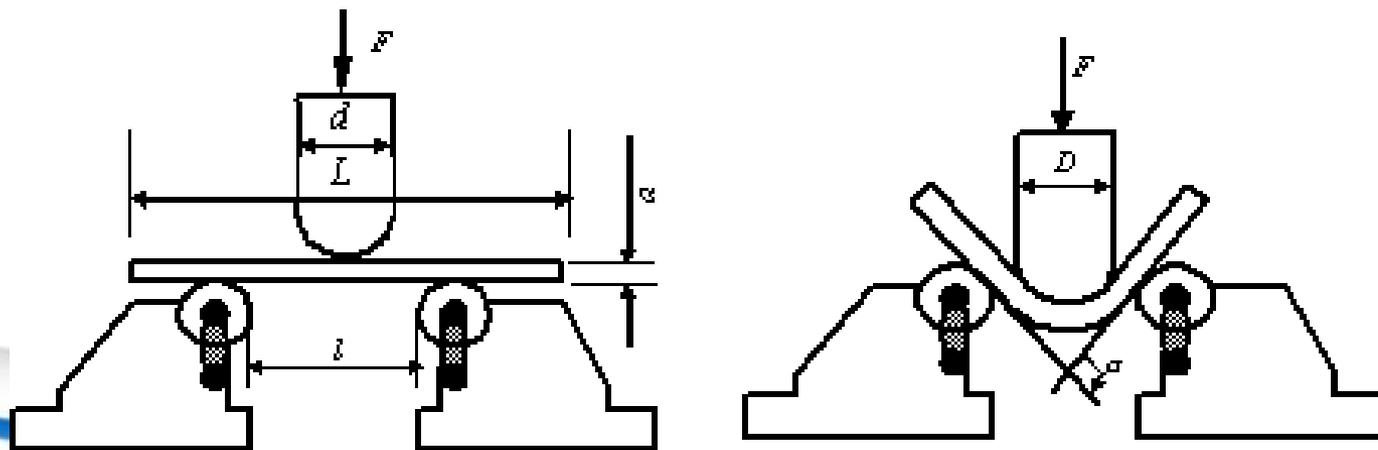




➤ 钢筋的应力-应变曲线

- 钢筋的强度指标
 - 钢筋的冷弯要求

冷弯要求：将直径为 d 的钢筋绕直径为 D 的钢辊弯成一定的角度而不发生断裂





➤ 钢筋的成分、级别和品种

• 按照化学成分分类

碳素钢（铁、碳、硅、
锰、硫、磷等元素）

- 低碳钢（含碳量 $<0.25\%$ ）
- 中碳钢（含碳量 $0.25\sim 0.6\%$ ）
- 高碳钢（含碳量 $0.6\sim 1.4\%$ ）

普通低合金钢（另加
硅、锰、钛、钒、铬
等）

- 锰系
- 硅钒系
- 硅钛系
- 硅锰系
- 硅铬系



➤ 钢筋的成分、级别和品种

• 按照加工方法分类

钢筋

热轧钢筋：热轧光圆钢筋HPB235， HPB300（Hot rolled Plain Bars），热轧带肋钢筋HRB335， HRB400， HRB500 (Hot rolled Ribbed Bars)，细晶粒热轧钢筋HRBF335， HRBF400， HRBF500 (Hot rolled Ribbed Bars of Fine grains)，

冷拉钢筋：由热轧钢筋在常温下用机械拉伸而成

热处理钢筋：将HRB400， HRB500钢筋通过加热、淬火、回火而成

钢丝

碳素钢丝：高碳镇静钢通过多次冷拔、应力消除、矫正、回火处理而成

刻痕钢丝：在钢丝表面刻痕，以增强其与混凝土间的粘结力

钢绞线：若干根相同直径的钢丝成螺旋状绞绕在一起

冷拔低碳钢丝：由低碳钢冷拔而成



➤ 钢筋的成分、级别和品种

- 按照表面形状分类

光圆钢筋



带肋钢筋



- 按照应用范围分类

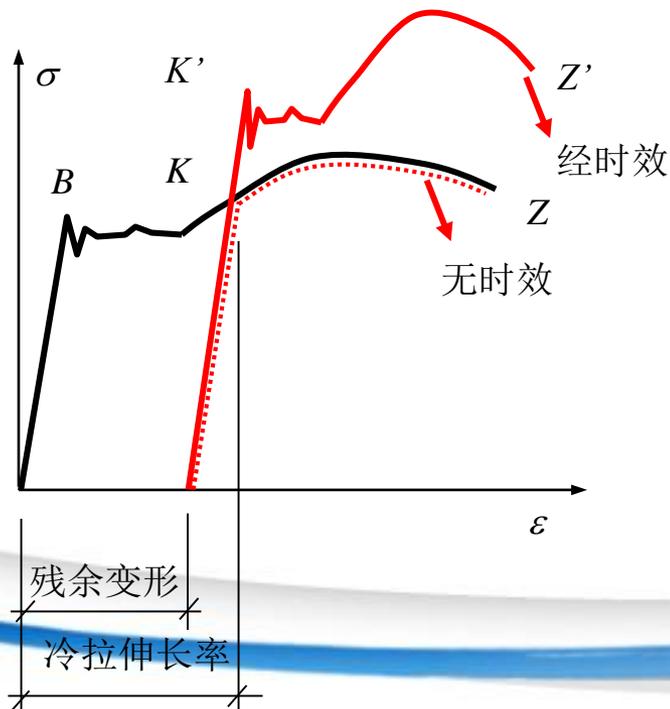
非预应力钢筋：HPB235, HPB300, HRB335, HRB400, HRB500
HRBF335, HRBF400, HRBF500

预应力钢筋：碳素钢丝，刻痕钢丝，钢绞线，热处理钢筋，冷拉钢筋



➤ 钢筋的冷加工和热处理

• 冷拉



K点的选择： 应力控制和应变控制

温度的影响： 温度达 700°C 时恢复到冷拉前的状态，先焊后拉

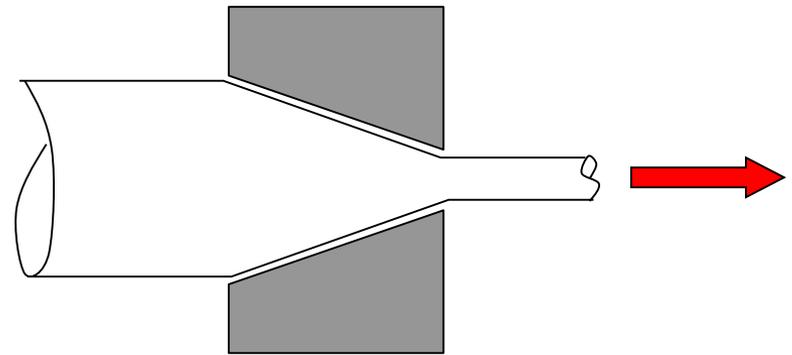
特性： 只提高抗拉强度，不提高抗压强度，强度提高，塑性下降





➤ 钢筋的冷加工和热处理

• 冷拔



经过冷拔后钢筋没有明显的屈服点和流幅

冷拔既能提高抗拉强度又能提高抗压强度



➤ 钢筋的冷加工和热处理

• 热处理

不降低强度的前提下，消除由淬火产生的内力，改善塑性和韧性

对特定钢号的钢筋进行**淬火**和**回火**处理

强度提高，
塑性降低





➤ 钢筋的冷加工和热处理

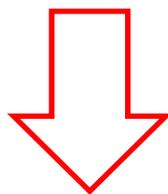
- 热处理





➤ 钢筋的徐变和松弛

- 徐变：应力不变，随着时间的增长应变继续增加
- 松弛：长度不变，随着时间的增长应力降低



对结构，尤其是**预应力**结构，产生不利的影响，需采取必要的措施



➤ 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**。



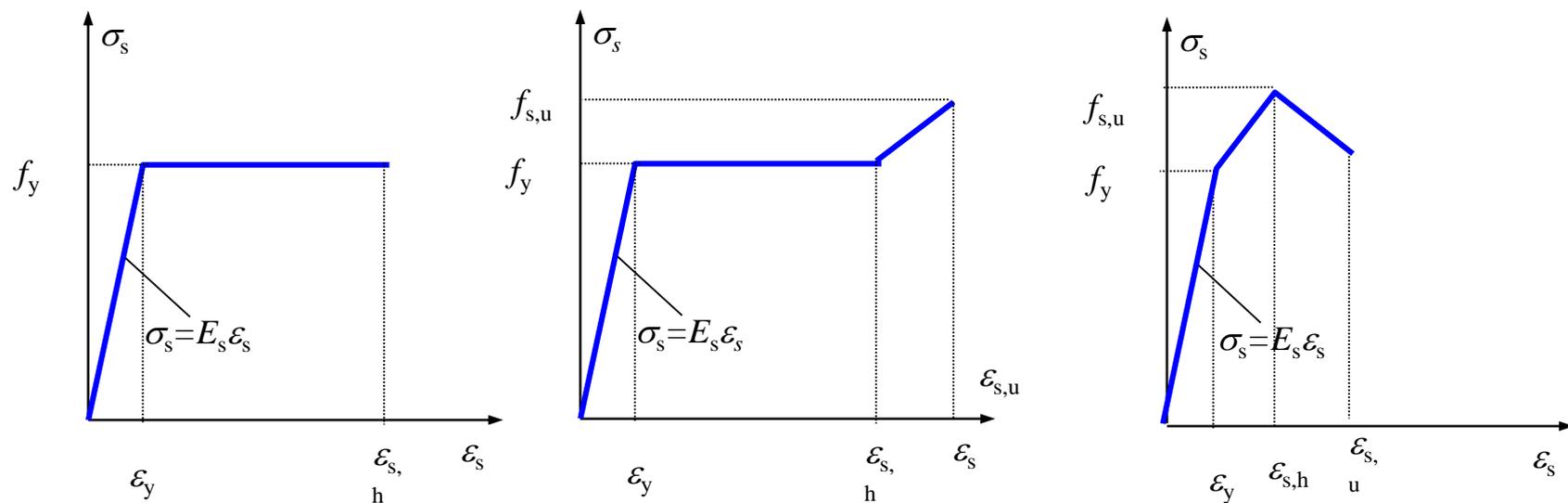


➤ 混凝土结构对钢筋的要求

- 强度要求：屈服强度和极限强度，抗震设计时还要求有一定的屈强比
- 塑性要求：伸长率和冷弯要求
- 可焊性
- 与混凝土的粘结



➤ 钢筋应力应变关系的数学模型



有明显流幅的钢筋

无明显流幅的钢筋



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

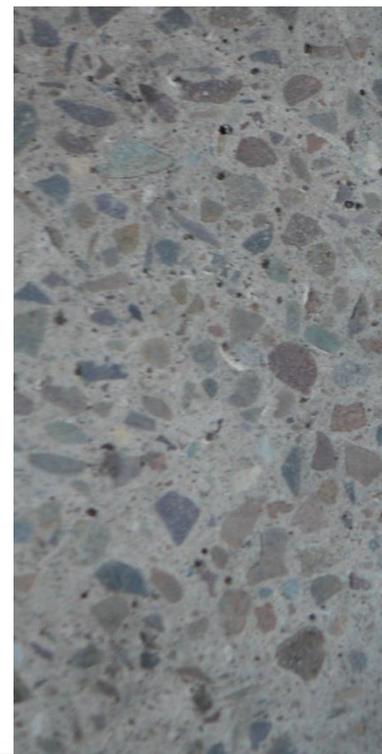
混凝土的基本性质



➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土材料组成的特点

- 普通混凝土是由**水泥、砂、石材用水拌合硬化**形成的人造石材。
- 由于水分蒸发、干缩等原因，混凝土形成之初就包含了**大量孔隙和裂缝**。
- 外力作用下，**裂缝在混凝土中持续产生和扩展**。
- 混凝土的性能**随着时间变化**。





➤ 混凝土的强度和变形

- 混凝土材料组成的特点



If God created Solids (**Concrete**), the Devil created Surfaces (**Cracks**).
by Enrico Fermi



► 混凝土的強度和變形

• 混凝土的強度

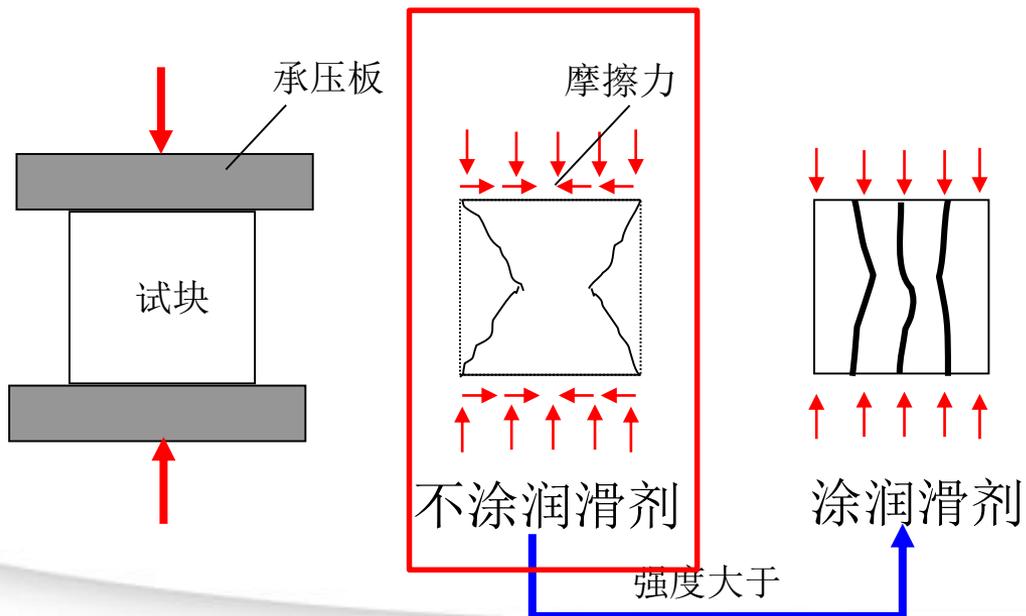
- **強度：**材料在**破壞**之前所能承受的**最大應力**





➤ 混凝土的强度和变形

- 混凝土的强度
 - 立方体受压试验



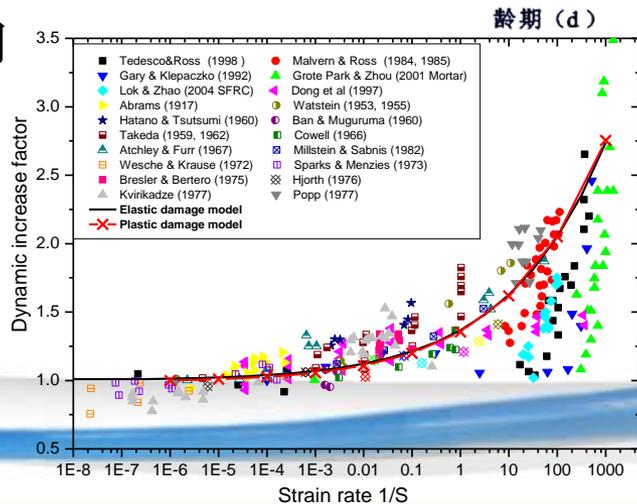
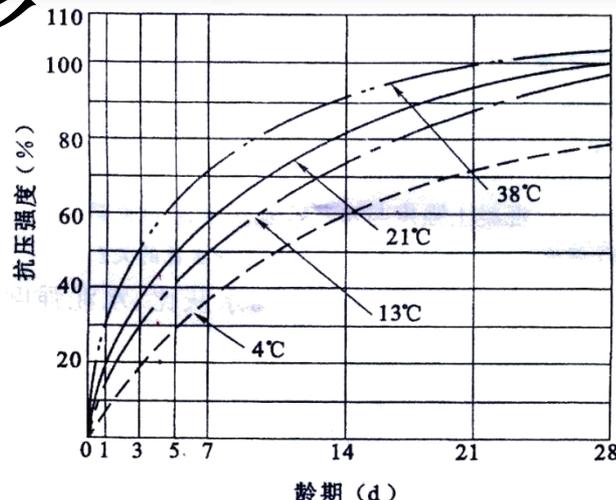
我国规范建议方法



➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土的强度

- 立方体抗压强度 f_{cu}
- 齡期和养护条件的影响
- 加载速率的影响





➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土的强度

- 立方体抗压强度 f_{cu}
- 标准试块：150×150×150mm
- 非标准试块：100×100×100mm 换算系数0.95
200×200×200mm 换算系数1.05
- 立方体抗压强度是区分混凝土强度等级的指标，我国规范混凝土的强度等级有：**C15, C20, C25, C30, C35, C40, C45, C50, C55, C60, C65, C70, C75, C80**

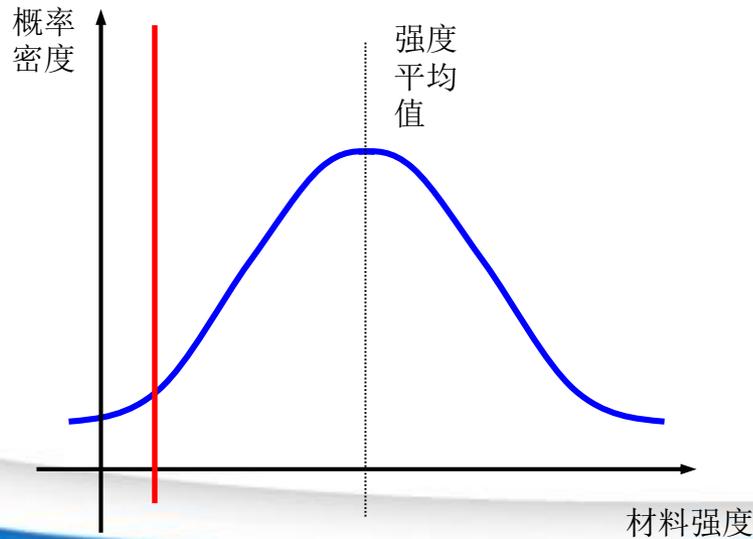


➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土的强度

- 立方体抗压强度指标

C60



强度标准值：根据统计资料，运用数理统计方法确定的具有一定保证率（95%）的统计特征值。

计算公式：

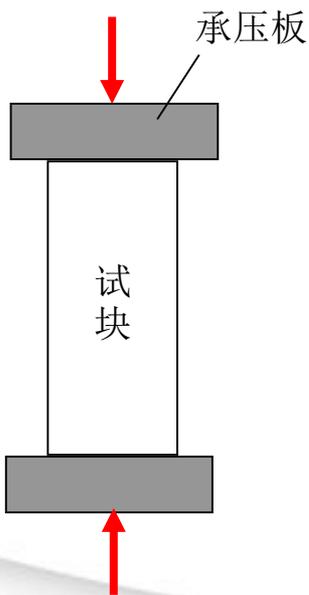
强度标准值=强度平均值-
 $1.645 \times$ 均方差



➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土的强度

- 棱柱体抗压强度 f_c
- 试块: $100 \times 100 \times 300\text{mm}$
- 考虑到承压板对试件的约束, 立方体抗压强度大于棱柱体抗压强度, 且有: $f_c = 0.76f_{cu}$ (试验结果)
- 考虑到构件和试件的区别, 取 $f_c = 0.67f_{cu}$ (规范)
- 对国外 (美国、日本、欧洲混凝土协会等) 采用的圆柱体试件 ($d=150, h=300$), 有 $f_c' = 0.79f_{cu}$

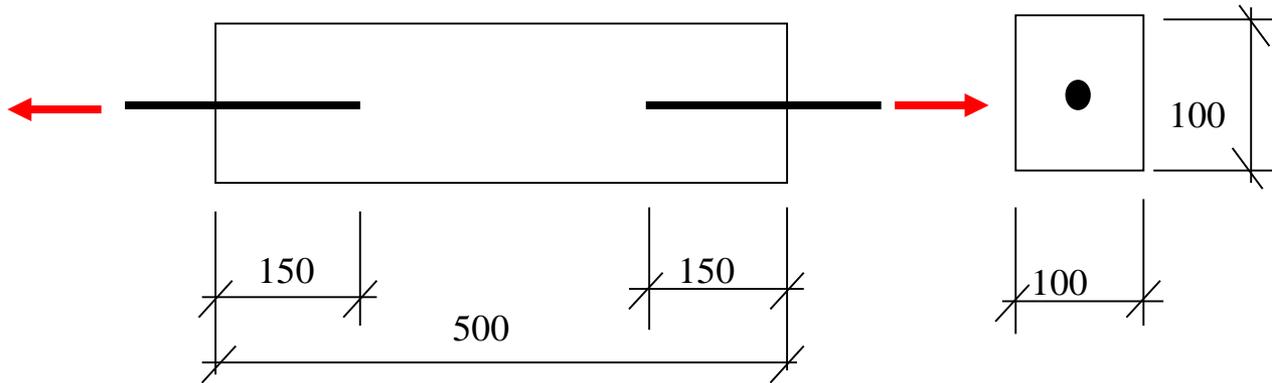




➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土的强度

- 单轴受拉试验（直接拉伸） f_t

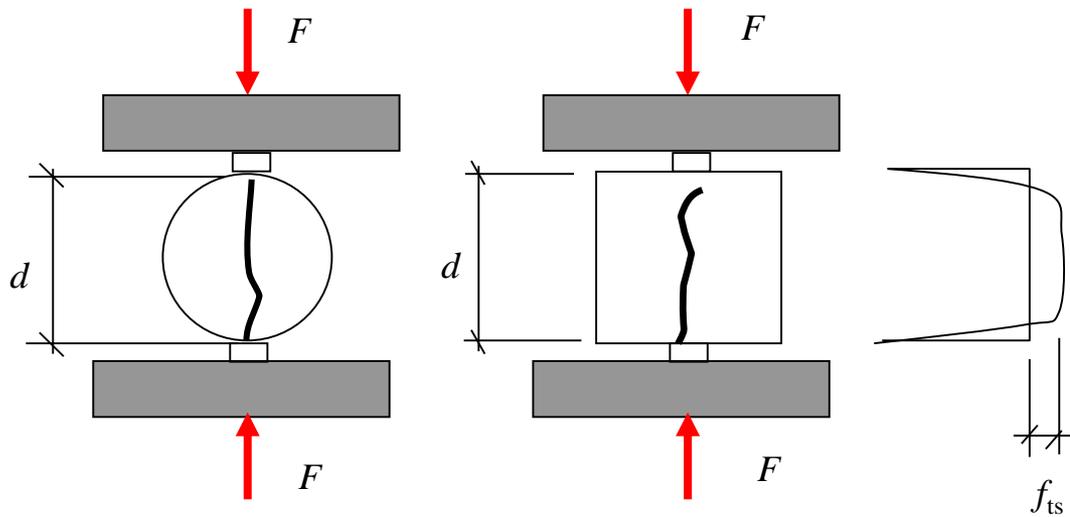




➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土的强度

- 单轴受拉试验（劈拉试验）



$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi dl}$$



➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土的强度

- 单轴抗拉强度 f_t
- 单轴抗拉强度为立方体抗压强度的 $1/17 \sim 1/8$ ，强度等级越高，该比值越小，规范建议单轴抗拉强度与立方体强度关系：

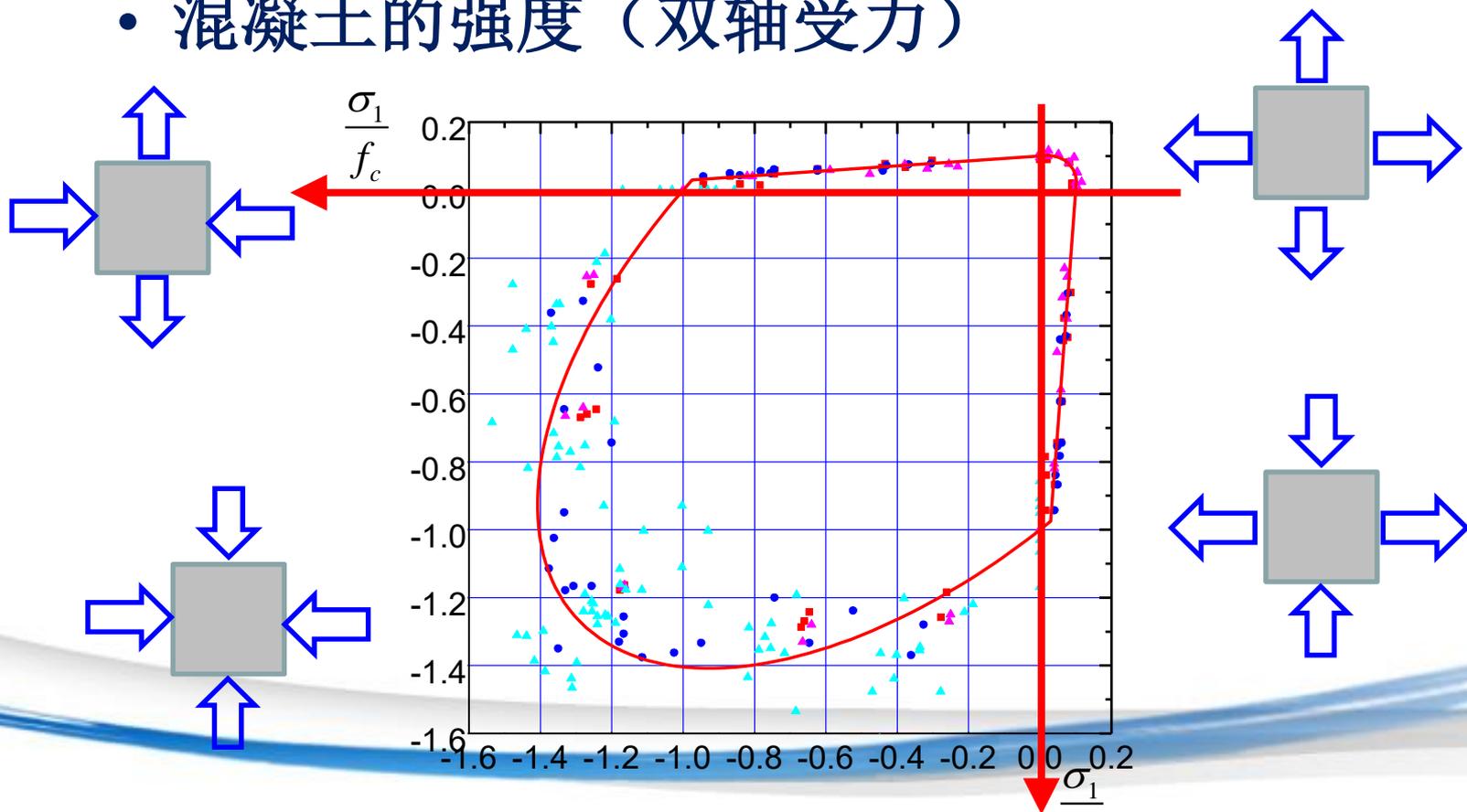
$$f_t = 0.395 f_{cu}^{0.55}$$

- 单轴强度存在显著的尺寸效应
- 加载速度等因素也对单轴抗拉强度有着显著的影响
- 混凝土抗拉强度虽然很小，但是在某些时候也对结构的破坏起控制性作用（受剪破坏）



➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土的强度（双轴受力）

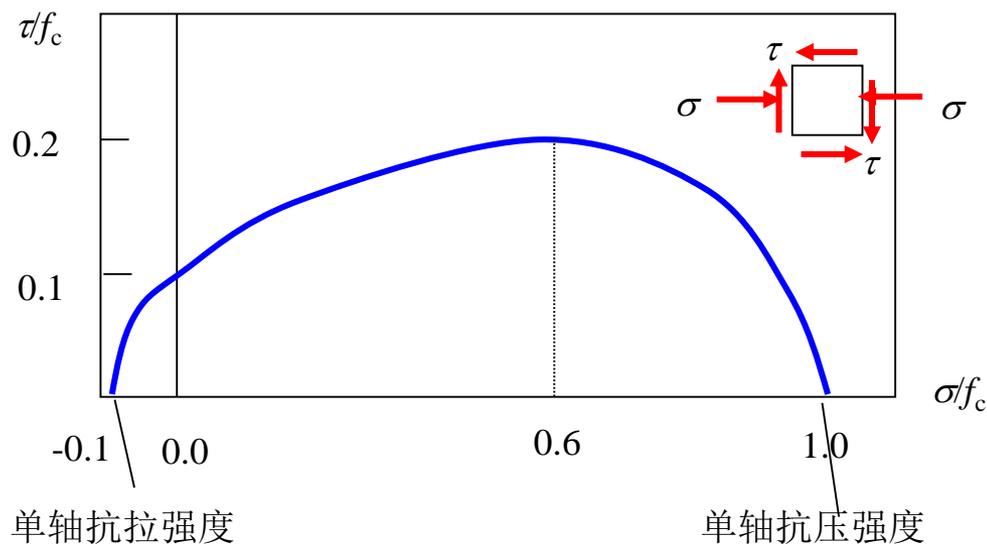


双轴正应力作用下强度包络图



➤ 混凝土的强度和变形

- 混凝土的强度（双轴受力）



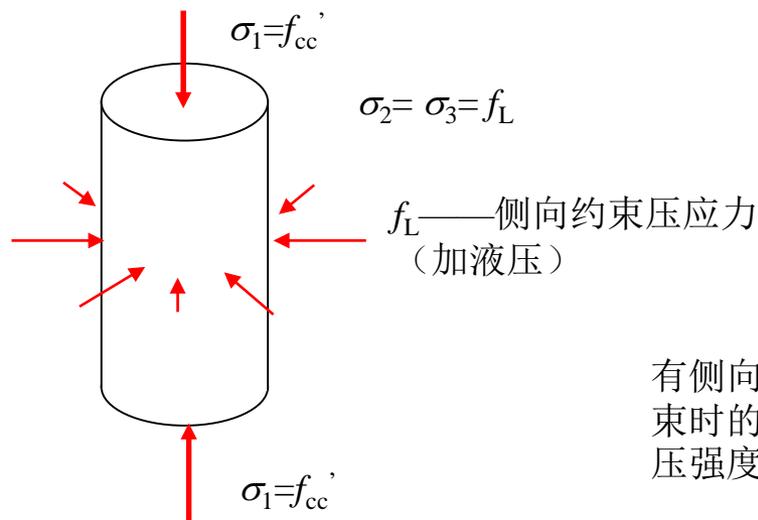
法向应力和剪应力下的强度曲线



➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土的强度（围压作用）

圆柱体试验



$$f_{cc}' = f_c' + 4.1 f_L$$

有侧向约束时的抗压强度

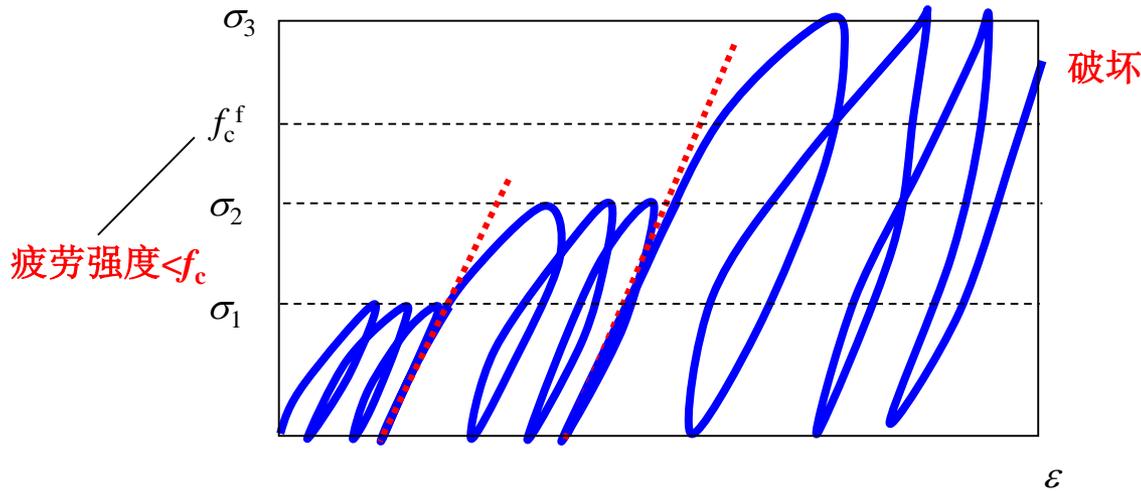
无侧向约束时圆柱体的单轴抗压强度

围压作用下混凝土强度提高



➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土的强度（疲劳强度）



f_c^f 的确定原则：

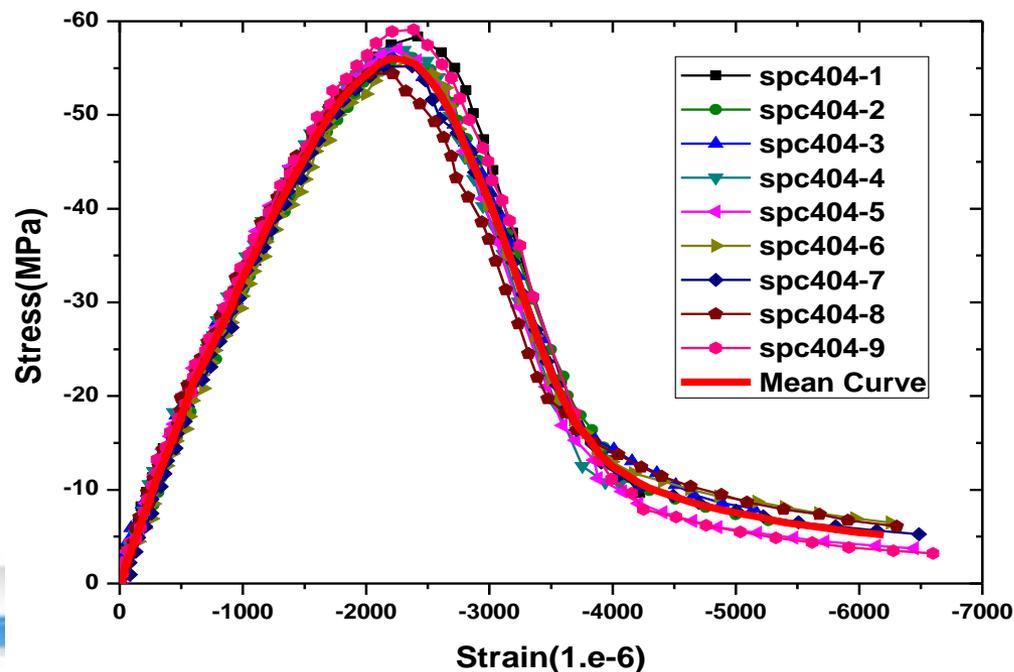
100 × 100 × 300 或
150 × 150 × 450 的
棱柱体试块承受
200万次（或以上）
循环荷载时发生破
坏的最大压应力值

重复荷载下的应力-应变曲线



➤ 混凝土的强度和变形

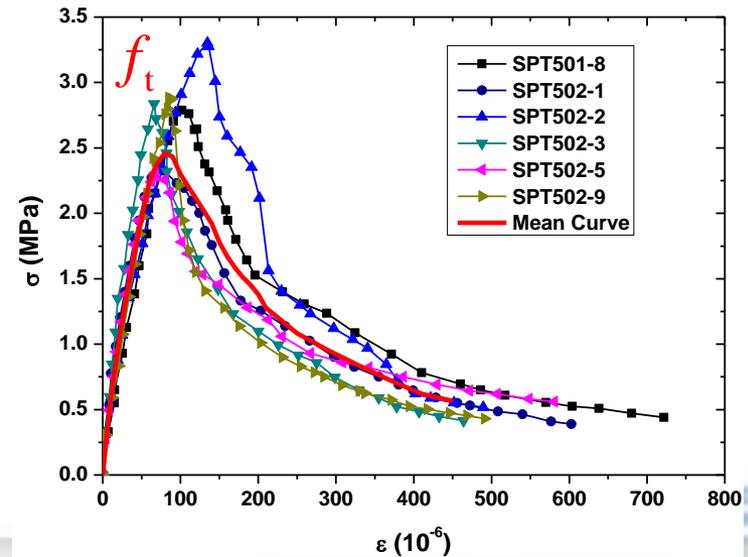
- 混凝土应力应变全曲线
 - 单轴受压全过程试验





➤ 混凝土的强度和变形

- 混凝土应力应变全曲线
 - 单轴受拉全过程试验

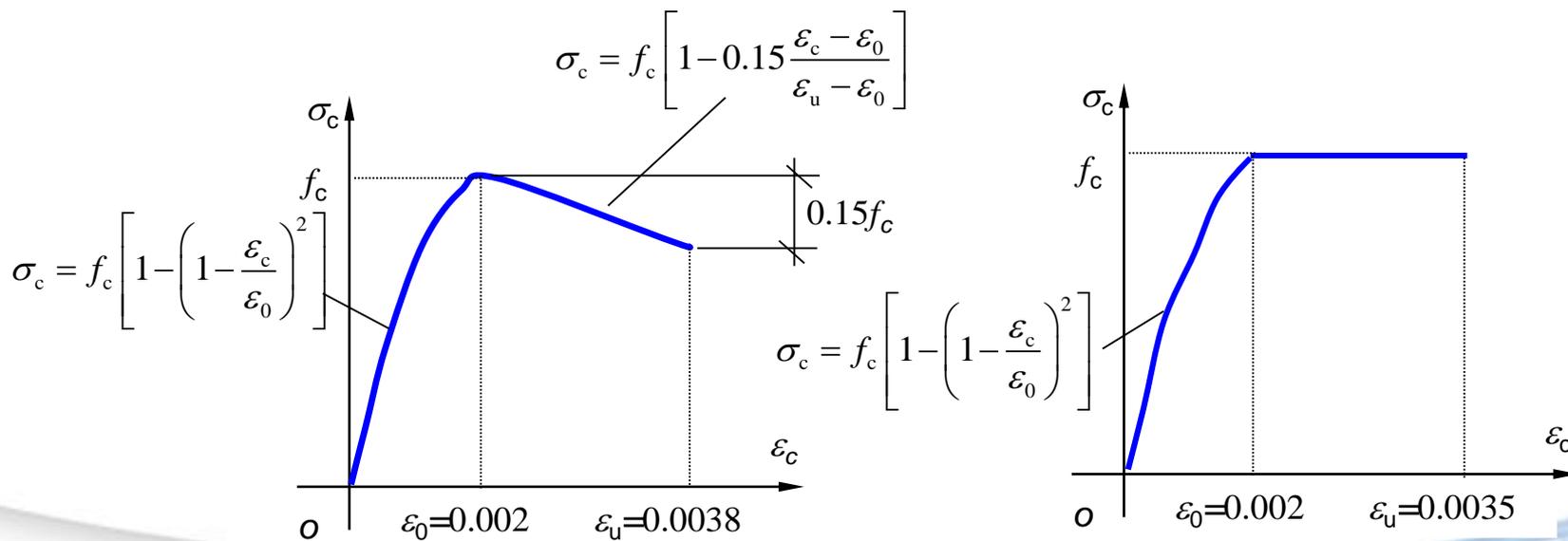




➤ 混凝土的强度和变形

- 混凝土应力应变全曲线

- 单轴受压应力应变关系数学模型



美国Hognestad模型

德国Rüschi模型



➤ 混凝土的强度和变形

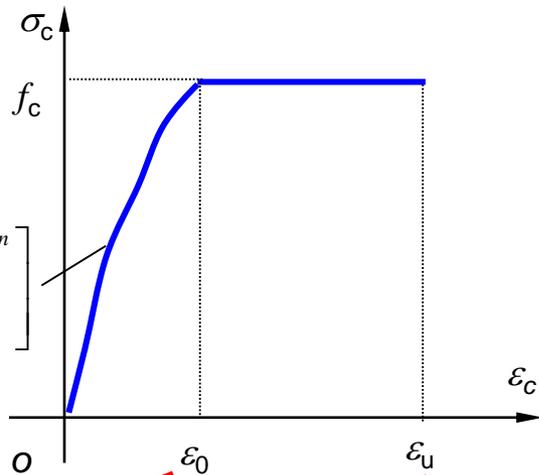
- 混凝土应力应变全曲线

- 单轴受力应力应变关系数学模型

$$n = 2 - \frac{1}{60}(f_{cu} - 50)$$

当 $n \geq 2$ 时, 取 $n = 2$

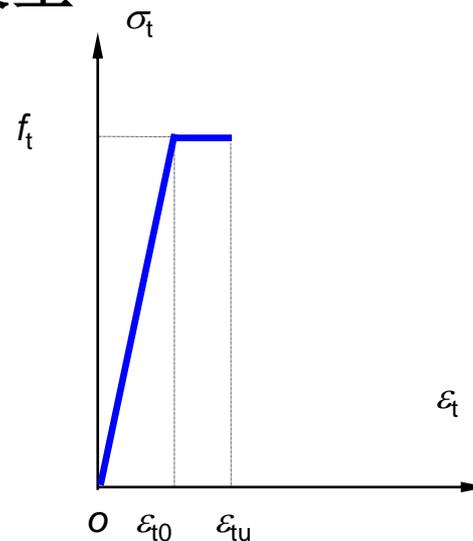
$$\sigma_c = f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \right]$$



$$\varepsilon_0 = 0.002 + 0.5(f_{cu} - 50) \times 10^{-5}$$

$$\varepsilon_u = 0.0033 - (f_{cu} - 50) \times 10^{-5}$$

规范建议单轴受压应力应变关系
(用于构件分析)



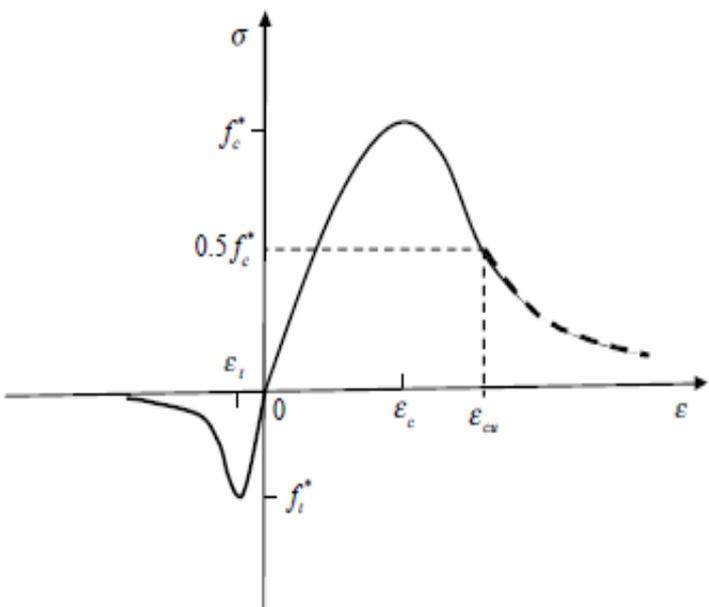
单轴受拉应力应变关系
(用于构件分析)



➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土应力应变全曲线

- 规范推荐混凝土单轴受力应力应变关系**损伤模型**（结构非线性分析）



$$\sigma = (1 - d_t) E_c \varepsilon$$

$$\sigma = (1 - d_c) E_c \varepsilon$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^5] & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases}$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c^n}{n-1+x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t}$$

$$\rho_c = \frac{f_c^*}{E_c \varepsilon_c}$$

$$\rho_t = \frac{f_t^*}{E_c \varepsilon_t}$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_c}{E_c \varepsilon_c - f_c^*}$$

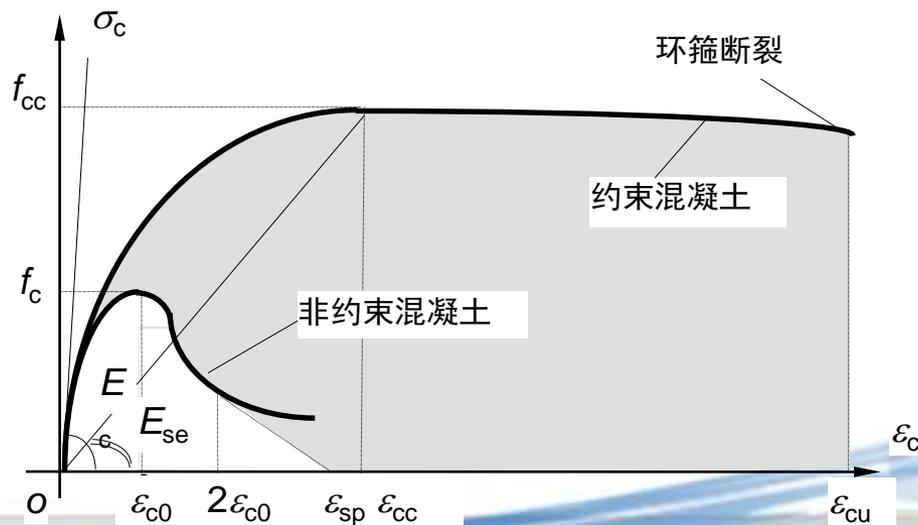
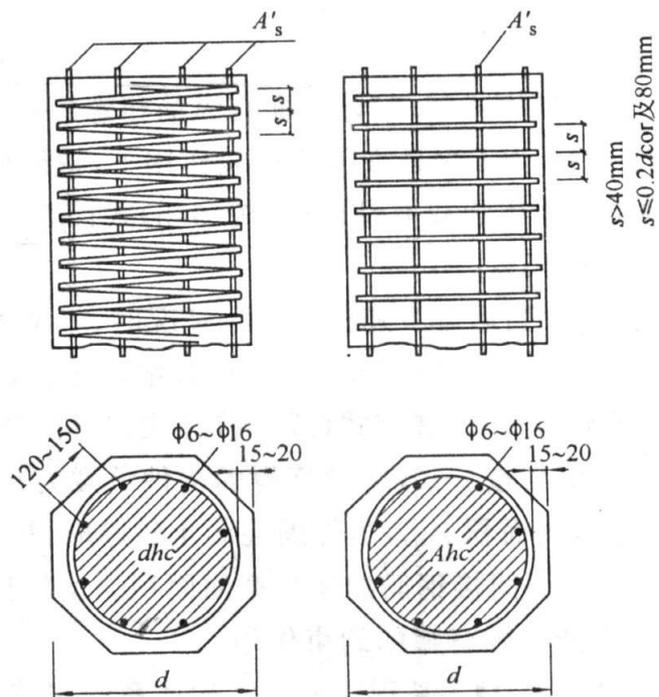
单轴受拉

$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$ 单轴受压



➤ 混凝土的强度和变形

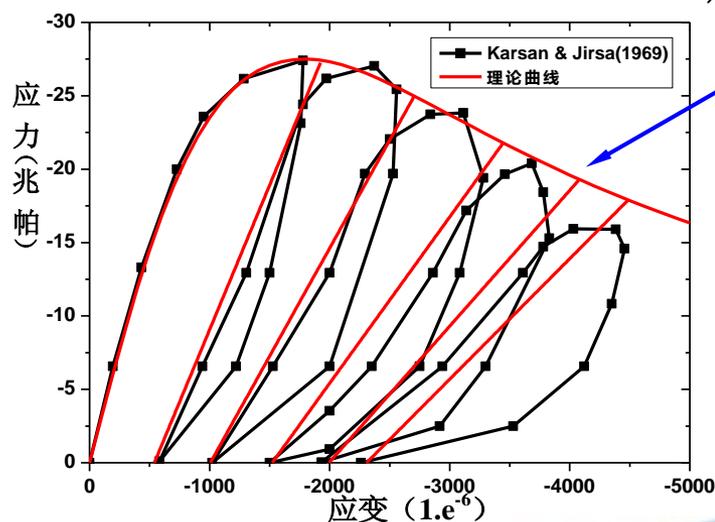
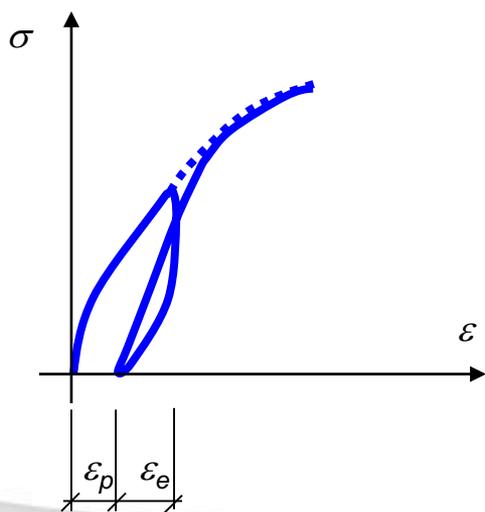
- 混凝土应力应变全曲线
 - 约束混凝土应力应变曲线





➤ 混凝土的强度和变形

- 混凝土的变形性能
 - 混凝土的残余应变



包络线与一次性
加载时的应力-应
变曲线相似



➤ 混凝土的强度和变形

- 混凝土的变形性能
 - 混凝土的变形模量

原点切线模量（弹性模量）：拉压相同

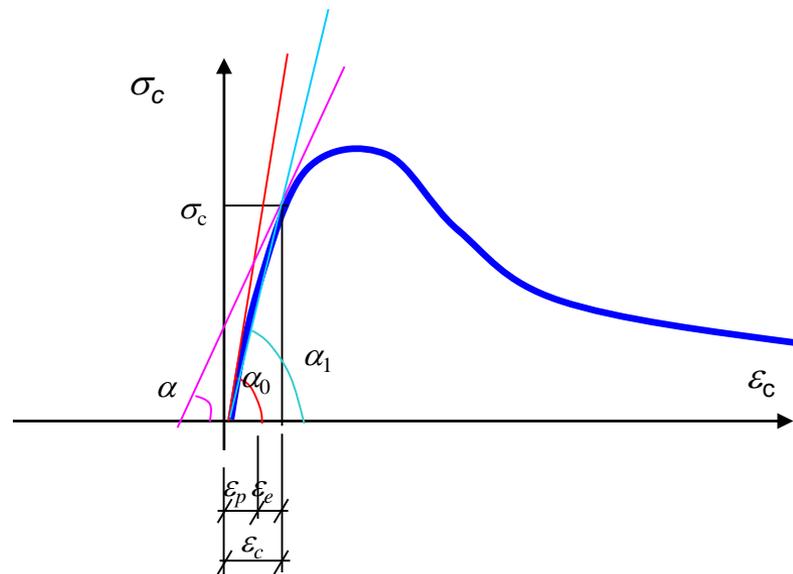
$$E_c = \tan \alpha_0 = \sigma_c / \varepsilon_e$$

变形模量（割线模量、弹塑性模量）

$$E_c' = \tan \alpha_1 = \sigma_c / \varepsilon_c$$

切线模量

$$E_c'' = \tan \alpha = \frac{d\sigma_c}{d\varepsilon_c}$$



$$E_c' = \nu E_c$$

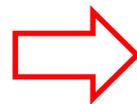
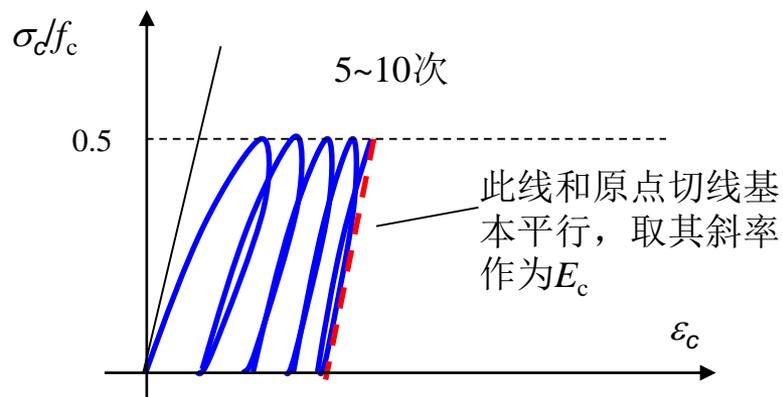


受压时，为0.4~1.0；
受拉破坏时，为1.0



➤ 混凝土的强度和变形

- 混凝土的变形性能
 - 混凝土弹性模量标准试验测试方法



$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.74}{f_{cu}}} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$



➤ 混凝土的强度和变形

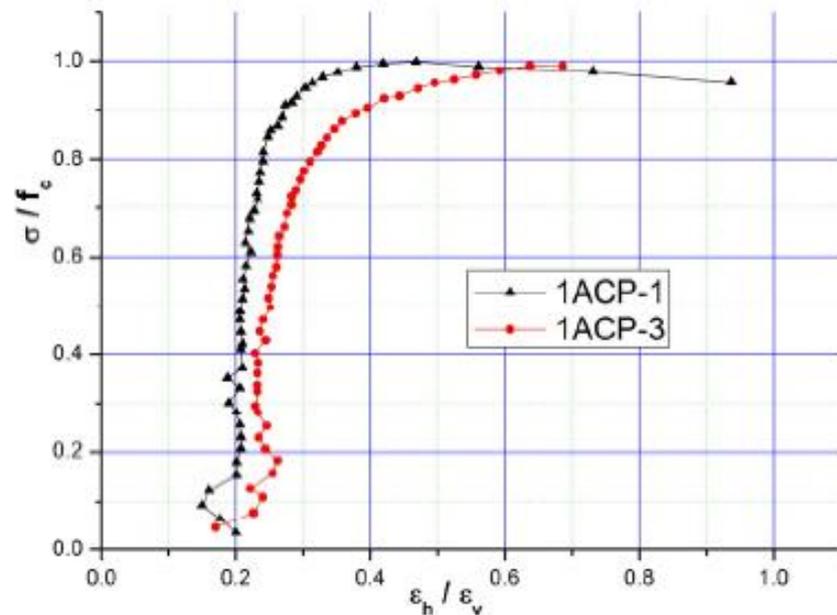
• 混凝土的变形性能

• 混凝土的泊松比

混凝土的泊松比，在压力较小时为0.15~0.18，接近破坏时可达0.5以上，一般可取0.2

• 混凝土的剪切模量

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

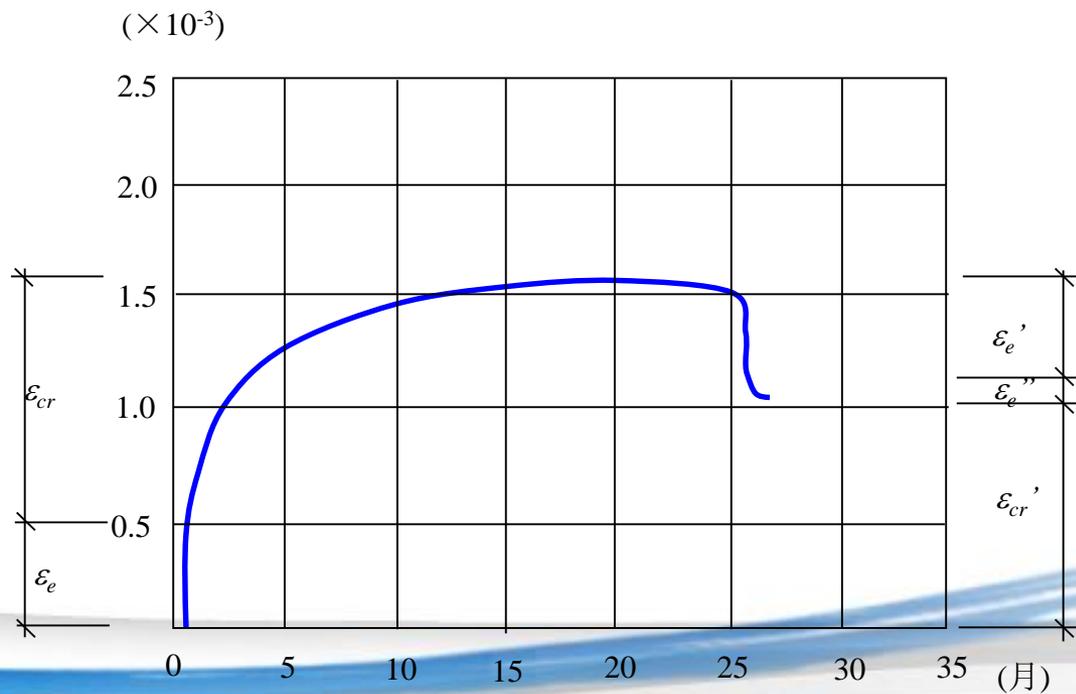
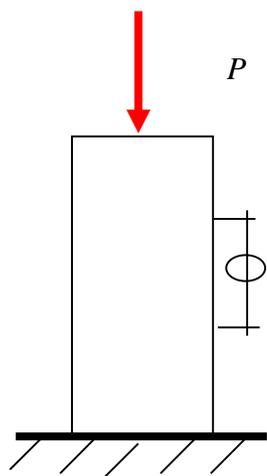




➤ 混凝土的强度和变形

- 混凝土的变形性能

- 长期荷载作用下混凝土的变形——徐变





➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土的变形性能

• 长期荷载作用下混凝土的变形——徐变

$$\sigma_c < 0.5f_c$$

徐变变形与应力成正比

线性徐变

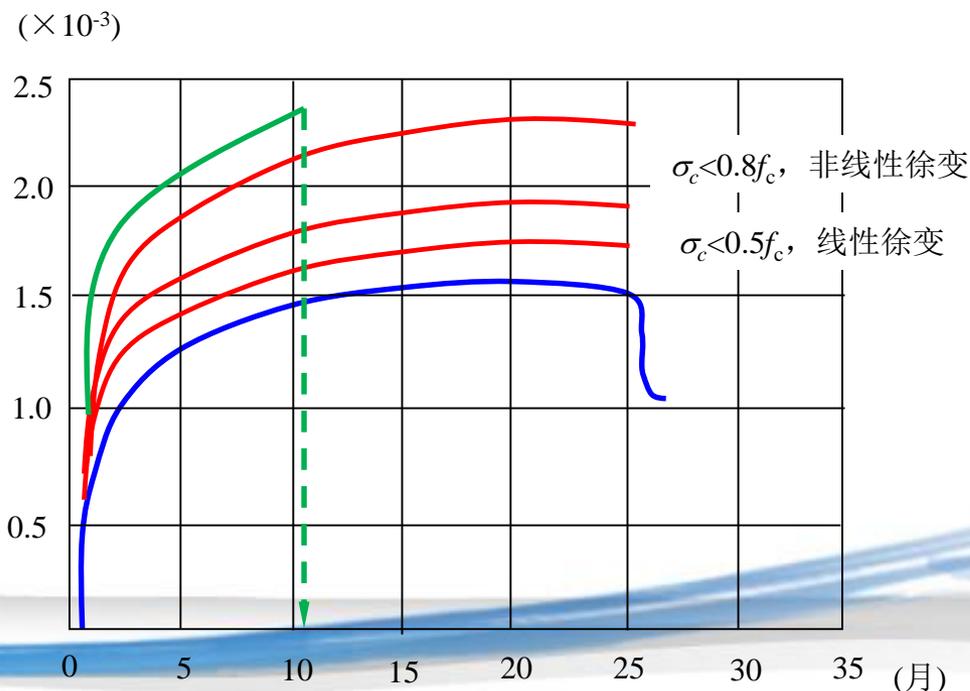
$$0.5f_c < \sigma_c < 0.8f_c$$

非线性徐变

$$\sigma_c > 0.8f_c$$

造成混凝土破坏

不稳定





➤ 混凝土的强度和变形

• 混凝土的变形性能

• 长期荷载作用下混凝土的变形——徐变

– 徐变产生的原因：

1) 胶凝体的粘性流动

2) 混凝土内部微裂缝的不断发展

– 加荷时混凝土的龄期，越早，徐变越大

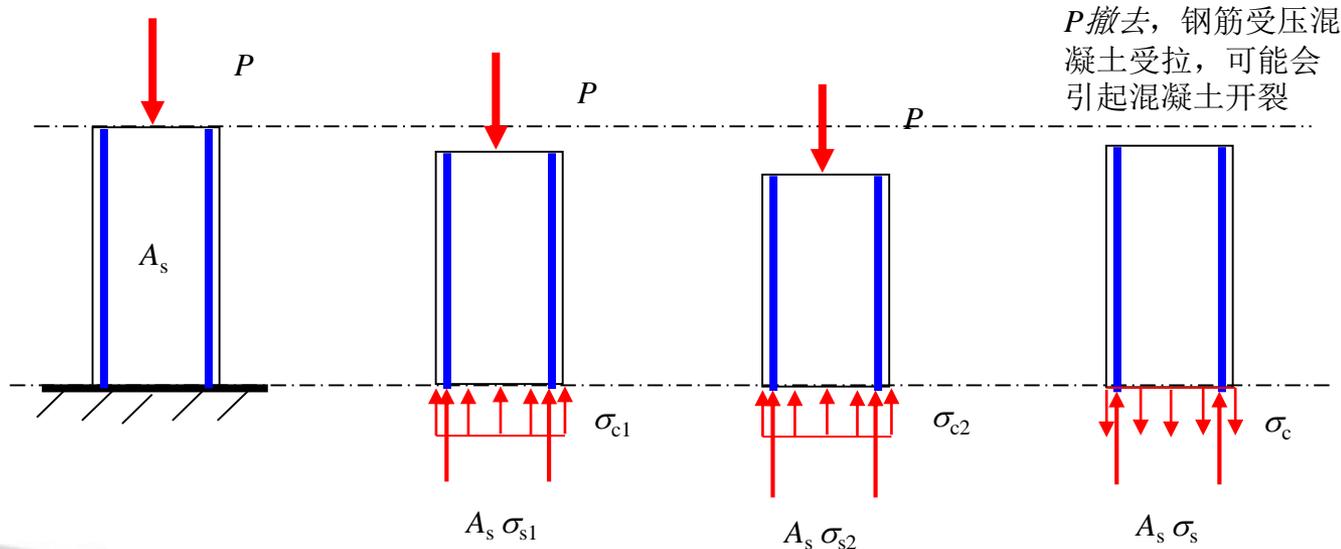
– 水泥用量越多，水灰比越大，徐变越大

– 骨料越硬，徐变越小



➤ 混凝土的强度和变形

- 混凝土的变形性能
 - 徐变对混凝土结构的影响



P 撤去，钢筋受压
混凝土受拉，可能会
引起混凝土开裂

徐变: $\sigma_s \uparrow$, $\sigma_c \downarrow$



➤ 混凝土的强度和变形

- 混凝土的变形性能
 - 混凝土的干缩

水泥品种：等级越高，收缩越大

水泥用量：水泥用量越多，水灰比越大，收缩越大

骨料：骨料越硬，收缩越小

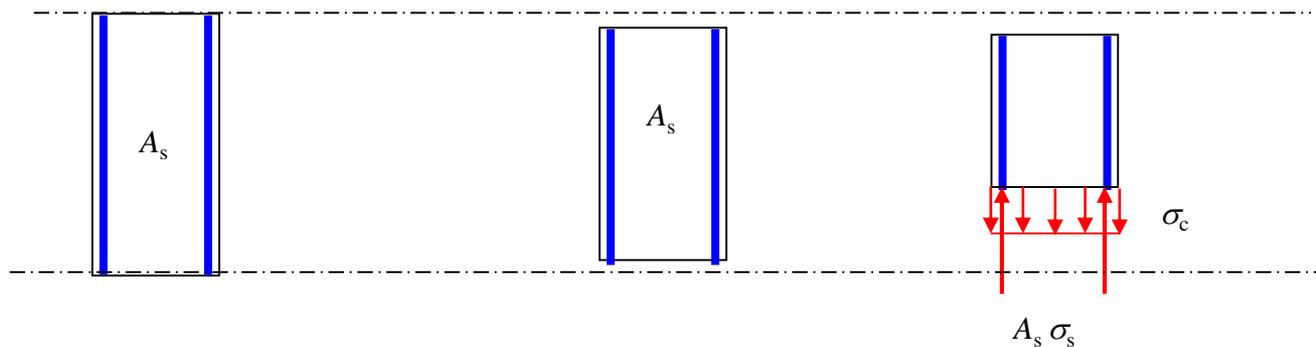
其它因素：养护条件、制作方法、使用环境、体积与表面积的比值等





➤ 混凝土的强度和变形

- 混凝土的变形性能
 - 干缩对混凝土结构的影响



收缩： 钢筋受压， 混凝土受拉