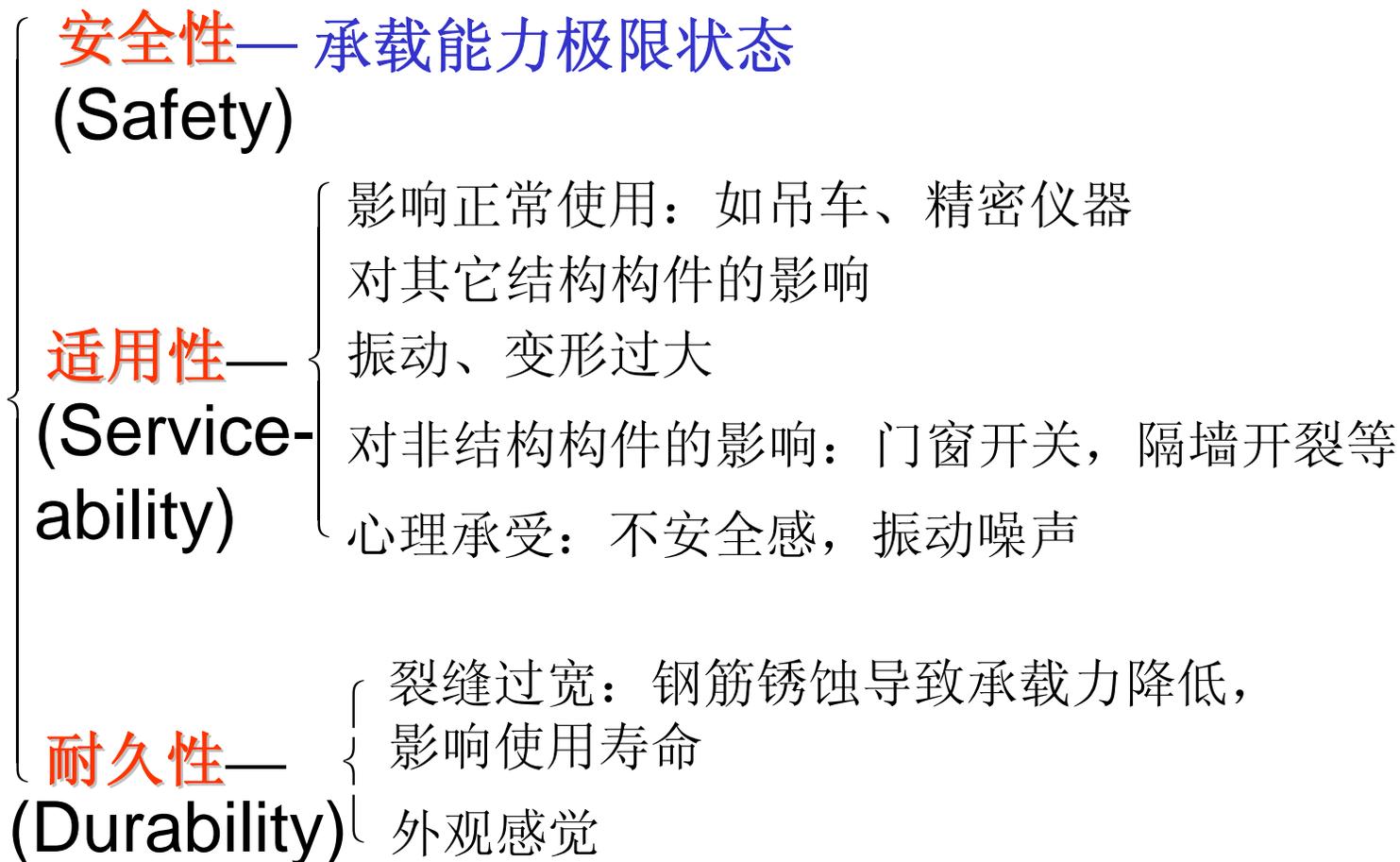


第11章 正常使用阶段的验算

Serviceability Requirements

11.1 概述

结构的 功能



对于超过**正常使用极限状态**的情况，对生命财产的危害性比超过承载力极限状态要小，相应的可靠度水平可比承载力极限状态低一些。

正常使用极限状态的计算表达式为

$$S_k \leq R_k$$

S_k ：作用效应标准值，如挠度变形和裂缝宽度，根据**荷载标准值**和**材料强度标准值**确定。

以受弯构件为例，荷载标准值产生的弯矩可表示为

$$M_{sk} = C_G G_k + C_Q Q_k$$

因活荷载达到标准值 Q_k 的作用时间较短，故 M_{sk} 称为**短期弯矩**，其值约为弯矩设计值的**50%~70%**。

在荷载的长期作用下，混凝土构件的变形和裂缝宽度随时间增长，因此需要考虑荷载长期作用的影响，

长期弯矩： $M_{lk} = C_G G_k + \psi_q C_Q Q_k$

ψ_q 为**活荷载准永久值系数**（quasi-permanent load）

对于超过**正常使用极限状态**的情况，对生命财产的危害性比超过承载力极限状态要小，相应的可靠度水平可比承载力极限状态低一些。

正常使用极限状态的计算表达式为

$$S_k \leq R_k$$

S_k ：作用效应标准值，如挠度变形和裂缝宽度，根据**荷载标准值**和**材料强度标准值**确定。

$$\text{挠度} = f(M_{sk}, M_{lk}, f_{tk}, b, h, A_s, \dots)$$

$$\text{裂缝宽度 } w(M_{sk}, M_{lk}, f_{tk}, b, h, A_s, \dots)$$

11.2 受弯构件的变形验算

一、变形限值 $f \leq [f]$

$[f]$ 为挠度变形限值。主要从以下几个方面考虑：

- 1、**保证结构的使用功能要求**。结构构件产生过大的变形将影响甚至丧失其使用功能，如支承精密仪器设备的梁板结构挠度过大，将难以使仪器保持水平；屋面结构挠度过大会造成积水而产生渗漏；吊车梁和桥梁的过大变形会妨碍吊车和车辆的正常运行等。
- 2、**防止对结构构件产生不良影响**。如支承在砖墙上的梁端产生过大转角，将使支承面积减小、支承反力偏心增大，并会引起墙体开裂。
- 3、**防止对非结构构件产生不良影响**。结构变形过大会使门窗等不能正常开关，也会导致隔墙、天花板的开裂或损坏。

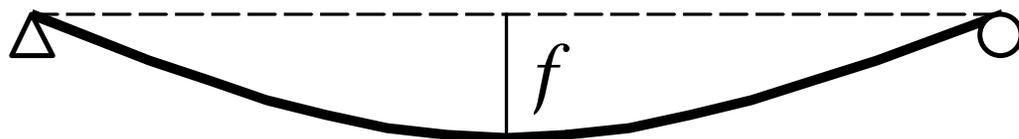
- 4、保证使用者的感觉在可接受的程度之内。过大振动、变形会引起使用者的不适或不安全感。

表 11.1 受弯构件的挠度限值

构件类型	挠度限值（以计算跨度 l_0 计算）
吊车梁：手动吊车	$l_0/500$
电动吊车	$l_0/600$
屋盖、楼盖及楼梯构件：	
当 $l_0 \leq 7\text{m}$ 时	$l_0/200(l_0/250)$
当 $7\text{m} \leq l_0 \leq 9\text{m}$ 时	$l_0/250(l_0/300)$
当 $l_0 > 9\text{m}$ 时	$l_0/300(l_0/400)$

- 注：1、表中括号内数值适用于使用上对挠度有较高要求的构件；
2、悬臂构件的挠度限值按表中相应数值乘以系数 2.0 取用。

二、钢筋混凝土梁抗弯刚度的特点



$$\left. \begin{array}{l} \text{均布: } f = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql^4}{EI} = \frac{5}{48} \cdot \frac{Ml^2}{EI} \\ \text{集中: } f = \frac{1}{48} \cdot \frac{Pl^3}{EI} = \frac{1}{12} \cdot \frac{Ml^2}{EI} \end{array} \right\} \Rightarrow f = S \frac{M}{EI} l^2 = S\phi \cdot l^2$$

$$\phi = \frac{M}{EI} \rightarrow EI = \frac{M}{\phi} \rightarrow M = EI \cdot \phi$$

截面**抗弯刚度** EI 体现了截面抵抗弯曲变形的能力，同时也反映了截面弯矩与曲率之间的物理关系。

对于弹性均质材料截面， EI 为常数， M - ϕ 关系为直线。

刚度是反映力与变形之间的关系：

材料 应力-应变： $\sigma = E \varepsilon$

截面 弯矩-曲率： $M = EI \times \phi$

构件 荷载-挠度： $P = 48 \times \frac{EI}{l^3} \times f$ (集中荷载)

结构 水平力-侧移： $V = 12 \frac{EI}{h^3} \delta$ (两端刚接)

材料力学中曲率与弯矩关系的推导

$$\phi = \frac{\varepsilon}{y}$$

几何关系

$$\phi = \frac{M}{EI}$$

$$\sigma = E\varepsilon \rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

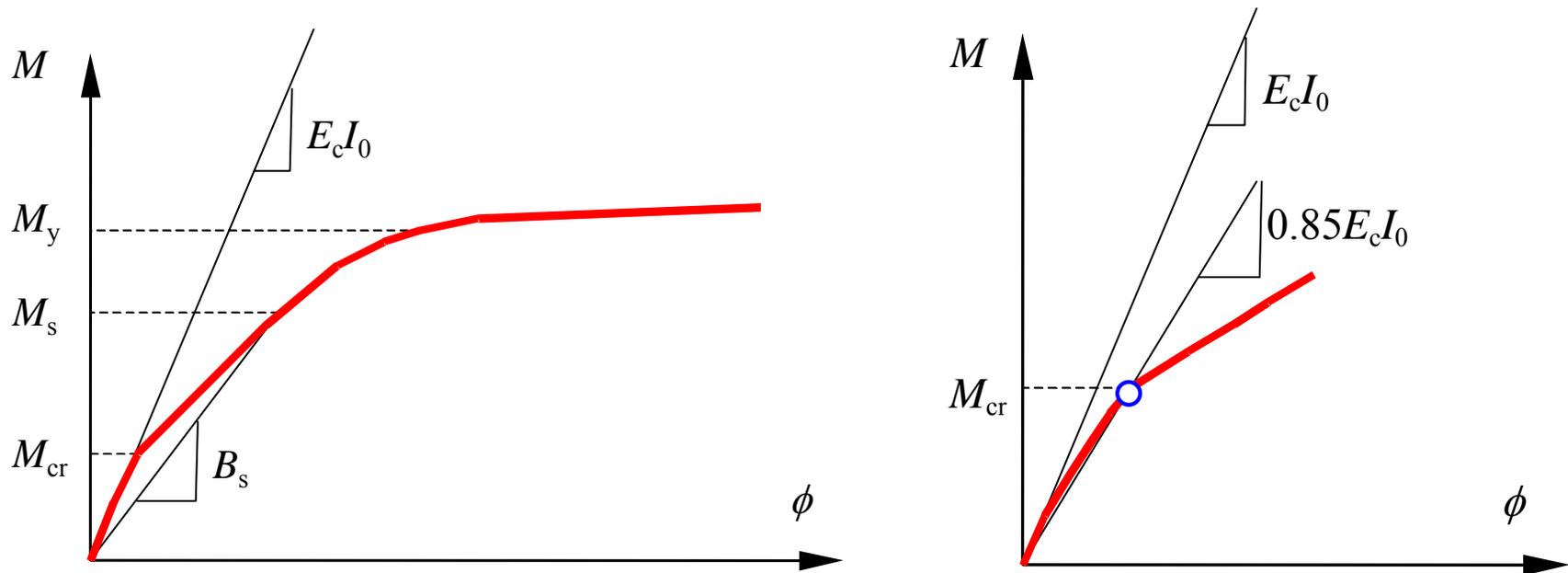
物理关系

$$\sigma = \frac{M}{I} y$$

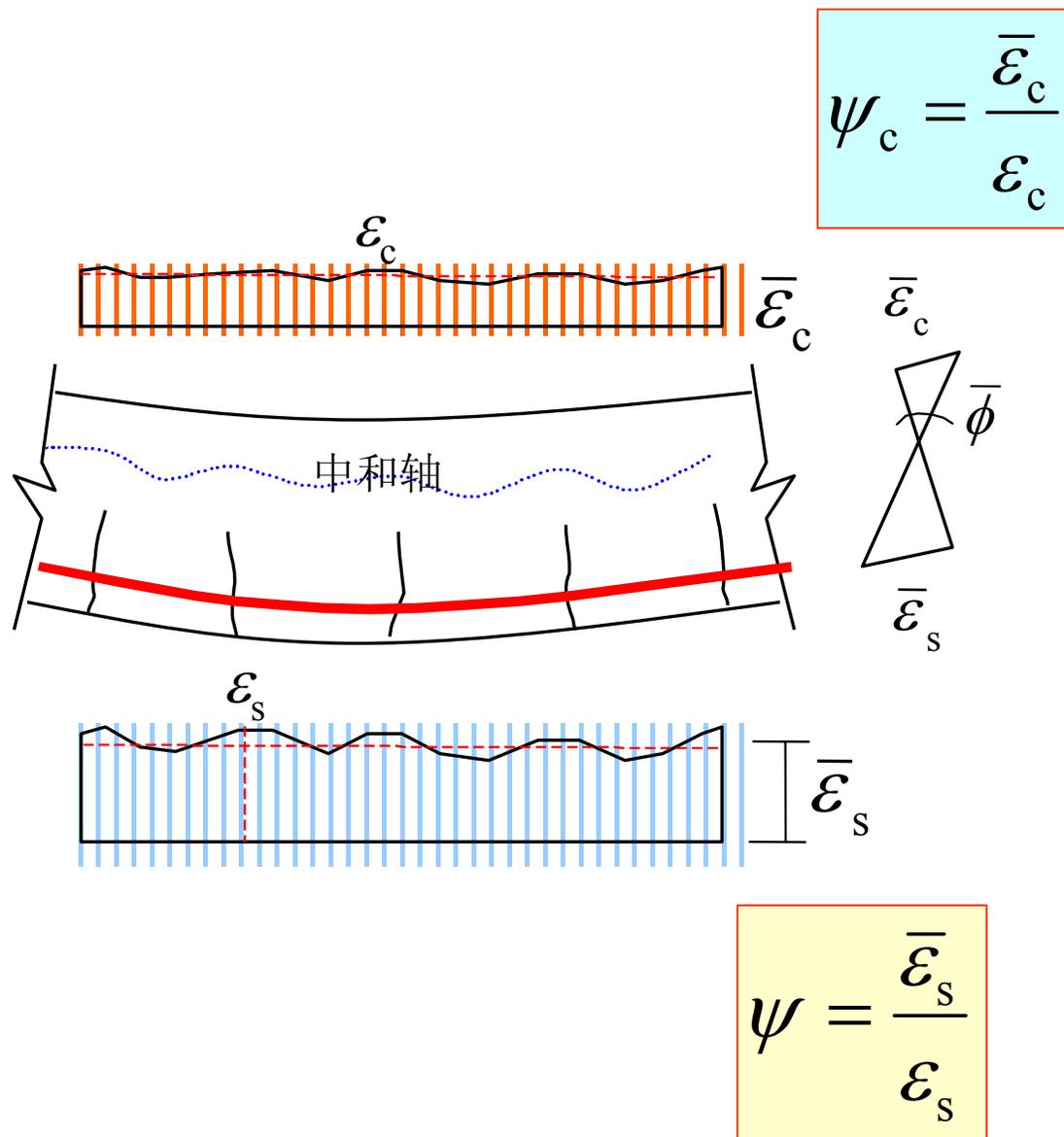
平衡关系

$$\phi = \frac{\varepsilon}{y} = \frac{\sigma}{Ey} = \frac{M}{EI}$$

对于**RC适筋梁**，由于混凝土开裂、弹塑性应力-应变关系和钢筋屈服等影响，其 **$M-\phi$** 关系不再是直线，而是随弯矩的增大，截面曲率呈曲线变化。



短期弯矩 M_{sk} 一般处于第II阶段，刚度计算需要研究构件带裂缝时的工作情况。该阶段裂缝基本等间距分布，钢筋和混凝土的应变分布具有以下特征：



三、刚度公式的建立

材料力学中曲率与弯矩关系的推导

$$\phi = \frac{\varepsilon}{y}$$

几何关系

$$\phi = \frac{M}{EI}$$

$$\sigma = E\varepsilon \rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

物理关系

$$\sigma = \frac{M}{I} y$$

平衡关系

$$\phi = \frac{\varepsilon}{y} = \frac{\sigma}{Ey} = \frac{M}{EI}$$

1、几何关系:

$$\bar{\phi} = \frac{\bar{\varepsilon}_s + \bar{\varepsilon}_c}{h_0}$$

2、物理关系:

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s}, \quad \varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{\nu E_c}$$

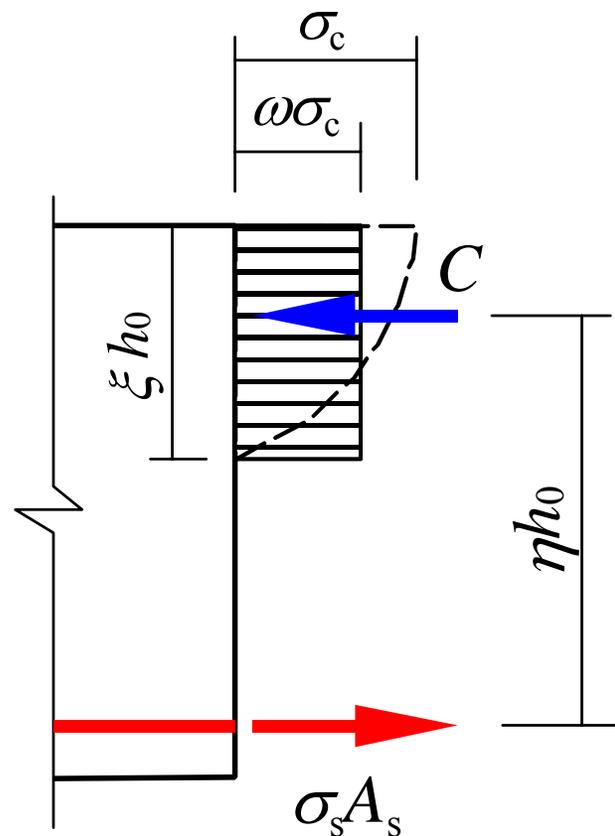
3、平衡关系: 根据裂缝截面的应力分布

$$M_s = C \cdot \eta h_0 = \omega \sigma_c \cdot \xi h_0 \cdot b \cdot \eta h_0$$

$$M_s = T \cdot \eta h_0 = \sigma_s A_s \cdot \eta h_0$$

$$\sigma_c = \frac{M_s}{\omega \xi \eta b h_0^2}$$

$$\sigma_s = \frac{M_s}{A_s \cdot \eta h_0}$$



$$\bar{\varepsilon}_c = \psi_c \varepsilon_c = \psi_c \frac{\sigma_c}{\nu E_c} = \psi_c \frac{M_s}{\omega \xi \eta \nu E_c b h_0^2} = \frac{M_s}{\zeta \cdot E_c b h_0^2}$$

$$\bar{\varepsilon}_s = \psi \varepsilon_s = \psi \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{\psi}{\eta} \cdot \frac{M_s}{E_s A_s \cdot h_0}$$

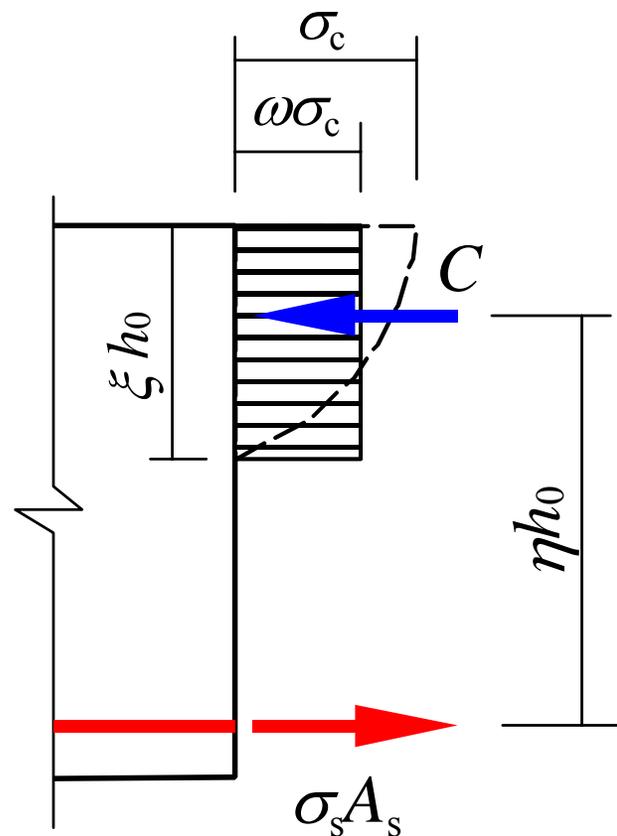
3、平衡关系：根据裂缝截面的应力分布

$$M_s = C \cdot \eta h_0 = \omega \sigma_c \cdot \xi h_0 \cdot b \cdot \eta h_0$$

$$M_s = T \cdot \eta h_0 = \sigma_s A_s \cdot \eta h_0$$

$$\sigma_c = \frac{M_s}{\omega \xi \eta b h_0^2}$$

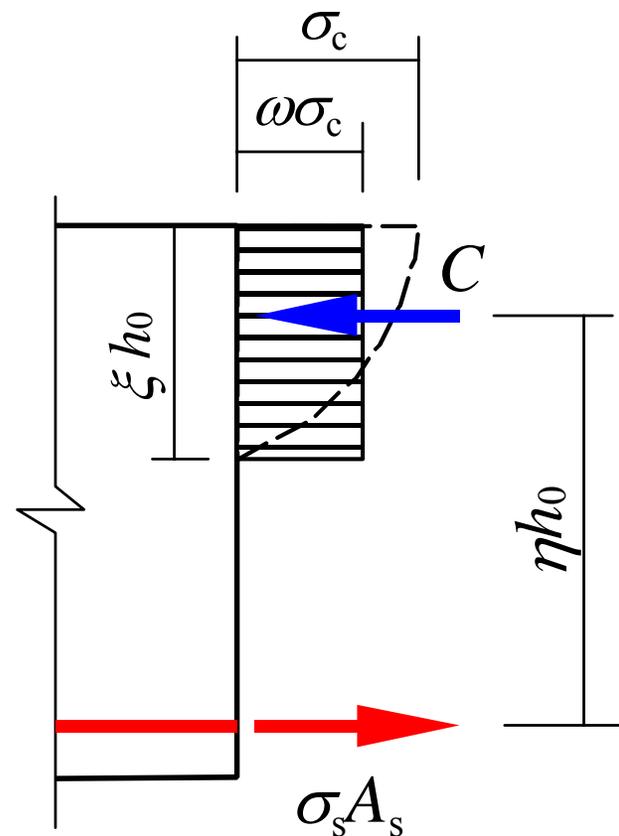
$$\sigma_s = \frac{M_s}{A_s \cdot \eta h_0}$$



$$\bar{\varepsilon}_c = \psi_c \varepsilon_c = \psi_c \frac{\sigma_c}{\nu E_c} = \psi_c \frac{M_s}{\omega \xi \eta \nu E_c b h_0^2} = \frac{M_s}{\zeta \cdot E_c b h_0^2}$$

$$\bar{\varepsilon}_s = \psi \varepsilon_s = \psi \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{\psi}{\eta} \cdot \frac{M_s}{E_s A_s \cdot h_0}$$

$$\bar{\phi} = \frac{M_s}{B_s} = \frac{\bar{\varepsilon}_s + \bar{\varepsilon}_c}{h_0}$$



$$\bar{\varepsilon}_c = \psi_c \varepsilon_c = \psi_c \frac{\sigma_c}{\nu E_c} = \psi_c \frac{M_s}{\omega \xi \eta \nu E_c b h_0^2} = \frac{M_s}{\zeta \cdot E_c b h_0^2}$$

$$\bar{\varepsilon}_s = \psi \varepsilon_s = \psi \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{\psi}{\eta} \cdot \frac{M_s}{E_s A_s \cdot h_0}$$

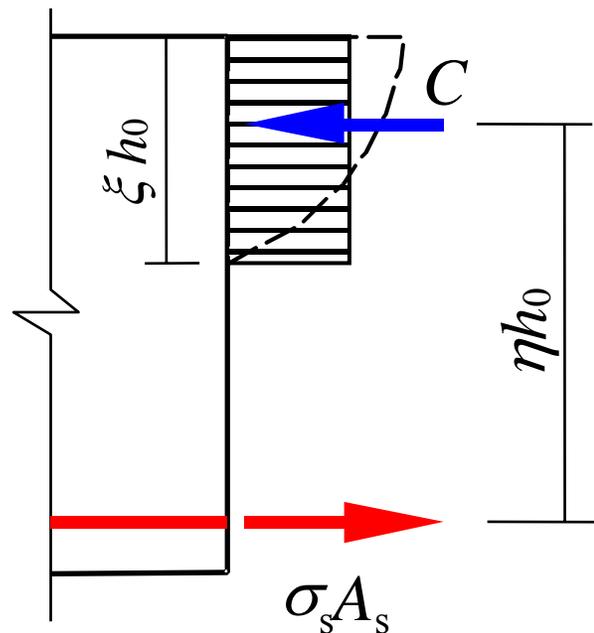
$$\bar{\phi} = \frac{M_s}{B_s} = \frac{\bar{\varepsilon}_s + \bar{\varepsilon}_c}{h_0} = \frac{\frac{M_s}{\zeta \cdot E_c b h_0^2} + \frac{\psi}{\eta} \cdot \frac{M_s}{E_s A_s h_0}}{h_0}$$

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{\frac{\psi}{\eta} + \frac{\alpha_E \rho}{\zeta}}$$

四、参数 η 、 ζ 和 ψ

1、开裂截面的内力臂系数 η

$$\eta = (1 - 0.5\xi)$$



- ◆ 试验和理论分析表明，在短期弯矩 $M_{sk} = (0.5 \sim 0.7) M_u$ 范围，裂缝截面的相对受压区高度 ξ 变化很小，内力臂的变化也不大。
- ◆ 一般情况下， η 值在0.83~0.93之间波动。
- ◆ 《规范》为简化计算，取 $\eta=0.87$ 。

2、受压区边缘混凝土平均应变综合系数 ζ

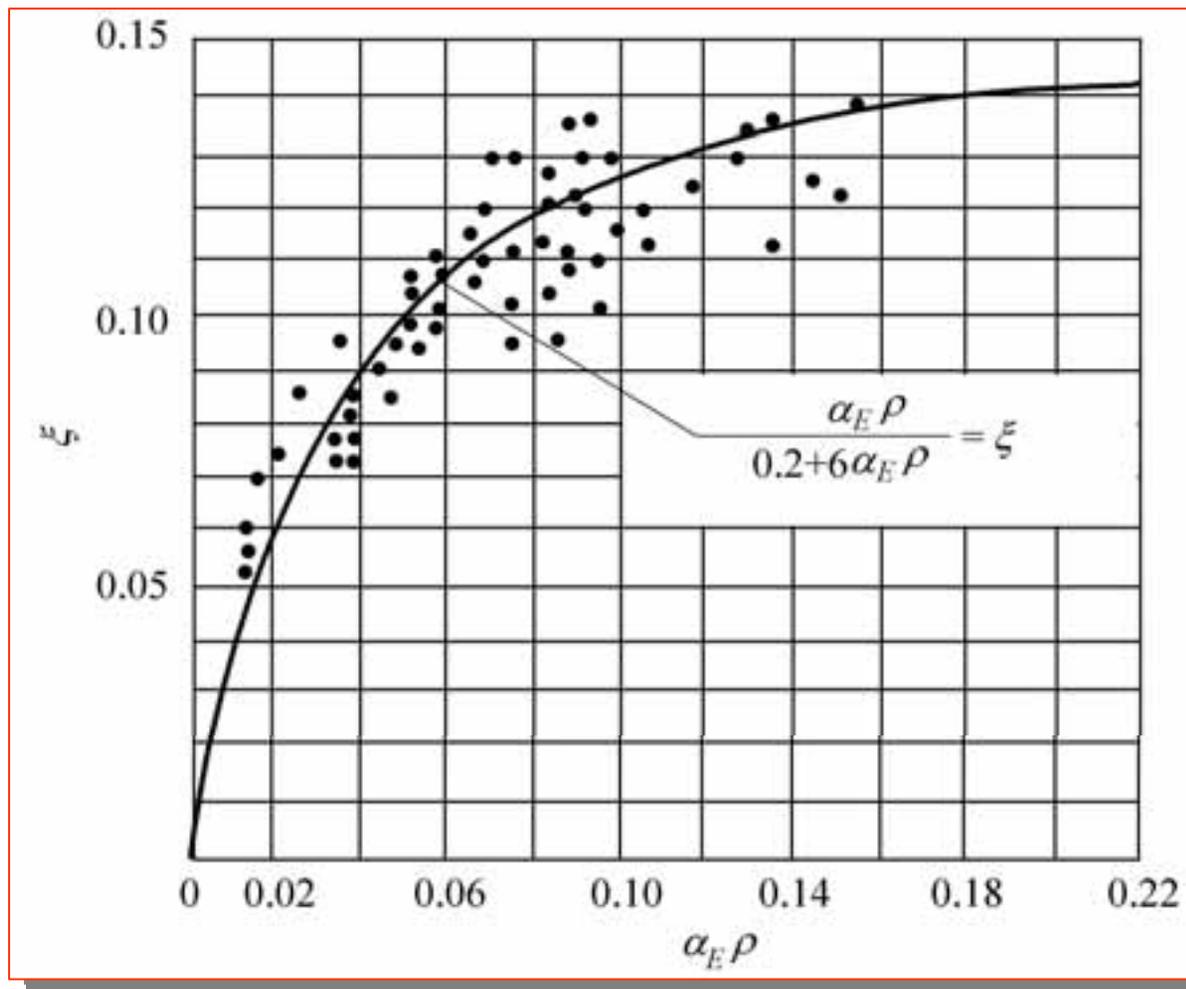
$$\bar{\varepsilon}_c = \frac{M_s}{\zeta \cdot E_c b h_0^2} \quad \longrightarrow \quad \zeta = \frac{M_s}{\bar{\varepsilon}_c \cdot E_c b h_0^2}$$

- ◆ 根据试验实测受压边缘混凝土的平均压应变，可以得到系数 ζ 的试验值。
- ◆ 在短期弯矩 $M_{sk} = (0.5 \sim 0.7) M_u$ 范围，系数 ζ 的变化很小，仅与配筋率有关。
- ◆ 《规范》根据试验结果分析给出

$$\frac{\alpha_E \rho}{\zeta} = 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma'_f}$$

$$\gamma'_f = \frac{(b'_f - b)h'_f}{bh_0}$$

受压翼缘加强系数

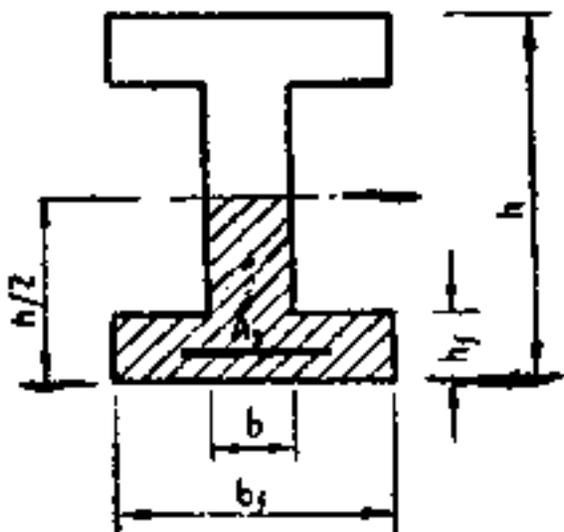


3、钢筋应变不均匀系数 ψ

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\sigma_{sk} \rho_{te}}$$

$$\sigma_{sk} = \frac{M_{sk}}{A_s \cdot \eta h_0}$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}}$$



有效受拉面积

ρ_{te} 为以有效受拉混凝土截面面积计算的受拉钢筋配筋率。

A_{te} 为有效受拉混凝土截面面积，对受弯构件取

$$A_{te} = 0.5bh + (b_f - b)h_f$$

3、钢筋应变不均匀系数 ψ

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\sigma_{sk} \rho_{te}}$$

$$\sigma_{sk} = \frac{M_{sk}}{A_s \cdot \eta h_0}$$

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{A_{te}}$$

当 $\psi < 0.2$ 时，取 $\psi = 0.2$ ；

当 $\psi > 1.0$ 时，取 $\psi = 1.0$ ；

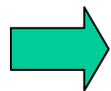
对直接承受重复荷载作用的构件，取 $\psi = 1.0$ 。

ρ_{te} 为以有效受拉混凝土截面面积计算的受拉钢筋配筋率。

A_{te} 为有效受拉混凝土截面面积，对受弯构件取

$$A_{te} = 0.5bh + (b_f - b)h_f$$

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{\frac{\psi}{\eta} + \frac{\alpha_E \rho}{\zeta}}$$

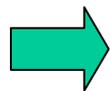


$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma'_f}}$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\sigma_{sk} \rho_{te}}$$

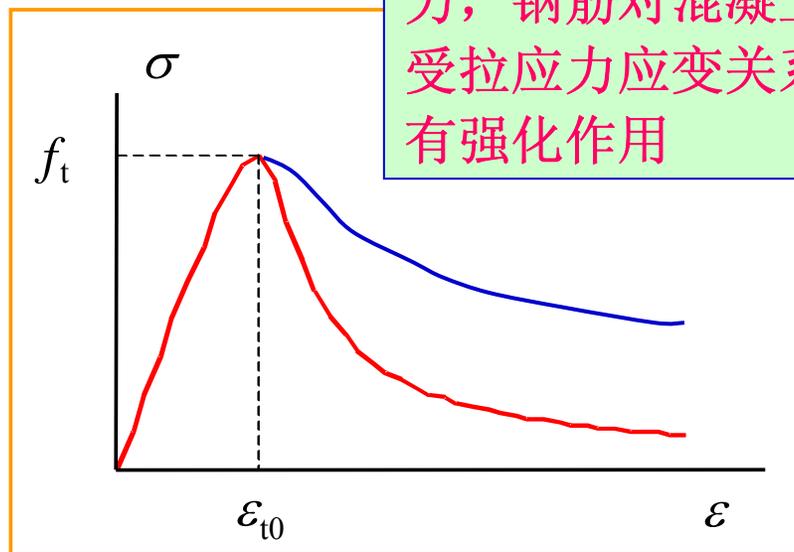
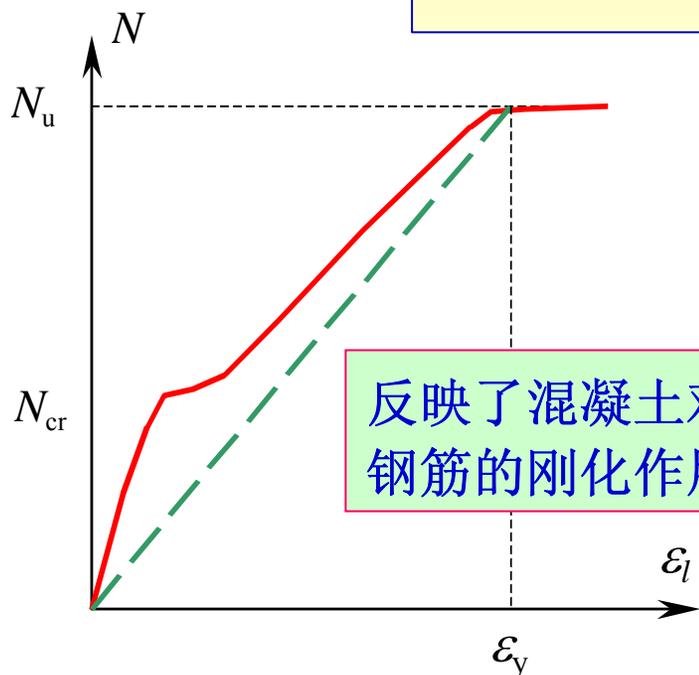
- 在短期弯矩 $M_{sk} = (0.5 \sim 0.7) M_u$ 范围，三个参数 η 、 ζ 和 ψ 中， η 和 ζ 为常数，而 ψ 随弯矩增长而增大。
- 该参数反映了裂缝间混凝土参与受拉工作的情况
- 随着弯矩增加，由于裂缝间粘结力的逐渐破坏，混凝土参与受拉的程度减小，平均应变增大， ψ 逐渐趋于1.0，抗弯刚度逐渐降低。

$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{\frac{\psi}{\eta} + \frac{\alpha_E \rho}{\zeta}}$$



$$B_s = \frac{E_s A_s h_0^2}{1.15\psi + 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma'_f}}$$

$$\psi = 1.1 - 0.65 \frac{f_{tk}}{\sigma_{sk} \rho_{te}}$$



反过来，受拉区混凝土仍然有拉应力，钢筋对混凝土受拉应力应变关系有强化作用

五、长期荷载作用下的抗弯刚度

- 在长期荷载作用下，混凝土的徐变会使梁的挠度随时间增长。
- 此外，钢筋与混凝土间粘结滑移徐变、混凝土的收缩等也会导致梁的挠度增大。
- 根据长期试验观测结果，长期挠度与短期挠度的比值 θ 为，

$$\theta = 2.0 - 0.4 \frac{\rho'}{\rho}$$

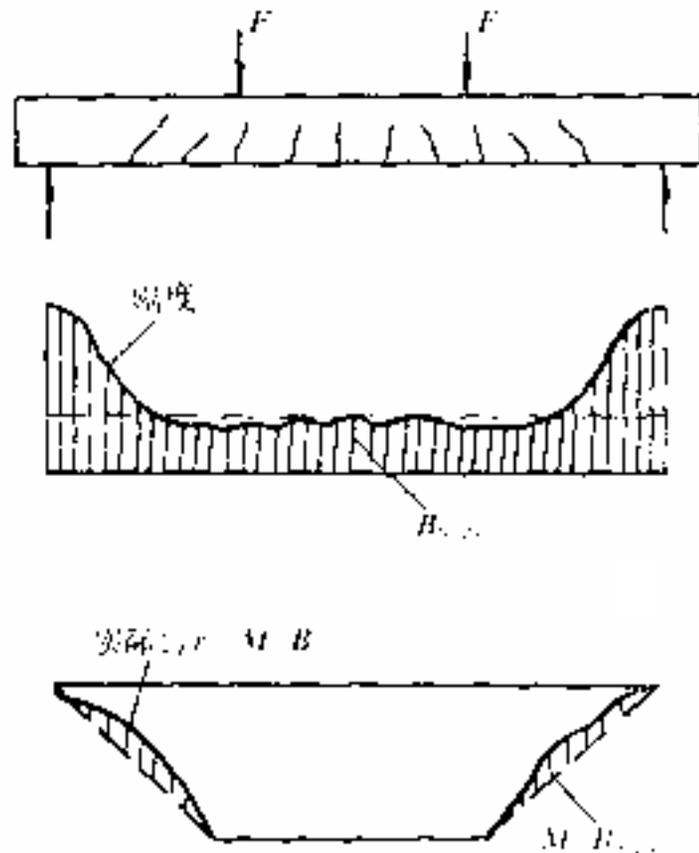
$$f = \theta \cdot S \frac{M_l}{B_s} l^2 + S \frac{(M_s - M_l)}{B_s} l^2 \longrightarrow f = S \frac{M_l}{B_s} l^2$$

长期抗弯刚度

$$B_l = \frac{M_s}{M_s + (\theta - 1)M_l} B_s$$

六、受弯构件的挠度变形验算

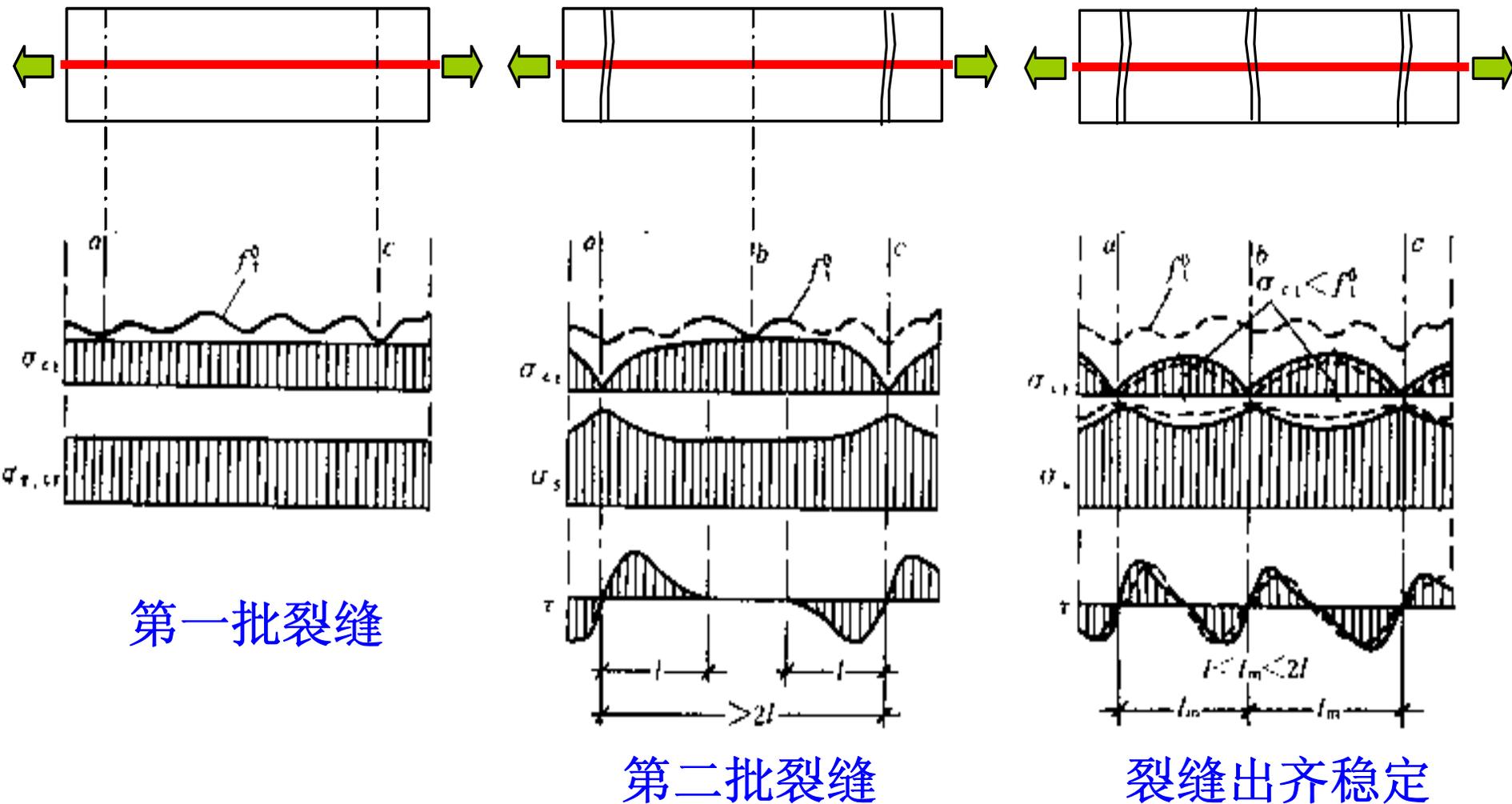
- ◆ 弯矩沿梁长的变化的，抗弯刚度沿梁长也是变化的。按变刚度梁来计算挠度变形很麻烦。
- ◆ 《规范》为简化，取同号弯矩区段的最大弯矩截面处的最小刚度 B_{\min} ，按等刚度梁来计算。
- ◆ 以上简化方法的计算结果比按变刚度梁的理论值略偏大。
- ◆ 但靠近支座处的曲率误差对梁的最大挠度影响很小，且挠度计算仅考虑弯曲变形的影响，实际上还存在一些剪切变形，故按最小刚度 B_{\min} 计算的结果与实测结果的误差很小。



“最小刚度原则”

11.3 荷载引起的裂缝宽度计算

一、裂缝的出现、分布与开展



- ★ 裂缝出现前，混凝土和钢筋的应变沿构件长度基本均匀分布
- ★ 当混凝土的拉应力达到抗拉强度时，首先会在构件最薄弱截面位置出现第一条（批）裂缝。
- ★ 裂缝出现瞬间，裂缝截面的混凝土退出受拉工作，应力降为零，而钢筋拉应力突增 $\Delta\sigma_s = f_t / \rho$ ，配筋率越小， $\Delta\sigma_s$ 越大。
- ★ 由于钢筋与混凝土之间存在粘结，随着距裂缝截面距离的增加，混凝土中又重新建立起拉应力，而钢筋的拉应力则随距裂缝截面距离的增加而减小。
- ★ 当距裂缝截面有足够长度 l 时，混凝土拉应力 σ_c 又可增大到 f_t ，此时将会出现新的一条（批）裂缝。
- ★ 如果两条裂缝的间距小于 $2l$ ，由于粘结应力传递长度不够，混凝土拉应力不可能再达到 f_t ，因此将不会出现新的裂缝。
- ★ 裂缝间距最终将稳定在 $(l \sim 2l)$ 之间，平均间距可取 $1.5l$

- ★ 从第一条（批）裂缝出现到裂缝全部出齐为**裂缝出现阶段**，该阶段荷载增量并不大，主要取决于混凝土强度的离散程度
- ★ **裂缝间距**的计算公式就是以该阶段的受力分析建立的。
- ★ **裂缝出齐后**，随着荷载的继续增加，裂缝宽度不断开展，为**裂缝开展阶段**。
- ★ 裂缝开展是由于混凝土的回缩，钢筋不断伸长，导致钢筋与混凝土之间产生变形差，**这是裂缝宽度计算的依据**。
- ★ **由于混凝土的不均匀性**，裂缝的出现、分布和开展具有很大的离散性，因此裂缝间距和宽度也是不均匀的。
- ★ 大量的试验统计资料分析表明，**裂缝间距和宽度的平均值**具有一定规律性，是钢筋与混凝土间的**粘结传力机理**的反映。

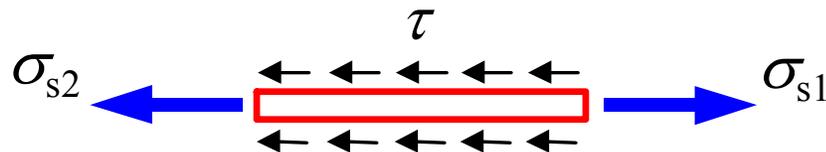
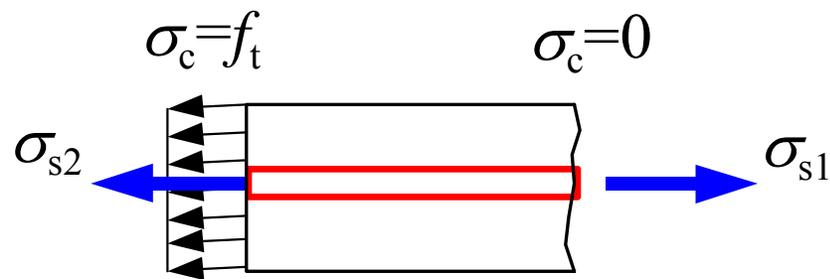
二、裂缝间距

$$\sigma_{s1} A_s = \sigma_{s2} A_s + f_t A_c$$

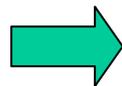
$$\sigma_{s1} A_s - \sigma_{s2} A_s = \tau_m \cdot u \cdot l$$

$$\tau_m \cdot u \cdot l = f_t A_c$$

$$l = \frac{f_t A_c}{\tau_m u} = \frac{f_t A_c}{\tau_m \cdot \pi d} = \frac{1}{4} \cdot \frac{f_t}{\tau_m} \cdot \frac{d}{\rho}$$



$$l = \frac{f_t A_c}{\tau_m u} = \frac{1}{4} \cdot \frac{f_t}{\tau_m} \cdot \frac{d}{\rho}$$



$$l_m = K \cdot \frac{d}{\rho}$$

- ◆ 上式表明，当配筋率 ρ 相同时，钢筋直径越细，裂缝间距越小，裂缝宽度也越小，也即裂缝密而细，这是控制裂缝宽度的一个重要原则。
- ◆ 当 d/ρ 趋于零时，裂缝间距趋于零，这不符合实际情况。
- ◆ 试验表明，当 d/ρ 很大时，裂缝间距趋近于某个常数。该数值与保护层 c 和钢筋净间距有关。
- ◆ 根据试验分析，上式修正如下：

$$l_m = K_2 c + K_1 \cdot \frac{d}{\rho}$$

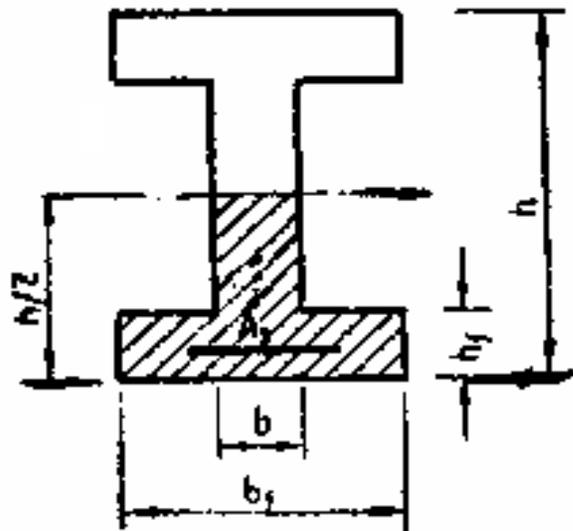
- ◆ 对于受弯构件，可将受拉区近似作为一轴心受拉构件
- ◆ 根据粘结力的有效影响范围，取有效受拉面积 $A_{te} = 0.5bh + (b_f - b)h_f$
- ◆ 因此将配筋率 ρ 的用受拉区有效配筋率替换后，即可用于受弯构件

$$\rho_{te} = \frac{A_s}{0.5bh + (b_f - b)h_f}$$

- ◆ 采用 ρ_{te} 后，裂缝间距可统一表示为

$$l_m = K_2c + K_1 \cdot \frac{d}{\rho_{te}}$$

$$l_m = K_2c + K_1 \cdot \frac{d}{\rho}$$



根据试验资料统计分析，并考虑不同构件受力特征的影响，对于常用的带肋钢筋，《规范》给出的平均裂缝间距 l_m 为，

受弯构件

$$l_m = 1.9c + 0.08 \cdot \frac{d}{\rho_{te}}$$

轴心受拉构件

$$l_m = 1.1(1.9c + 0.08 \cdot \frac{d}{\rho_{te}})$$

c ——最外层纵向受拉钢筋外边缘到受拉区底边的距离(mm)，

当 $c < 20\text{mm}$ 时，取 $c = 20\text{mm}$ ；

当 $c > 65\text{mm}$ 时，取 $c = 65\text{mm}$ ；

d ——钢筋直径(mm)，当用不同直径和不同品种的钢筋时， d 改用换算直径 d_{eq}

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i \nu_i d_i}$$

钢筋的相对粘结特性系数 ν_i

钢筋类别	非预应力钢筋		先张法预应力钢筋			后张法预应力钢筋		
	光面钢筋	带肋钢筋	带肋钢筋	带肋钢丝	钢绞线	带肋钢筋	钢绞线	光面钢丝
ν_i	0.7	1.0	1.0	0.8	0.6	0.8	0.5	0.4

轴心受拉构件

$$l_m = 1.1(1.9c + 0.08 \cdot \frac{d}{\rho_{te}})$$

c ——最外层纵向受拉钢筋外边缘到受拉区底边的距离(mm),

当 $c < 20\text{mm}$ 时, 取 $c = 20\text{mm}$;

当 $c > 65\text{mm}$ 时, 取 $c = 65\text{mm}$;

d ——钢筋直径(mm), 当用不同直径和不同品种的钢筋时, d 改用换算直径 d_{eq}

$$d_{eq} = \frac{\sum n_i d_i^2}{\sum n_i \nu_i d_i}$$

三、裂缝宽度

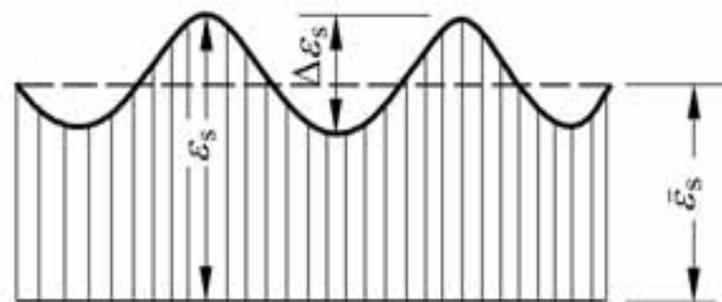
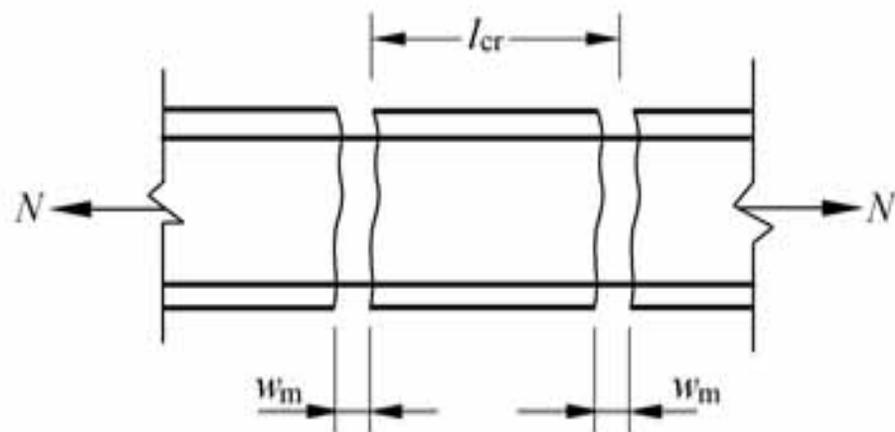
$$w_m = \bar{\varepsilon}_s l_m - \bar{\varepsilon}_c l_m = \bar{\varepsilon}_s \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s}\right) l_m$$

$$\left(1 - \frac{\bar{\varepsilon}_c}{\bar{\varepsilon}_s}\right) \approx 0.85$$

$$\bar{\varepsilon}_s = \psi \varepsilon_s = \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s}$$

◆ 平均裂缝宽度

$$w_m = 0.85 \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_m$$



◆ 最大裂缝宽度

$$w_m = 0.85\psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_m$$

- 实测表明，裂缝宽度具有很大的离散性
- 取实测裂缝宽度 w_t 与上述计算的平均裂缝宽度 w_m 的比值为 τ
- 大量裂缝量测结果统计表明， τ 的概率密度分布基本为正态
- 取**超越概率为5%**的最大裂缝宽度可由下式求得：

$$w_{\max} = w_m (1 + 1.645\delta) = \tau \cdot w_m$$

- 式中， δ 为裂缝宽度变异系数
- 对受弯构件，试验统计得 $\delta=0.4$ ，故取裂缝扩大系数 $\tau=1.66$
- 对于轴心受拉和偏心受拉构件，由试验结果统计得最大裂缝宽度的扩大系数为 $\tau=1.9$

◆ 长期荷载影响

$$w = \tau \cdot w_m = \tau \cdot 0.85 \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_m$$

- 由于混凝土的**滑移徐变**和**拉应力的松弛**，导致裂缝间混凝土不断退出受拉工作，钢筋平均应变增大，裂缝宽度逐渐增大
- **混凝土的收缩**也使裂缝间混凝土的长度缩短，也会导致裂缝宽度不断增大。
- 荷载的变动，**环境温度**的变化，都会使钢筋与混凝土之间的粘结受到削弱，也将导致裂缝宽度不断增大。
- 根据长期观测结果，**长期荷载下裂缝的扩大系数**为 $\tau_l = 1.5$ 。

$$w_{\max} = \tau \cdot \tau_l \cdot w_m = 0.85 \cdot \tau \cdot \tau_l \cdot \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_m$$

$$w_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d}{\rho_{te}} \right)$$

$$w_{\max} = \tau \cdot \tau_l \cdot w_m = 0.85 \cdot \tau \cdot \tau_l \cdot \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_m$$

$$w_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d}{\rho_{te}} \right)$$

受弯构件

$$\alpha_{cr} = 1.5 \times 1.66 \times 0.85 = 2.1$$

轴心受拉构件

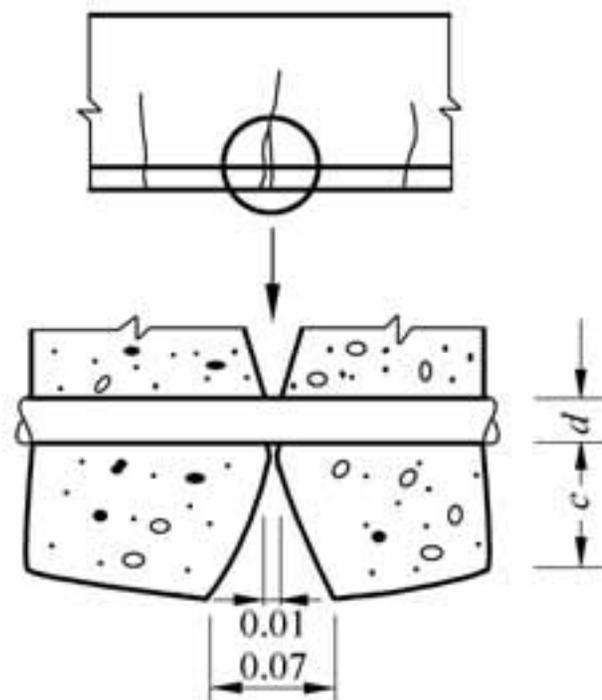
$$\alpha_{cr} = 1.5 \times 1.9 \times 0.85 \times 1.1 = 2.7$$

偏心受拉构件 $\alpha_{cr} = 2.4$

$$w_{\max} = \tau \cdot \tau_l \cdot w_m = 0.85 \cdot \tau \cdot \tau_l \cdot \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_m$$

$$w_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d}{\rho_{te}} \right)$$

保护层越厚，裂缝宽度越大



$$w_{\max} = \tau \cdot \tau_l \cdot w_m = 0.85 \cdot \tau \cdot \tau_l \cdot \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} l_m$$

$$w_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} \left(1.9c + 0.08 \frac{d}{\rho_{te}} \right)$$

保护层越厚，裂缝宽度越大

事实上，上述裂缝宽度是表面裂缝宽度

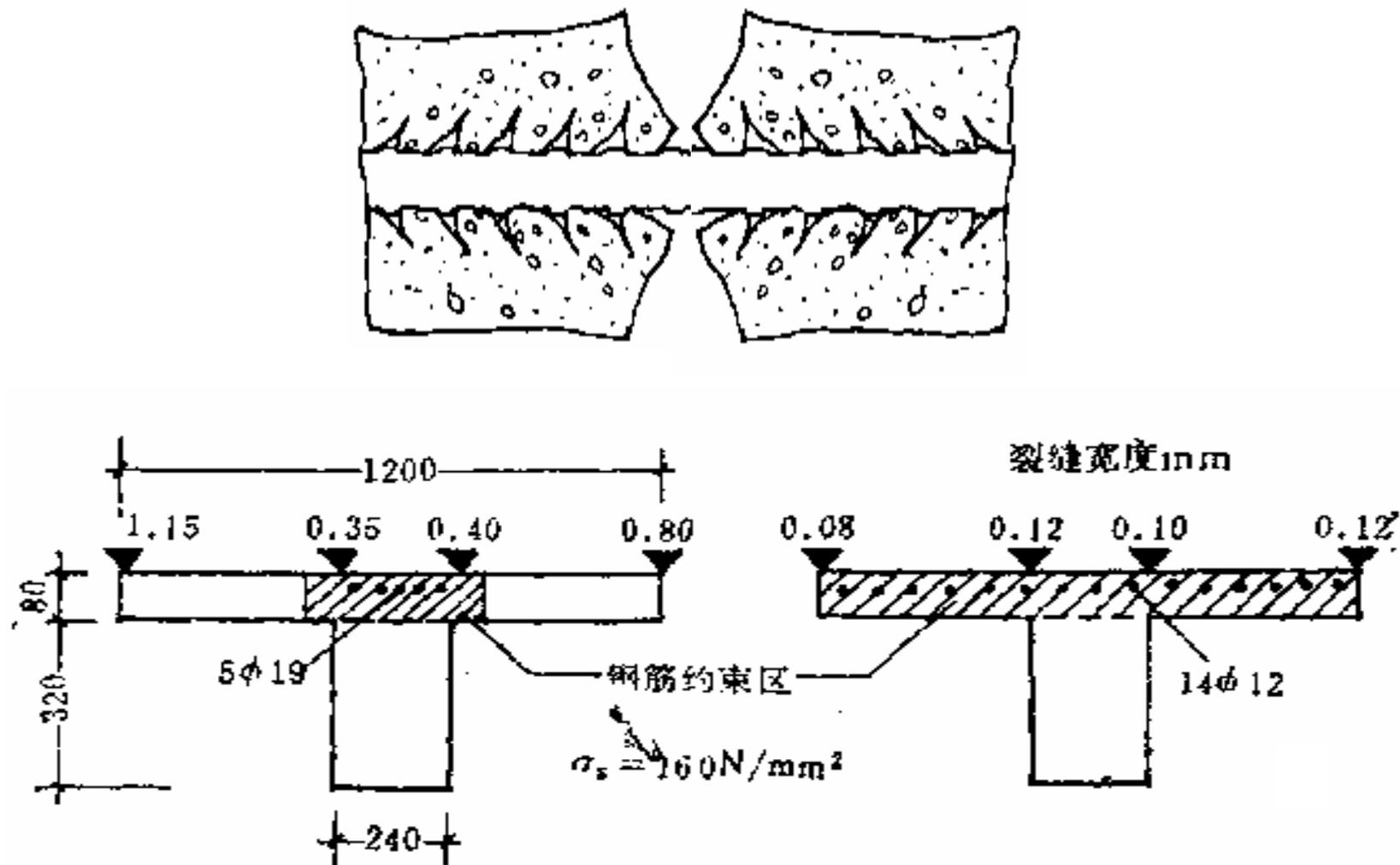
而钢筋处裂缝宽度并不大

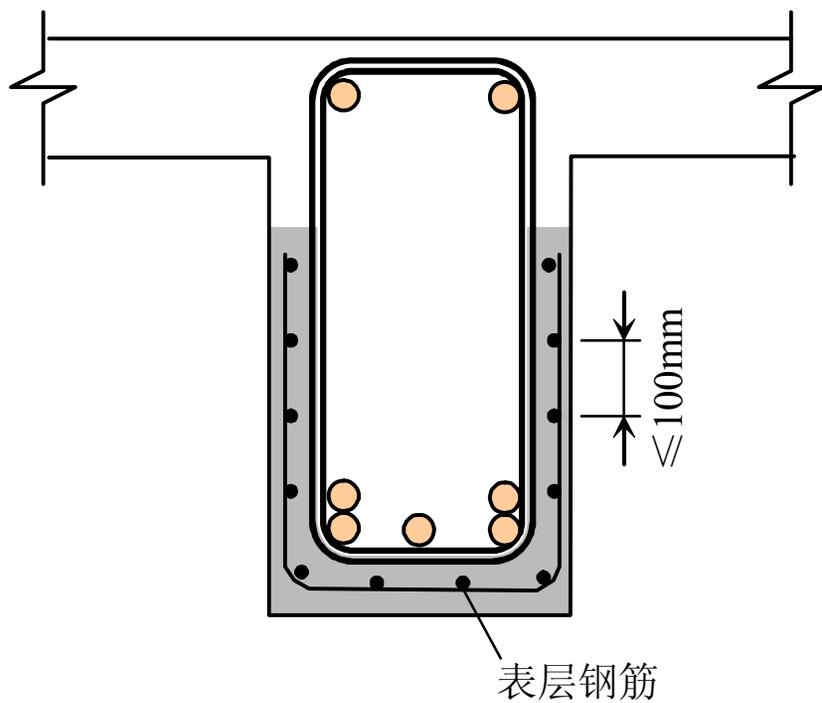
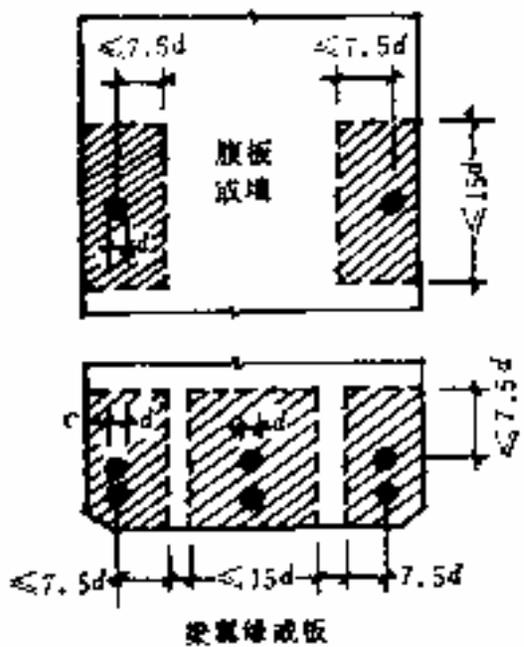
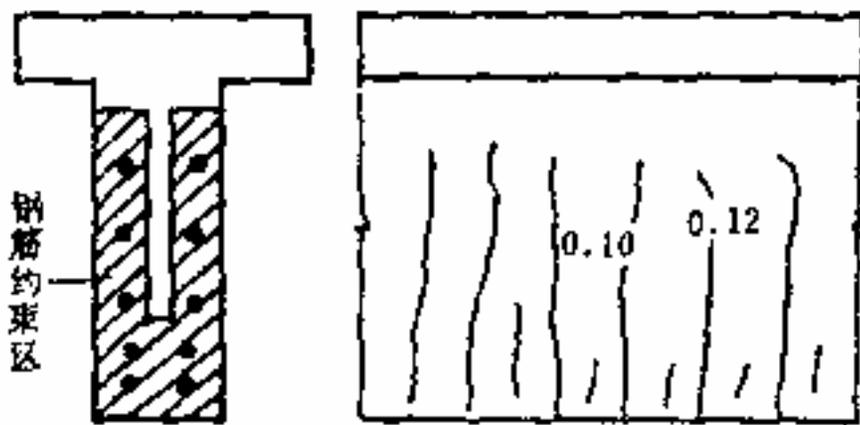
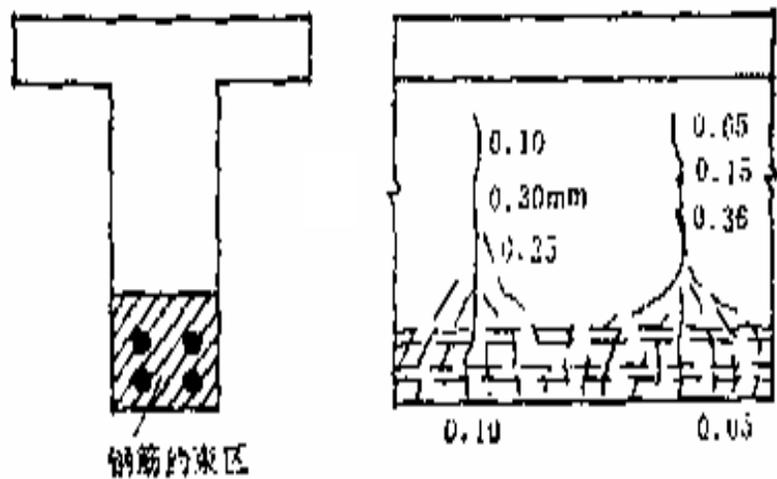
表面裂缝宽度对钢筋锈蚀的影响不大

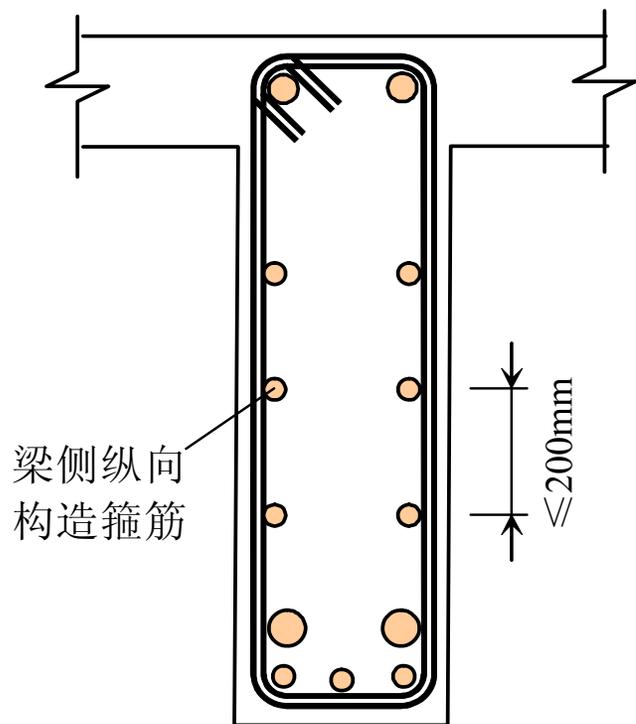
增加保护层有利于提高混凝土的耐久性



钢筋有效约束区与裂缝宽度



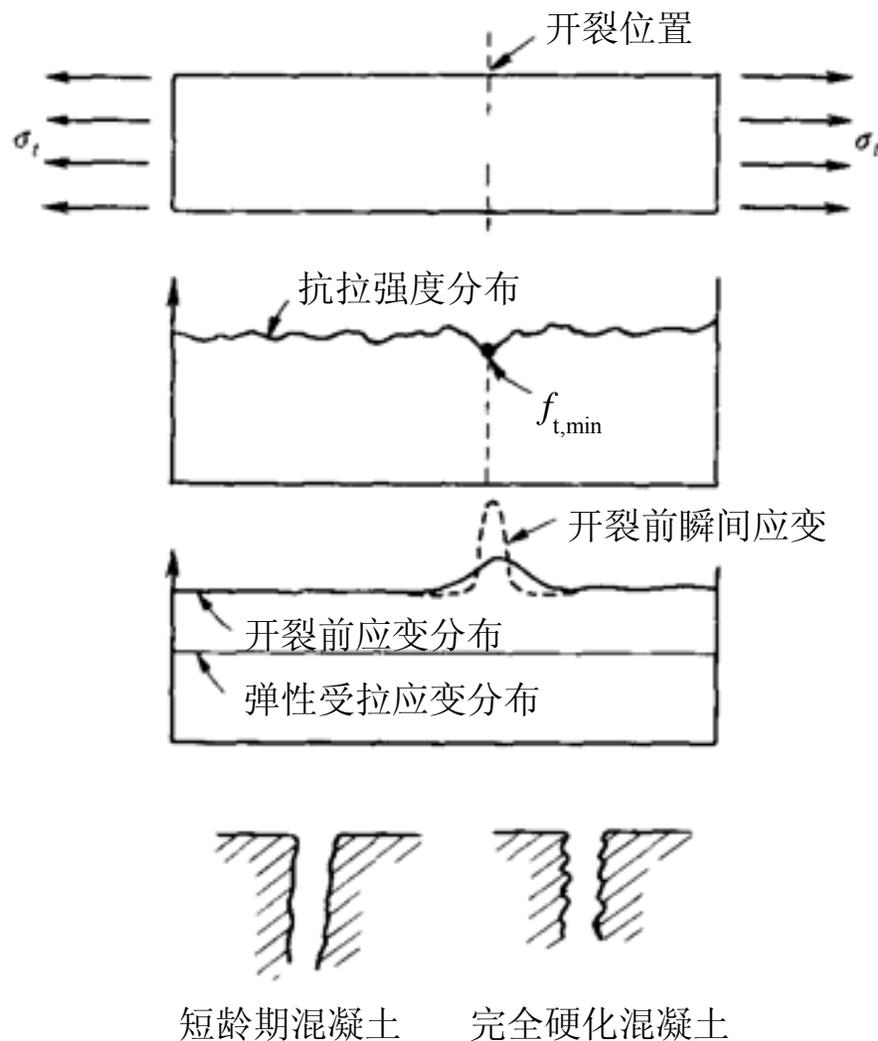




- 对于腹板高度大于**450mm**的梁，为防止梁腹中部裂缝宽度开展过大产生不利影响
- 《规范》规定在**梁两侧面**应沿高度**配置纵向构造钢筋**，每侧纵向构造钢筋（不包括梁上、下受力钢筋及架立钢筋）的截面面积不应小于腹板截面面积 bh_w 的**0.1%**，且间距不宜大于**200mm**

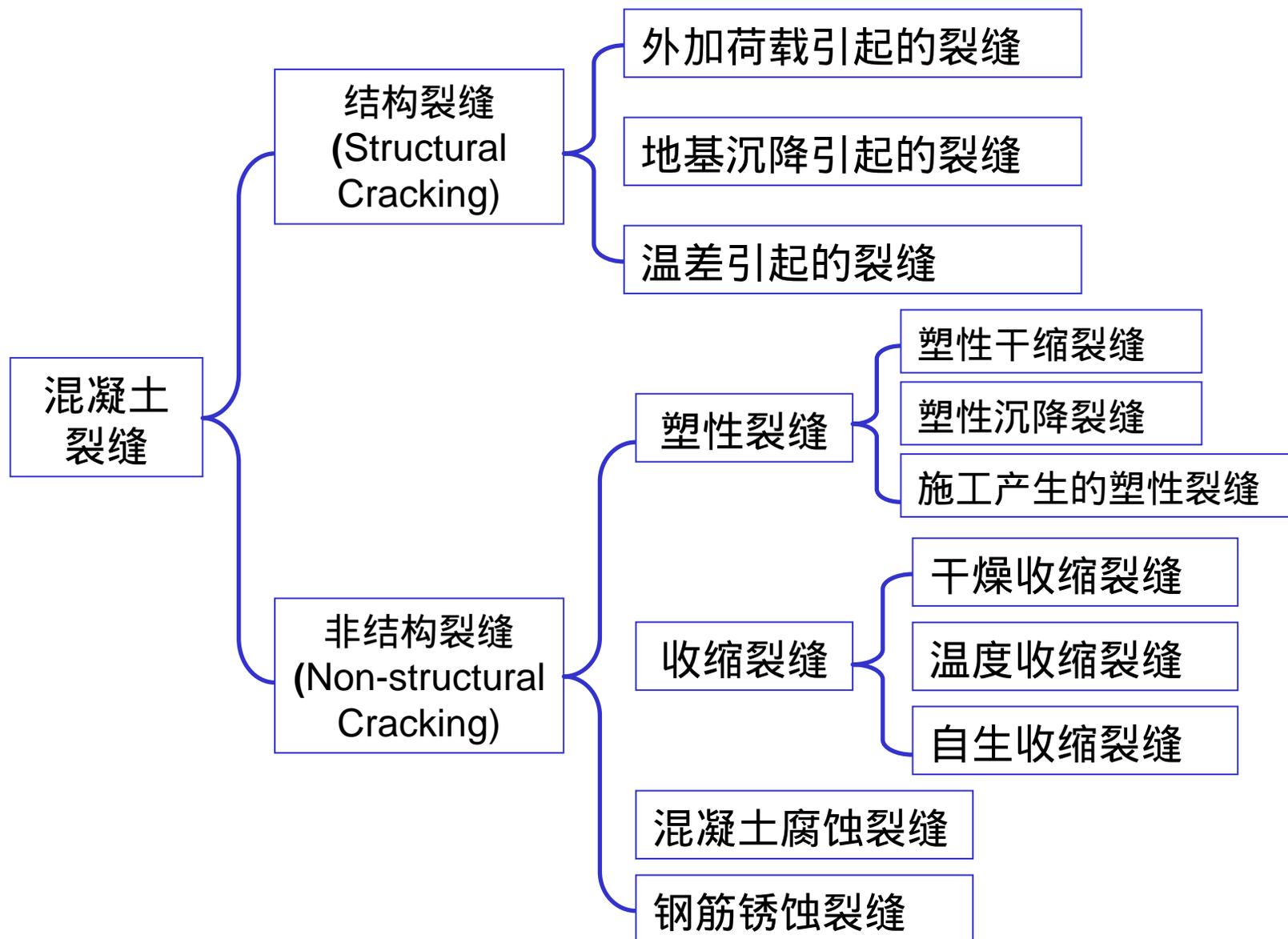
11.4 产生裂缝的其他原因

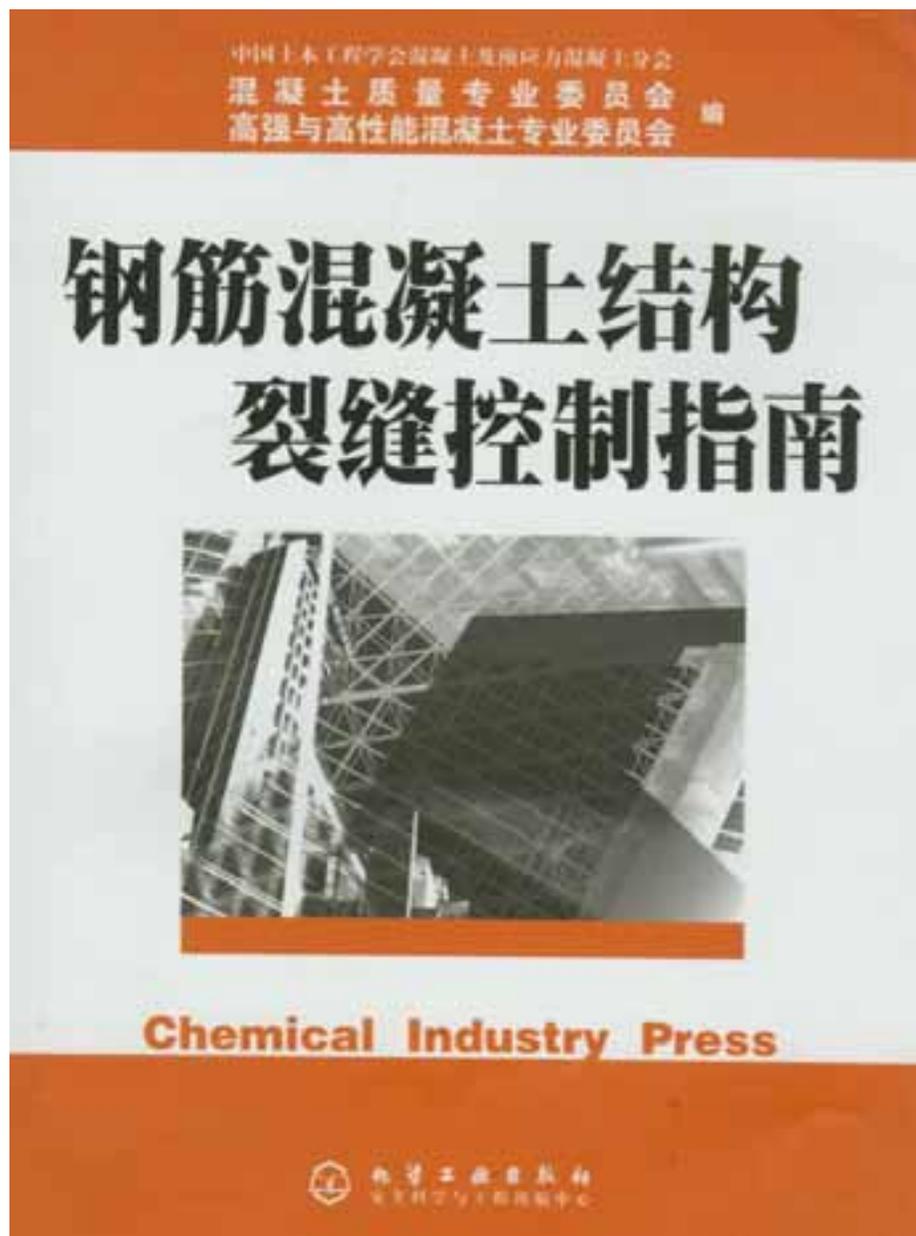
- ◆ 混凝土结构中存在**拉应力**是产生裂缝的必要条件。
- ◆ 除荷载作用外，结构的**不均匀沉降**、**收缩**、**温度变化**，以及在混凝土凝结、硬化阶段等都会引起拉应力，产生裂缝。
- ◆ 当结构中主拉应力达到混凝土（当时）的抗拉强度时，并不立即产生裂缝，而是当**拉应变**达到**极限拉应变 ϵ_{tu}** 时才出现裂缝。



11.4 产生裂缝的其他原因

- ◆ 硬化后的混凝土极限拉应变 ε_{tu} 约为 150×10^{-6} ，即**10m**长的构件，产生**1.5mm**的很小受拉变形即会产生裂缝。
- ◆ 由于混凝土材料的不均匀性，**裂缝首先在强度最小的位置发生**。裂缝发生前瞬间的应变分布会产生应变集中。
- ◆ 不同龄期的混凝土，其裂缝断面状况有较大差别。龄期很短的混凝土，裂缝断面较为光滑，两裂缝不能完全闭合。而充分硬化后的混凝土，裂缝断面则呈不规则较为锋锐状态，两断面可以闭合。





11.4 产生裂缝的其他原因

与结构设计及受力荷载有关的裂缝

与使用及环境条件有关的裂缝

与材料性质和配合比有关的裂缝

与施工有关的裂缝

一、材料原因

1. 水泥方面



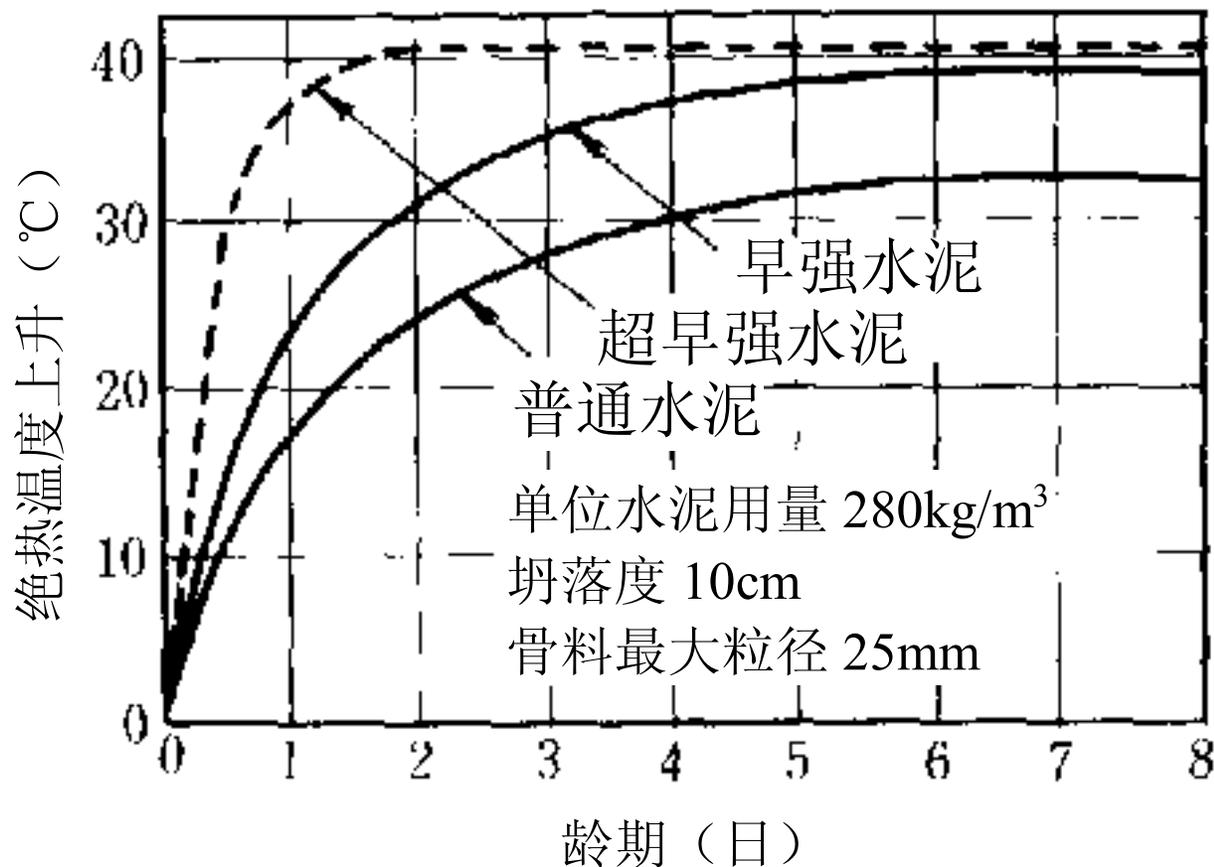
水泥异常凝结引起的裂缝

受风化的水泥，其品质很不安定。

混凝土浇筑后达到一定强度前，在凝结硬化阶段会产生如图所示的短小的不规则裂缝。

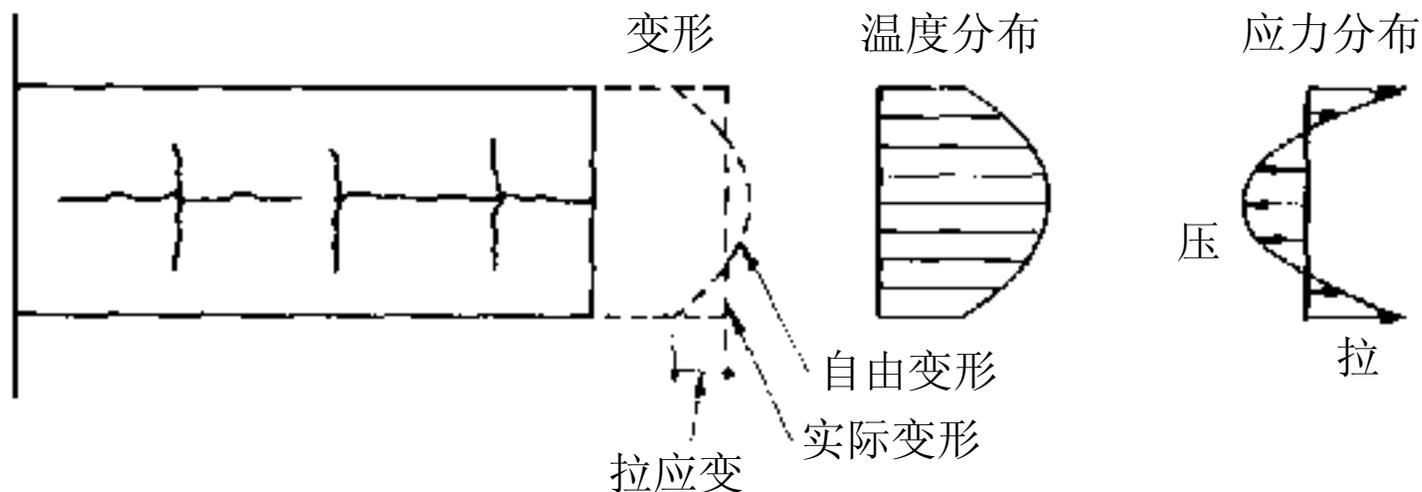
随着水泥品质的改善，这种裂缝目前较少见到。

水泥水化热



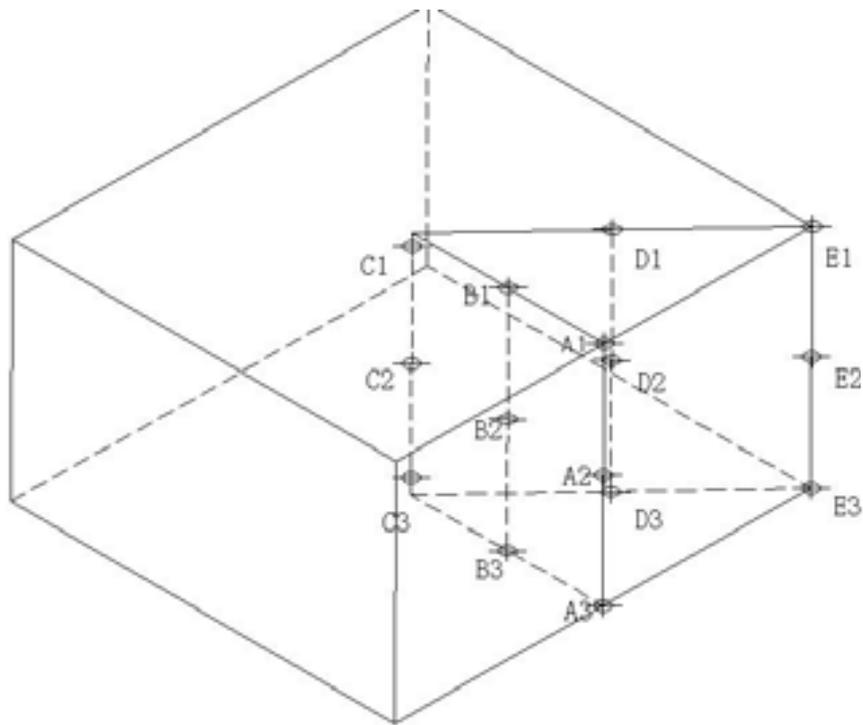
混凝土在绝热情况下的温度上升

水泥用量在 300kg/m^3 左右时，温度上升为 $30\sim 40^\circ\text{C}$ 左右。



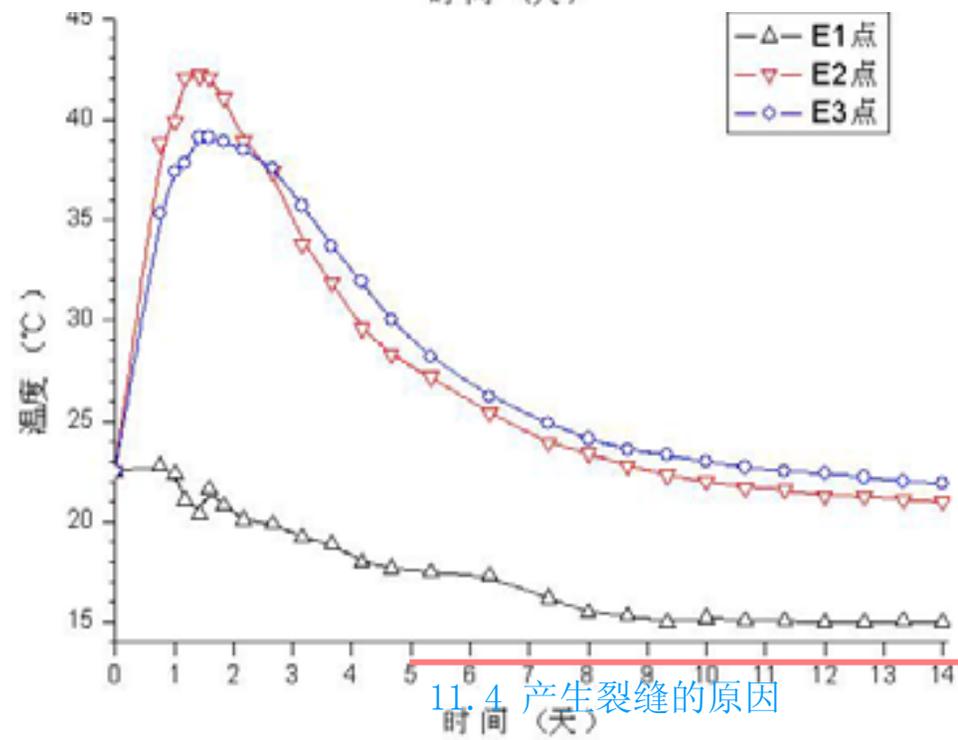
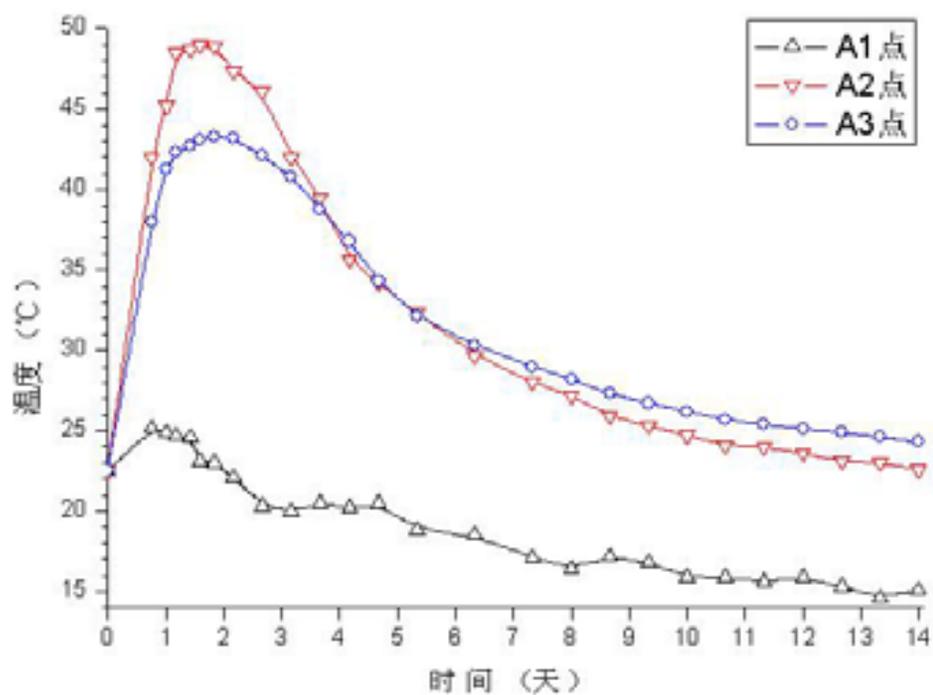
大体积混凝土的温度、应力分布和裂缝

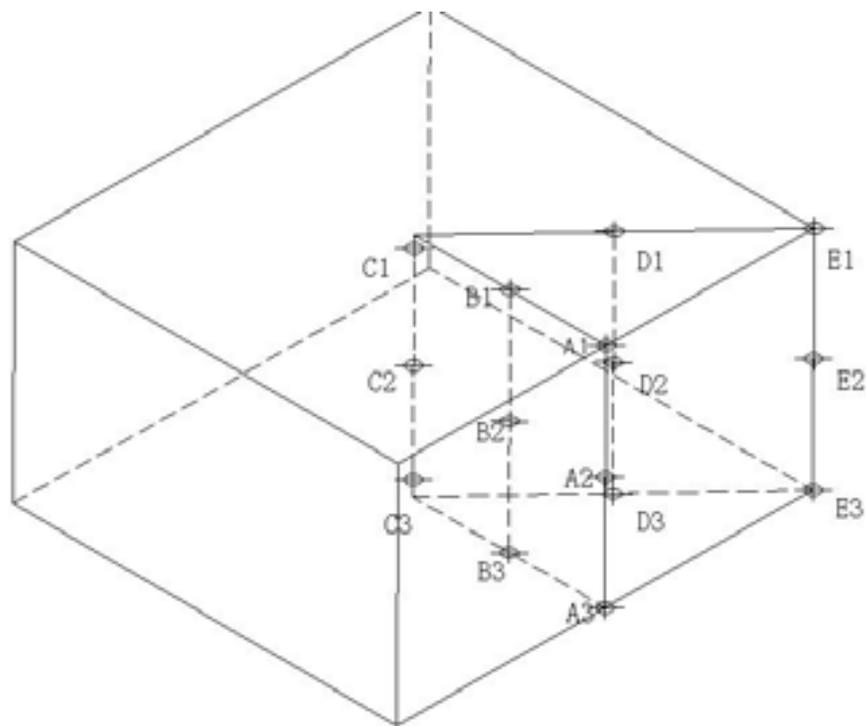
- ◆ 构件最小尺寸大于**800mm**时，通常认为是大体积混凝土。
- ◆ 对于大体积混凝土，**内部温度较大**，**构件外周温度较低**，内外温差很大，引起内外混凝土膨胀变形差异。
- ◆ 内部混凝土膨胀受到外部混凝土的变形约束，而使构件表面产生裂缝。
- ◆ **这种裂缝**在构件表面通常呈**直交状况**。



大体积混凝土承台

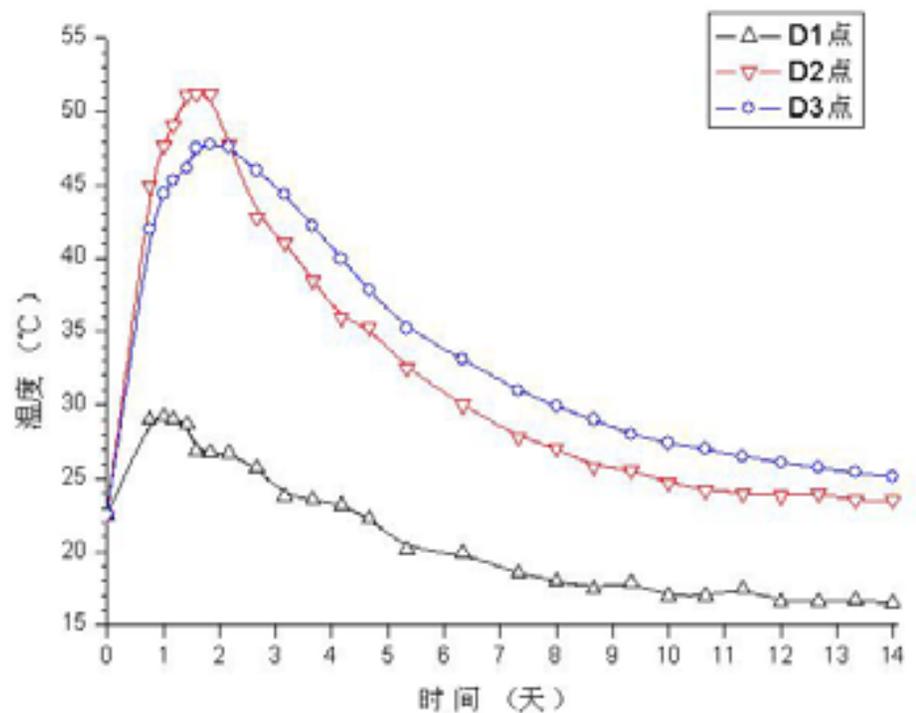
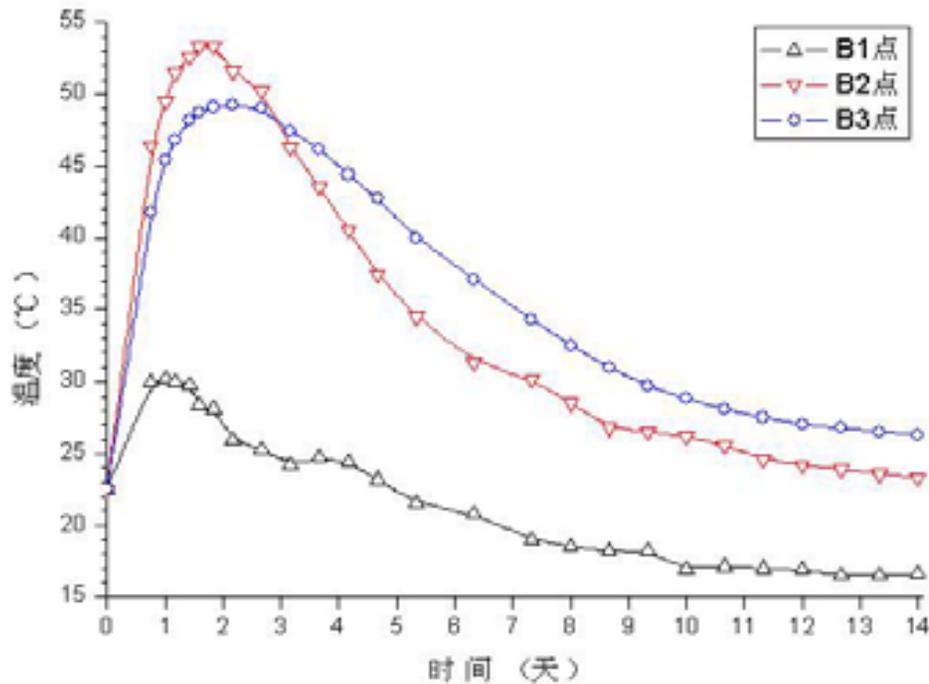
$$2.8\text{m} \times 2.6\text{m} \times 1.55\text{m} = 11\text{m}^3$$

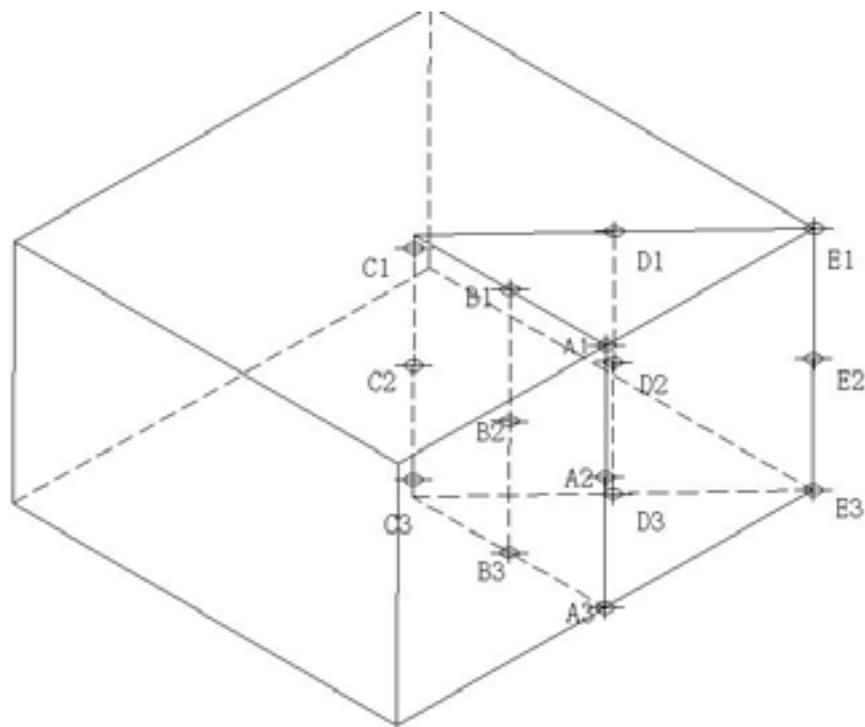




大体积混凝土承台

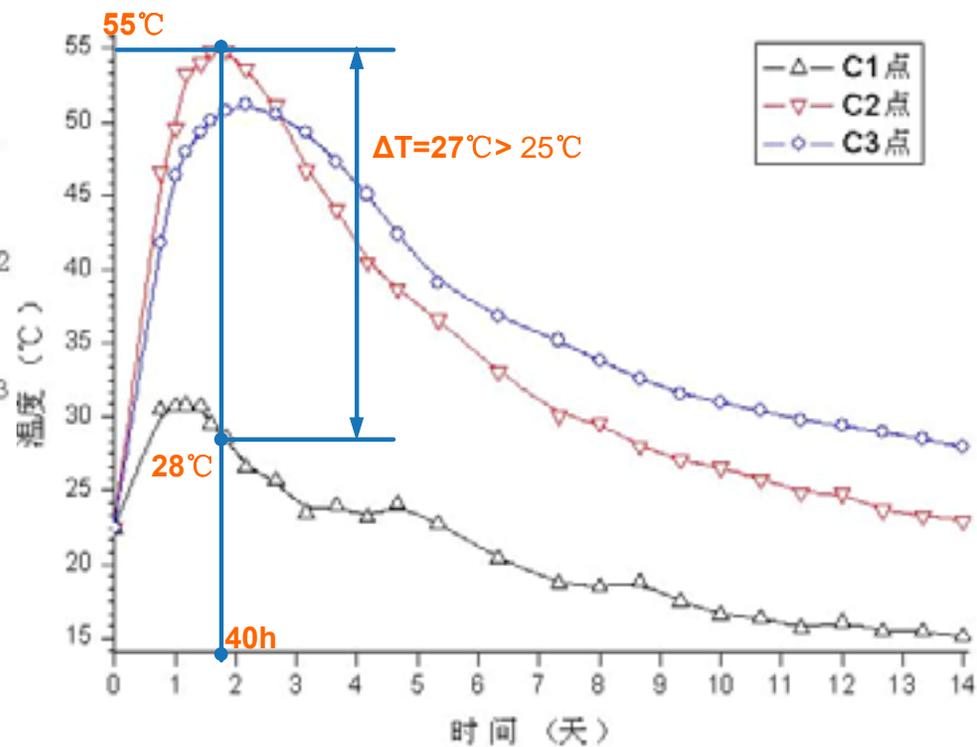
$$2.8\text{m} \times 2.6\text{m} \times 1.55\text{m} = 11\text{m}^3$$

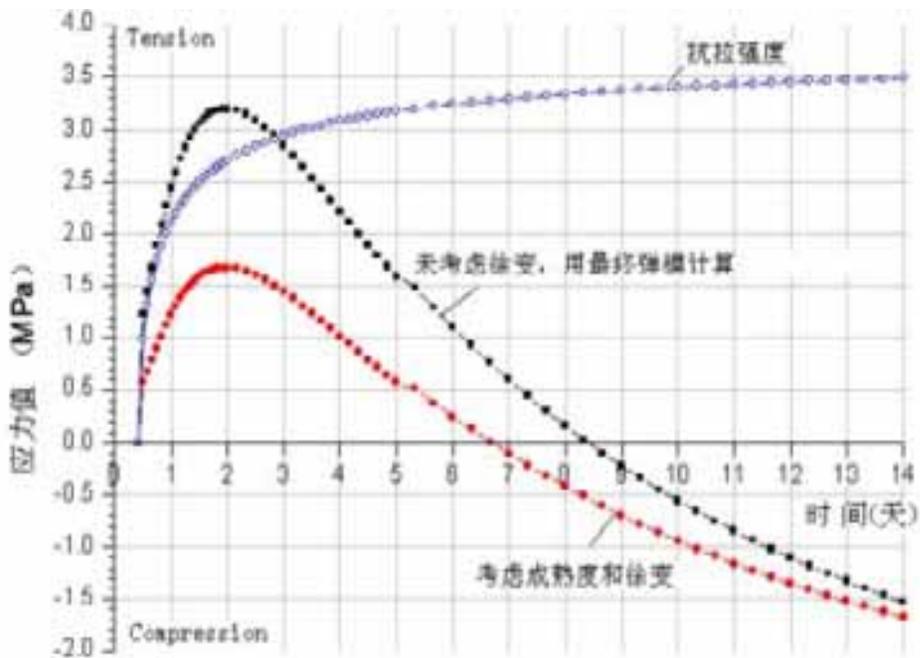




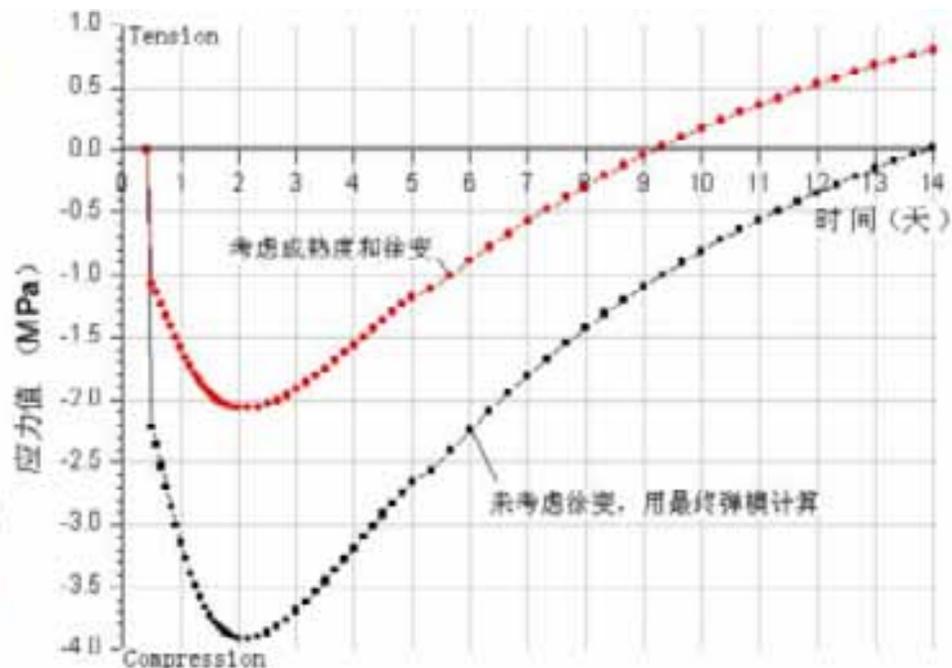
大体积混凝土承台

$$2.8\text{m} \times 2.6\text{m} \times 1.55\text{m} = 11\text{m}^3$$



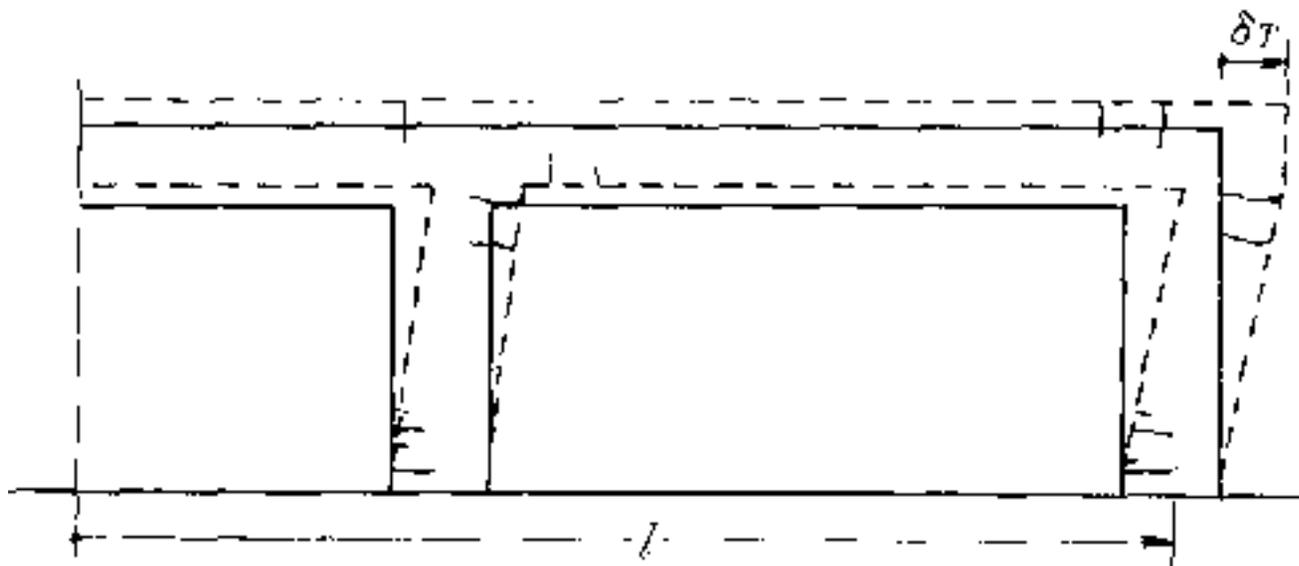


表面点的主拉应力及抗拉强度-时间变化图



中心点的主压应力计算值-时间变化图

- 表面点开始受拉应力作用，一段时间后开始受压
- 中心点相反，开始受压，一段时间后开始受拉
- 控制开裂的是表面点的拉应力

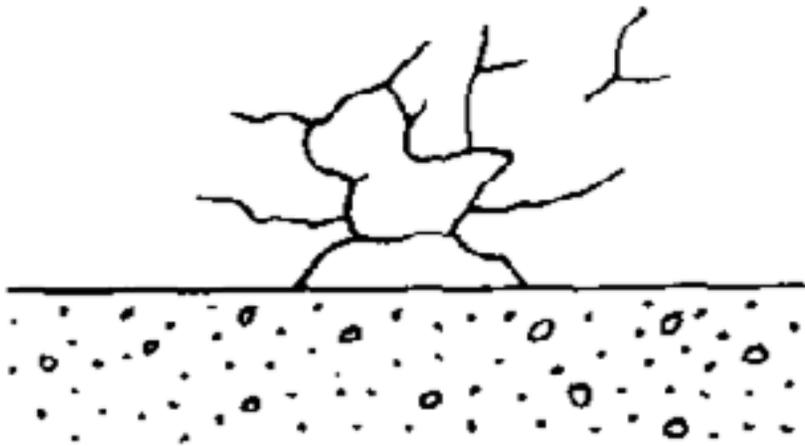


δ_T 约 1mm/每 $l=10\text{m}$ 、每温升 10°C ，但浇筑后 2~3 天恢复 ($\delta_T \rightarrow 0$)

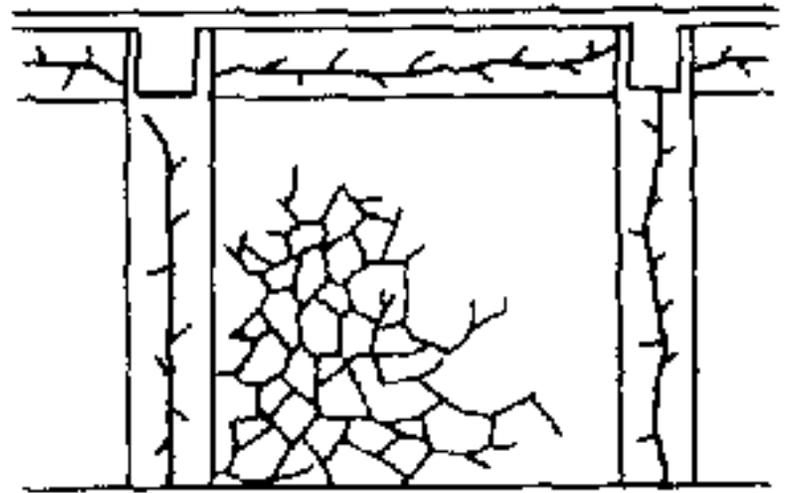
水化热对框架结构的影响

大型构件与小尺寸构件共同组成的结构（如基础梁与薄墙板、大尺寸梁与薄楼板等），以及梁柱框架结构中均可能因温差的影响产生裂缝。

2. 骨料方面



骨料中泥份引起的裂縫

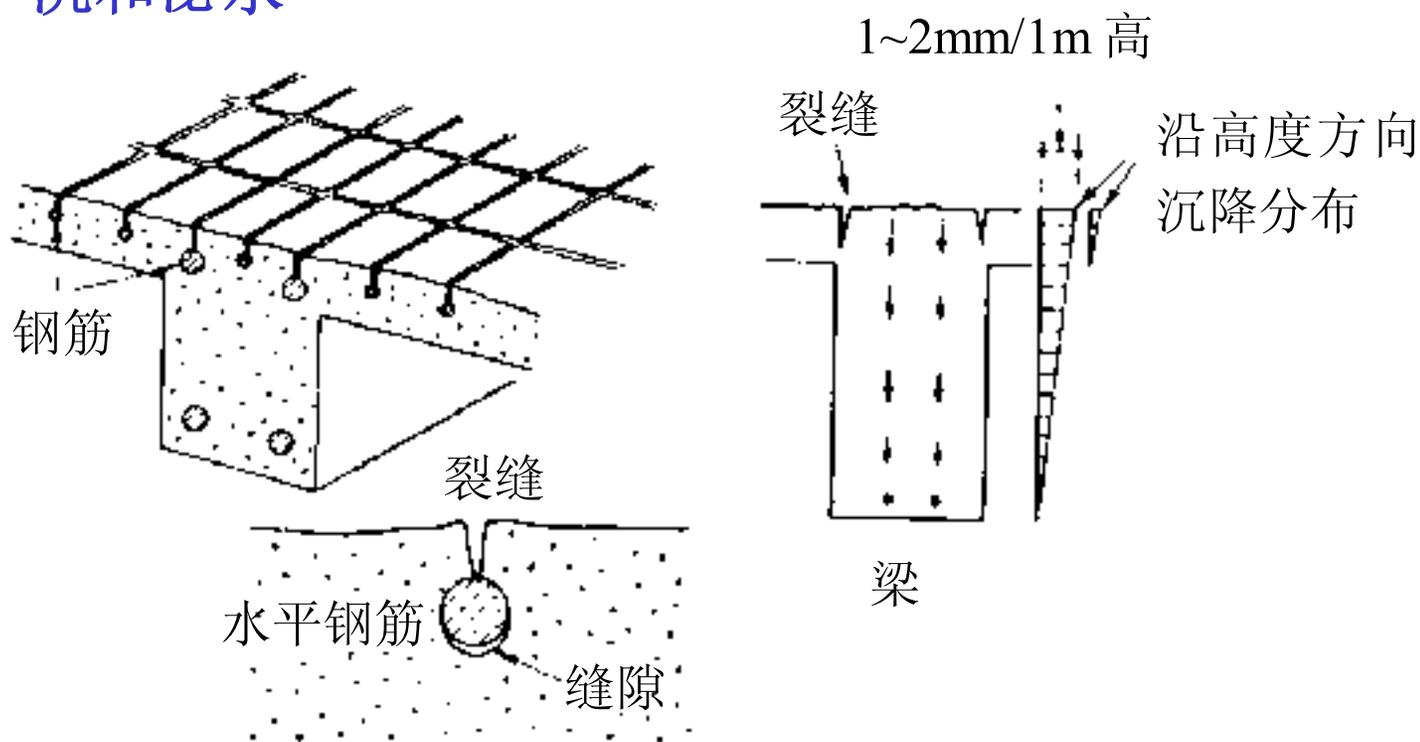


碱骨料反应引起的裂縫



安定門橋懸臂析白

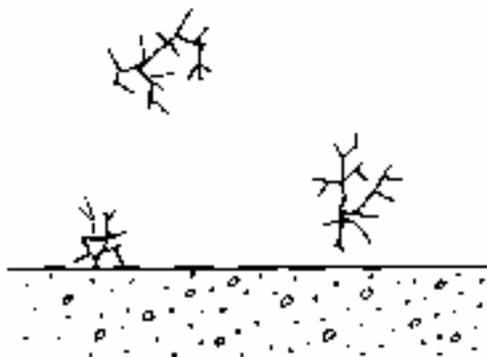
混凝土下沉和泌水



混凝土下沉引起的裂缝

混凝土浇筑后，在凝结过程中会产生下沉和泌水，下沉量约为浇筑高度的1%。当下沉受到钢筋或周围混凝土的约束也会产生裂缝。

3. 施工原因



(a) 材料混合不均匀



(b) 长时间搅拌

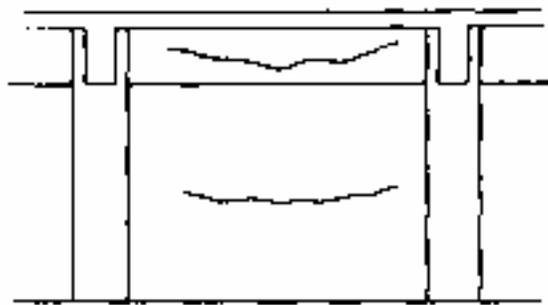
混合材料不均匀：由于搅拌不均匀，材料的膨胀性和收缩的差异，引起局部的一些裂缝。

长时间搅拌：混凝土运输时间过长，长时间搅拌突然停止后很快硬化产生的异常凝结，引起网状裂缝。

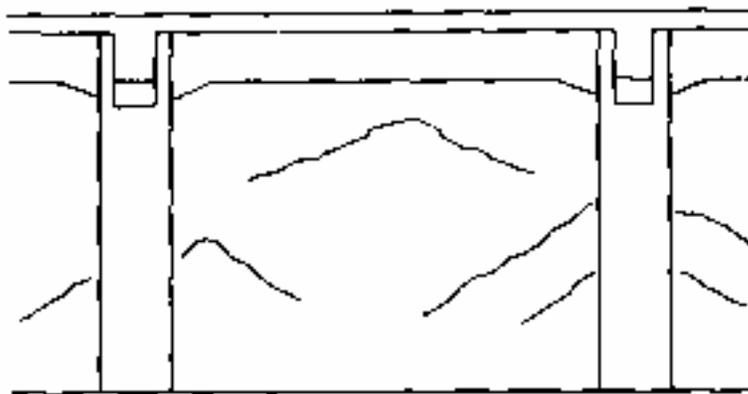
3. 施工原因

浇筑速度过快：当构件高度较大，如一次快速浇筑混凝土，因下部混凝土尚未充分硬化，产生下沉，引起裂缝。

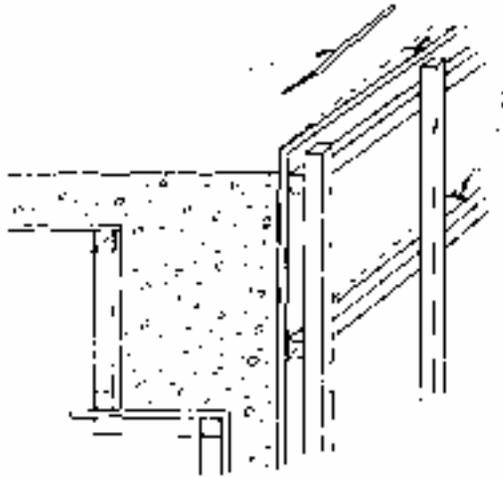
交接缝：浇筑先后时差过长，先浇筑的混凝土已硬化，导致交接缝混凝土不连续，这是结构产生裂缝的起始位置，将成为结构承载力和耐久性的缺陷。



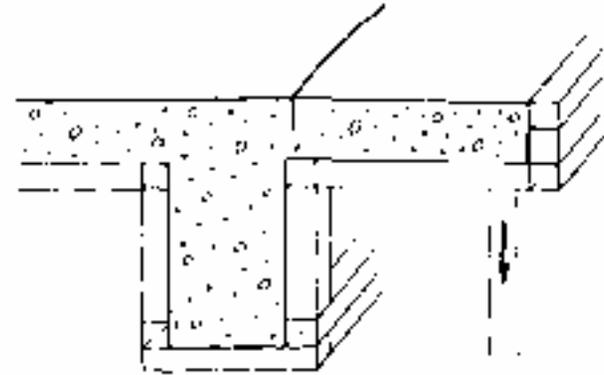
(c) 快速浇筑



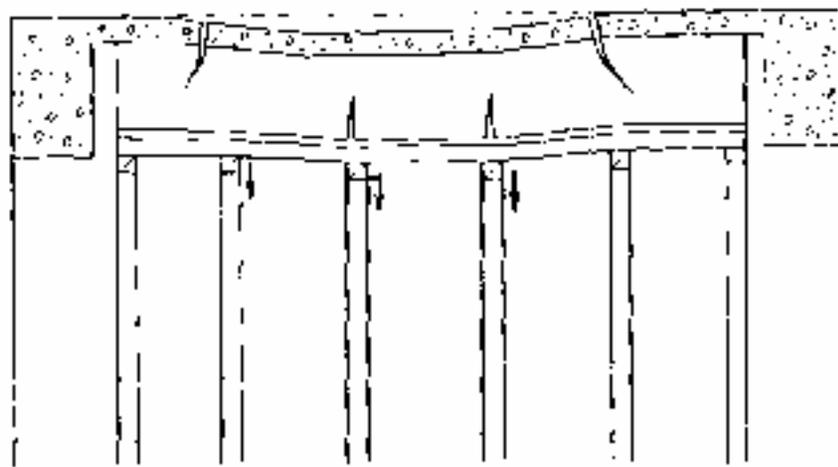
(d) 先后浇筑时差过长



(e) 模板变形

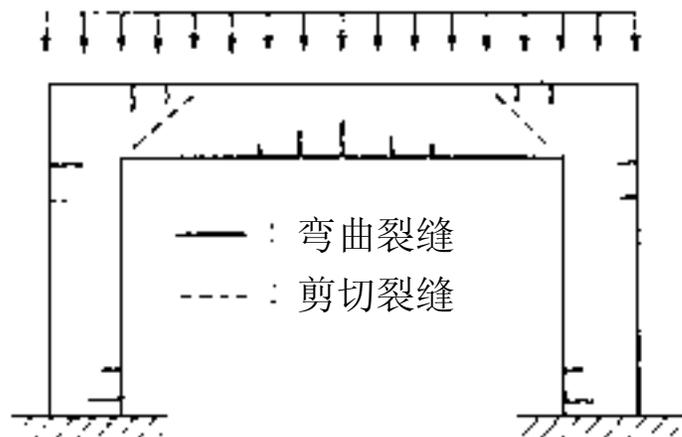


(f) 支撑下沉

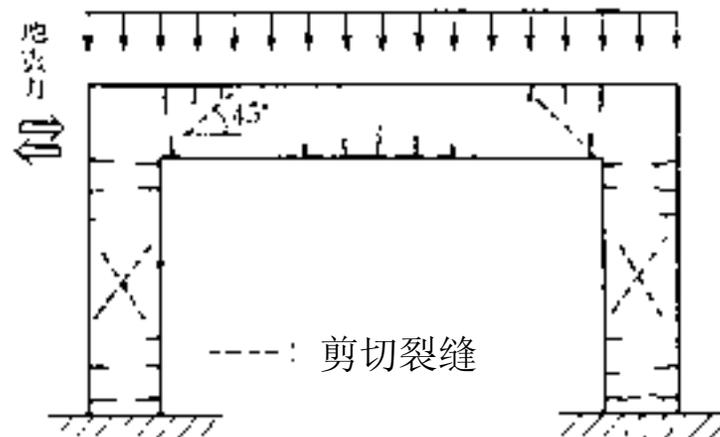


(g) 支撑下沉

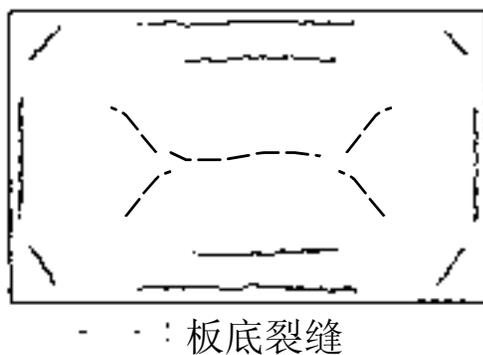
三、荷载产生的裂缝



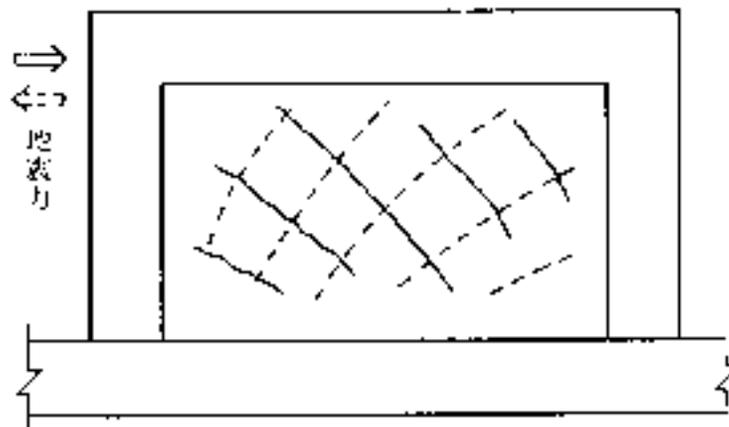
(a) 竖向荷载下的裂缝



(b) 地震作用下的裂缝



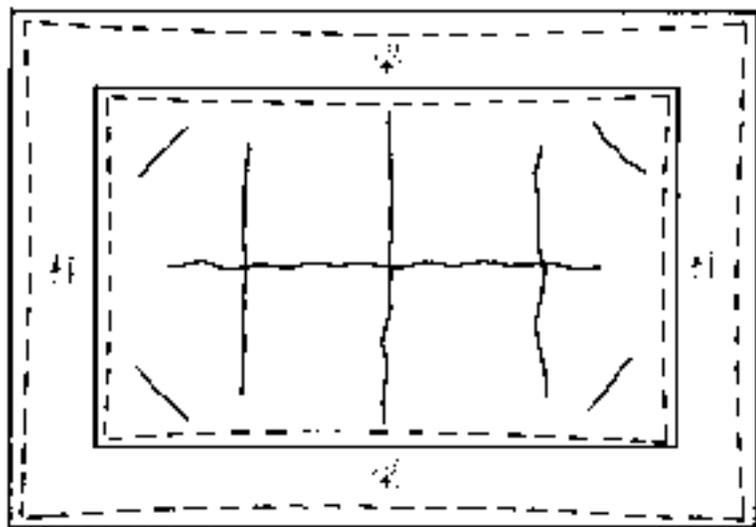
(c) 板在竖向荷载下的裂缝



(d) 剪力墙在地震作用下的裂缝

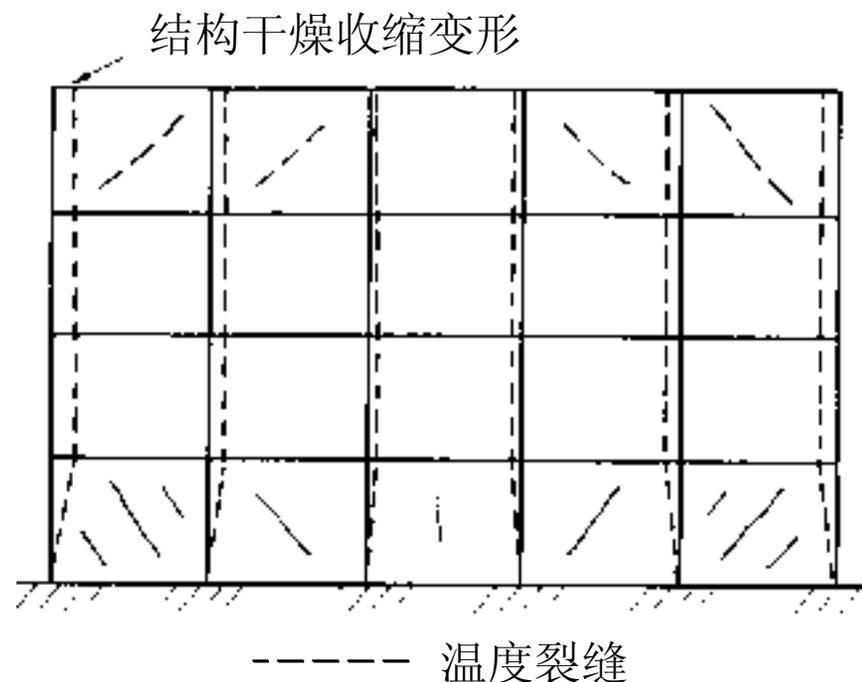


四、收缩裂缝

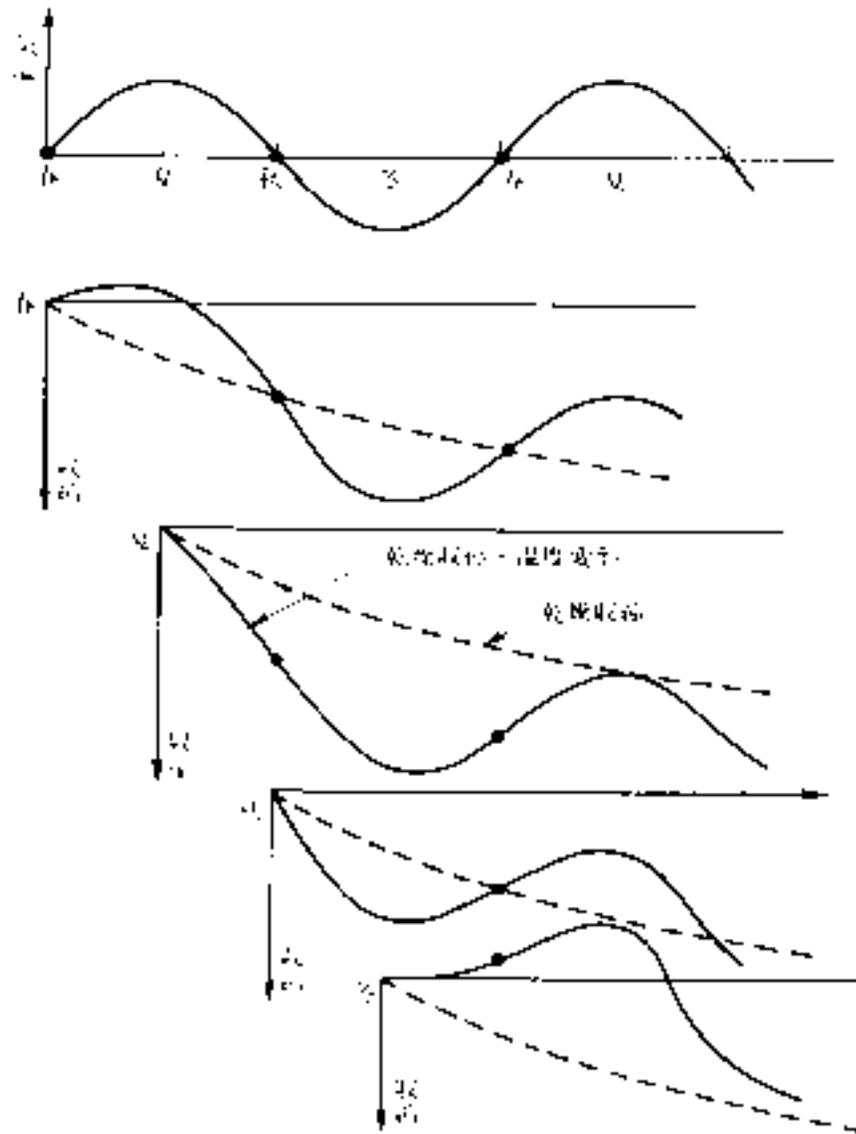


(a) 墙板干燥收缩裂缝与边框架的变形

五、温度裂缝

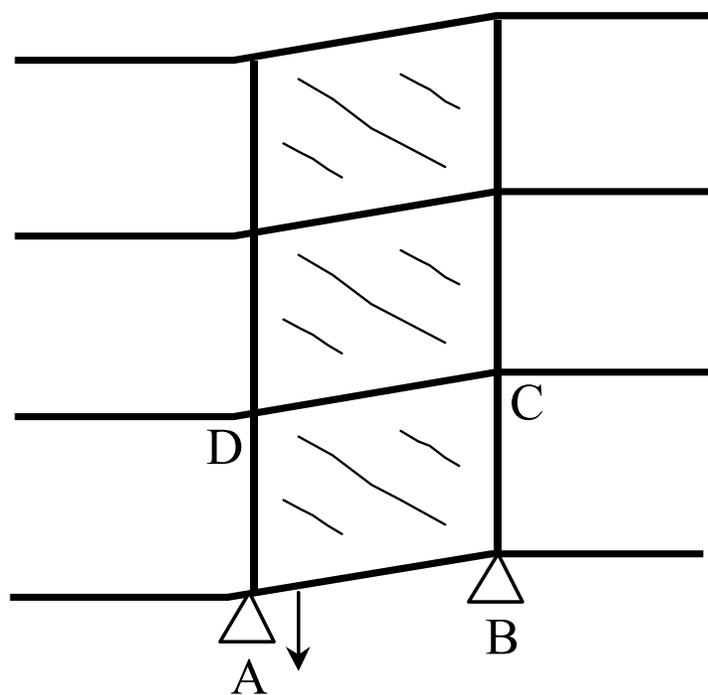


(b) 结构干燥收缩变形与墙板裂缝

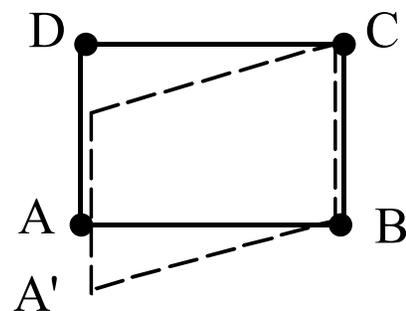


混凝土浇筑季节和温度、干燥收缩使构件产生变形

六、不均匀沉降产生裂缝



(a) 墙板的开裂



沉降量

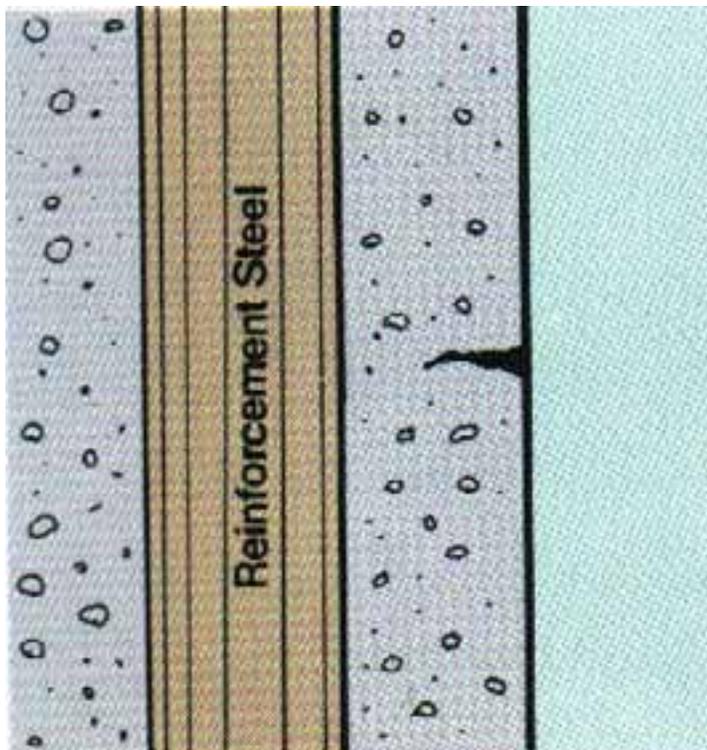
AC 节点间的伸长 = $\frac{AA'}{\sqrt{2}}$

(=裂缝总宽度)

(b) 裂缝宽度

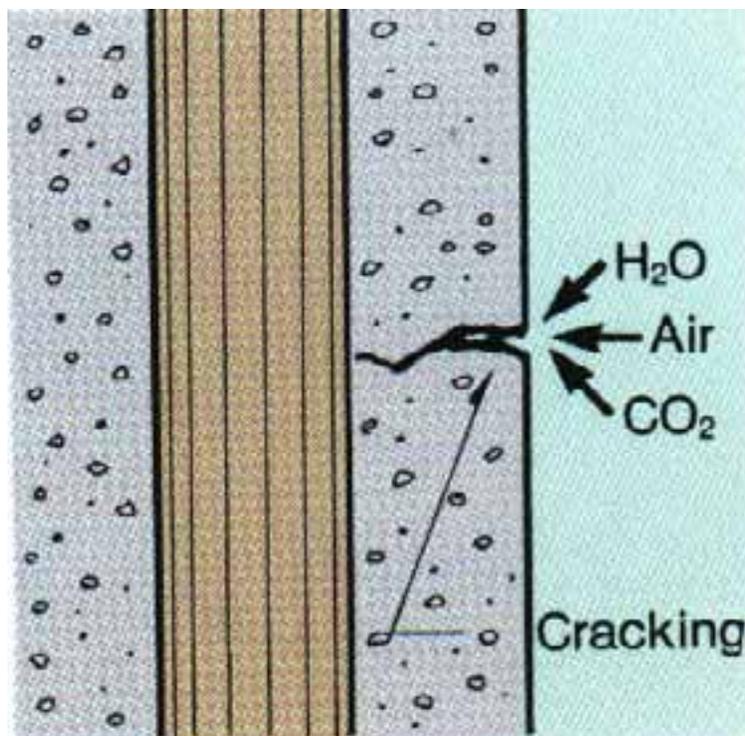
不均匀沉降产生的裂缝

七、钢筋锈蚀产生的裂缝



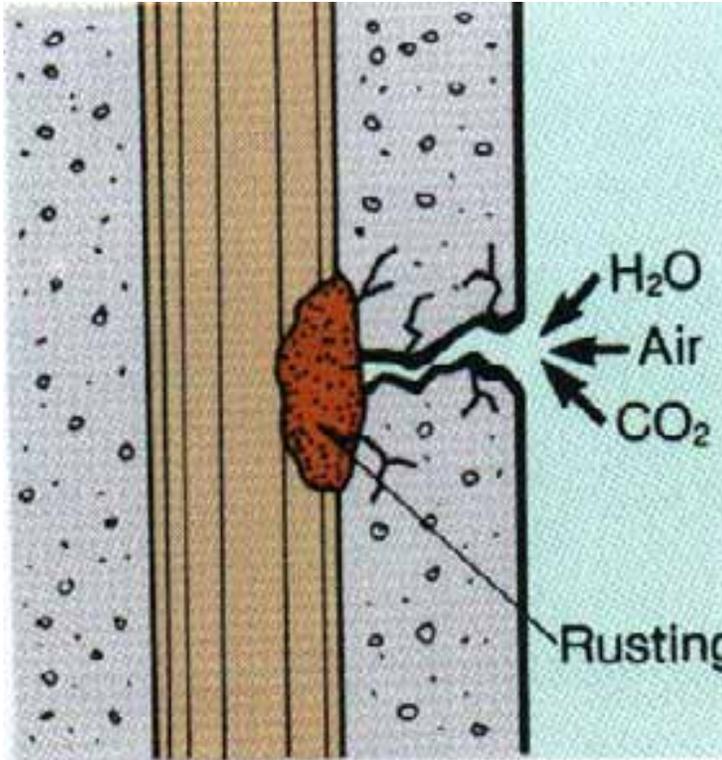
(a) 混凝土开裂

七、钢筋锈蚀产生的裂缝



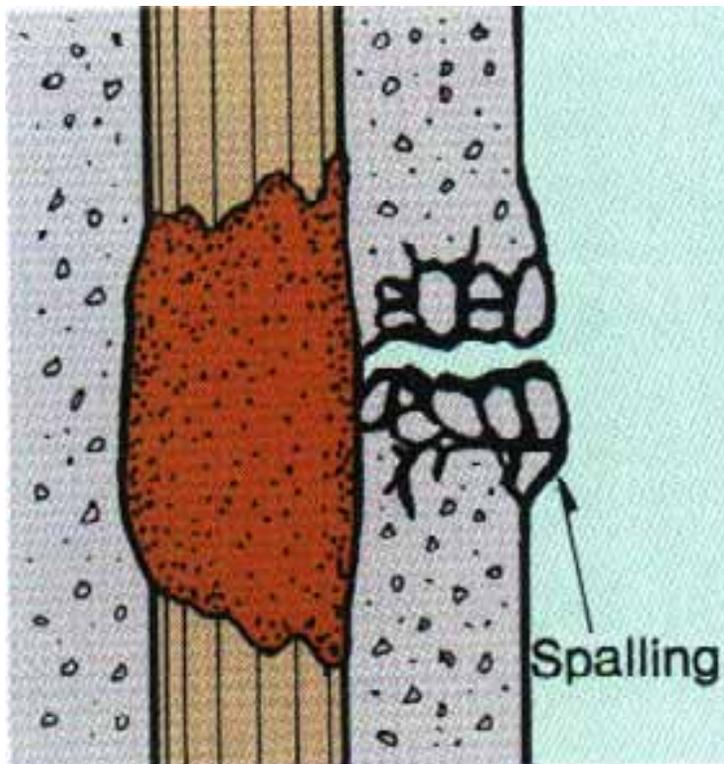
(b) 水、 CO_2 侵入

七、钢筋锈蚀产生的裂缝



(c) 开始锈蚀

七、钢筋锈蚀产生的裂缝



(d) 钢筋体积膨胀

使钢筋产生锈蚀的原因有：骨料中含氯化盐；外部进入氯化盐；混凝土碳化；保护层不足；过大的裂缝宽度。

钢筋锈蚀产生**体积膨胀**可达原体积的数倍，使钢筋位置处的混凝土受到内压力而产生裂缝，并随之剥落。

这种裂缝沿钢筋方向发展，且随着锈蚀的发展混凝土剥离产生空隙，这可从敲击产生的空洞声得到判别。







中国美术馆全景



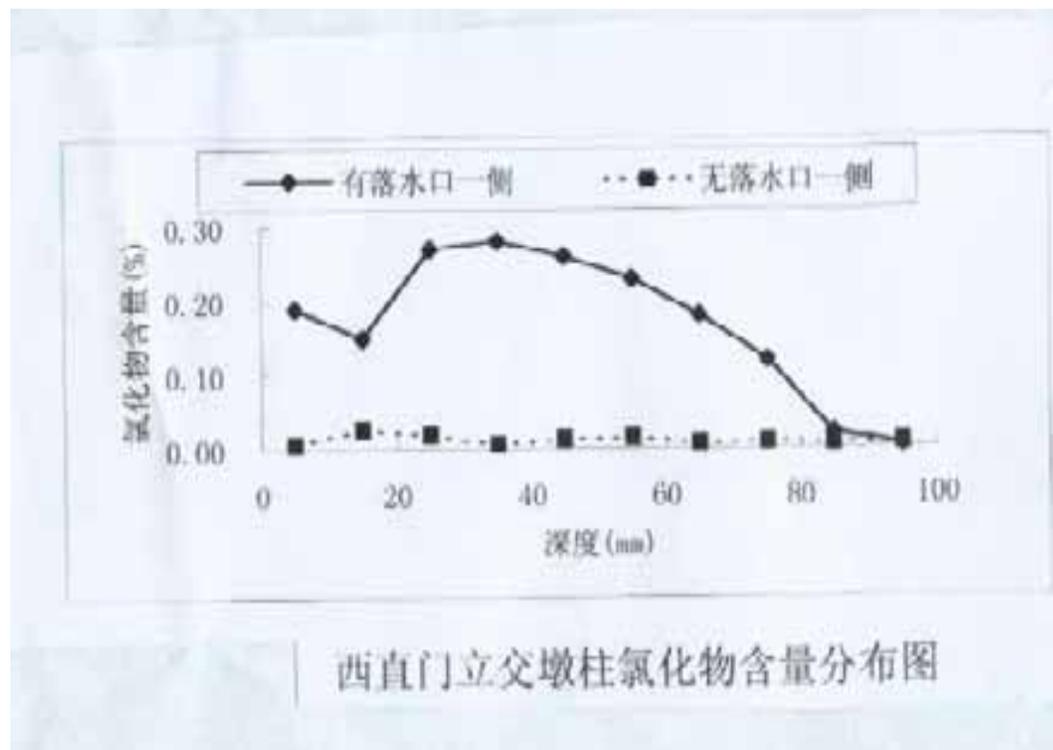
美术馆梁钢筋锈蚀情况



上海市政府办公楼（1935年）地下室顶板钢筋锈蚀情况



西直门桥墩柱落水口一侧钢筋锈



北京西直门立交桥墩柱除冰盐引起的钢筋锈蚀



山东潍坊白浪河大桥

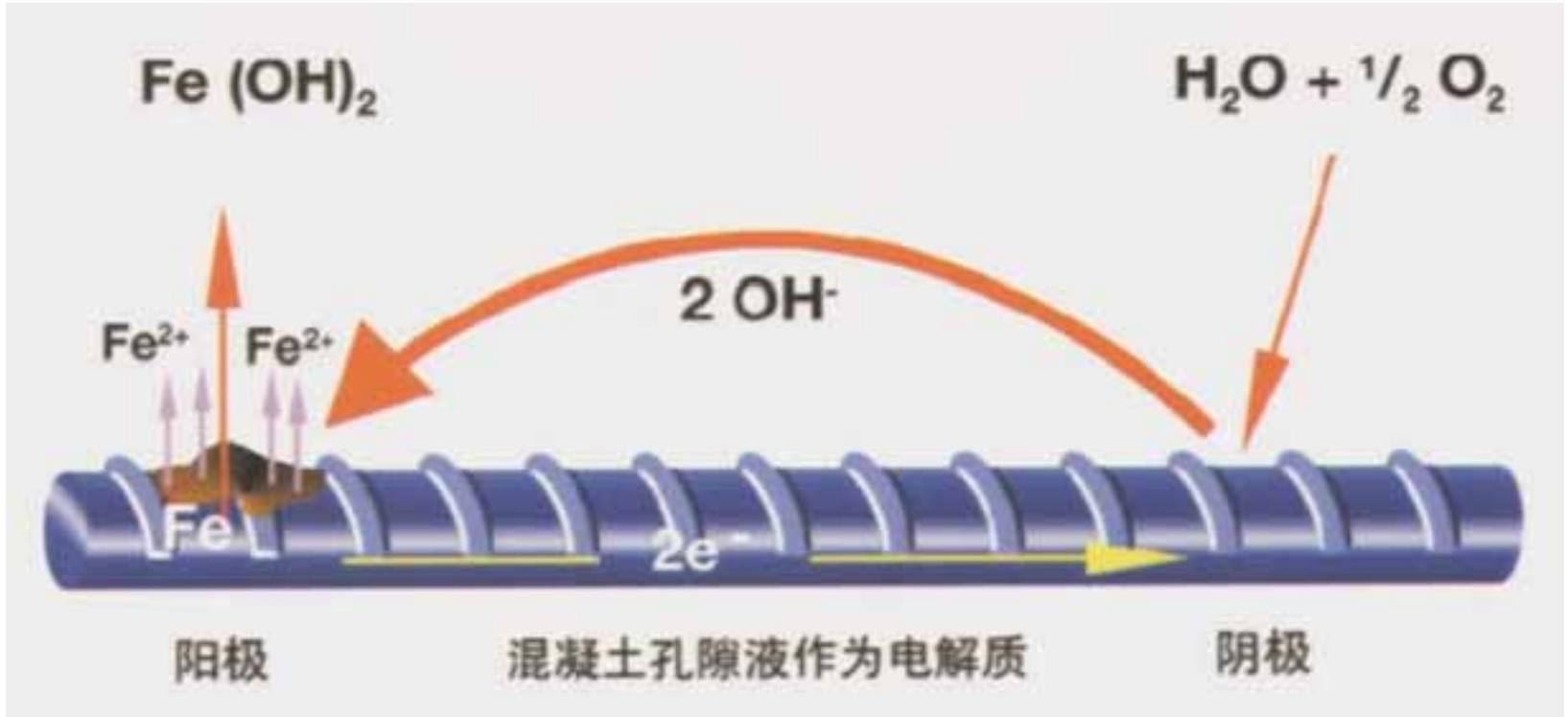




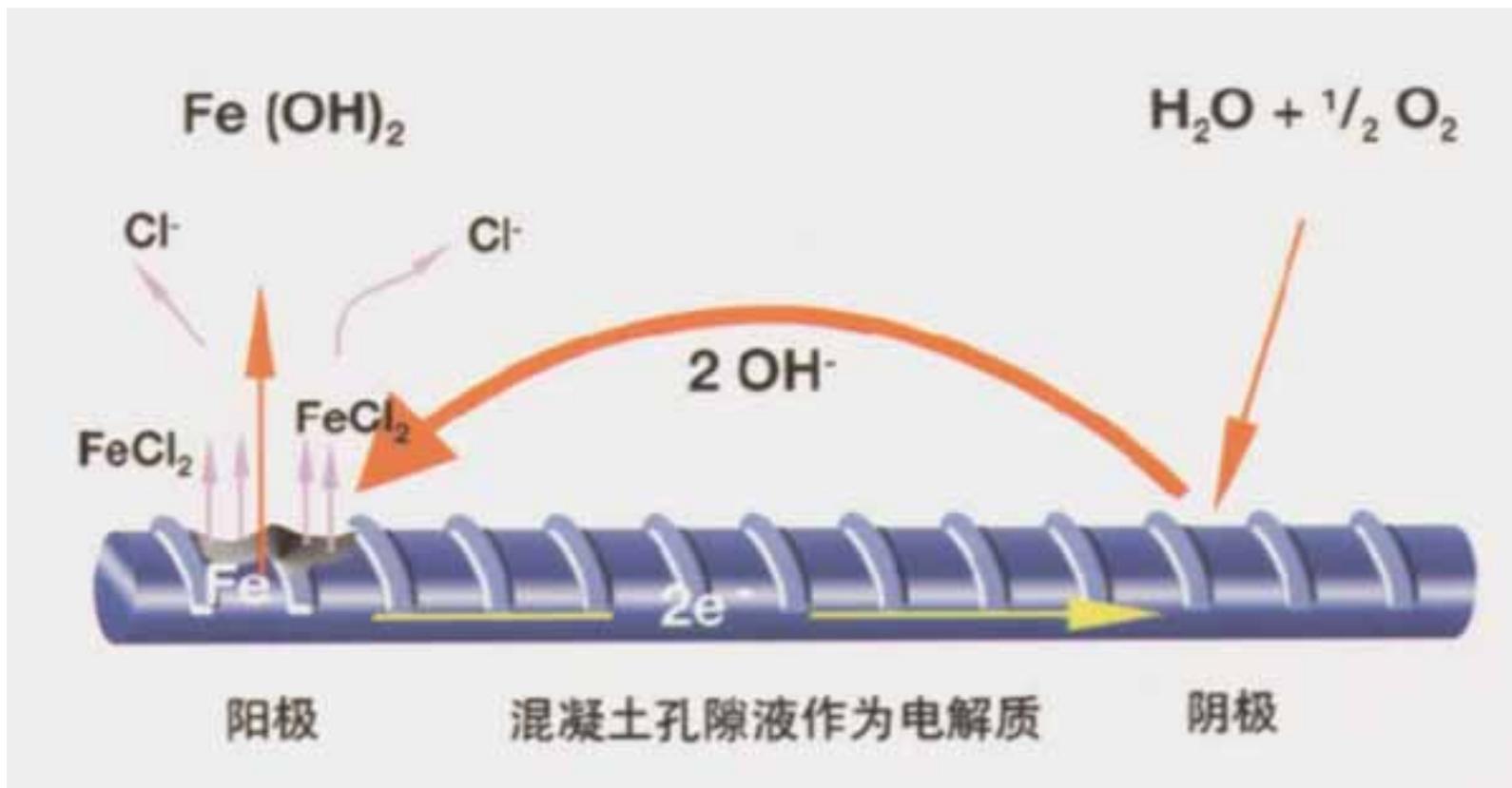
郝家沟大桥钢筋锈蚀



- ◆ 美国国家标准局**1975**年调查，当时国内因腐蚀造成年经济损失**700**亿美元，其中因混凝土结构腐蚀带来损失达**280**亿美元，占**40%**。
- ◆ 美国联邦公路局**1989**年向国会报告，当时积压的有待维修的桥梁需耗资**1550**亿美元。
- ◆ **1997**年向国会报告，为了维持现有病害桥梁总数不再增加，也需每年**52**亿美元。
- ◆ 据**1999**年统计，美国共有在册桥梁**58.6**万座，其中有缺陷（需限载通行）桥梁为**8.8**万座，占全部桥梁的**15%**，比**1992**的**20.7%**呈下降趋势，但维修更换老桥费用增加了**12%**。

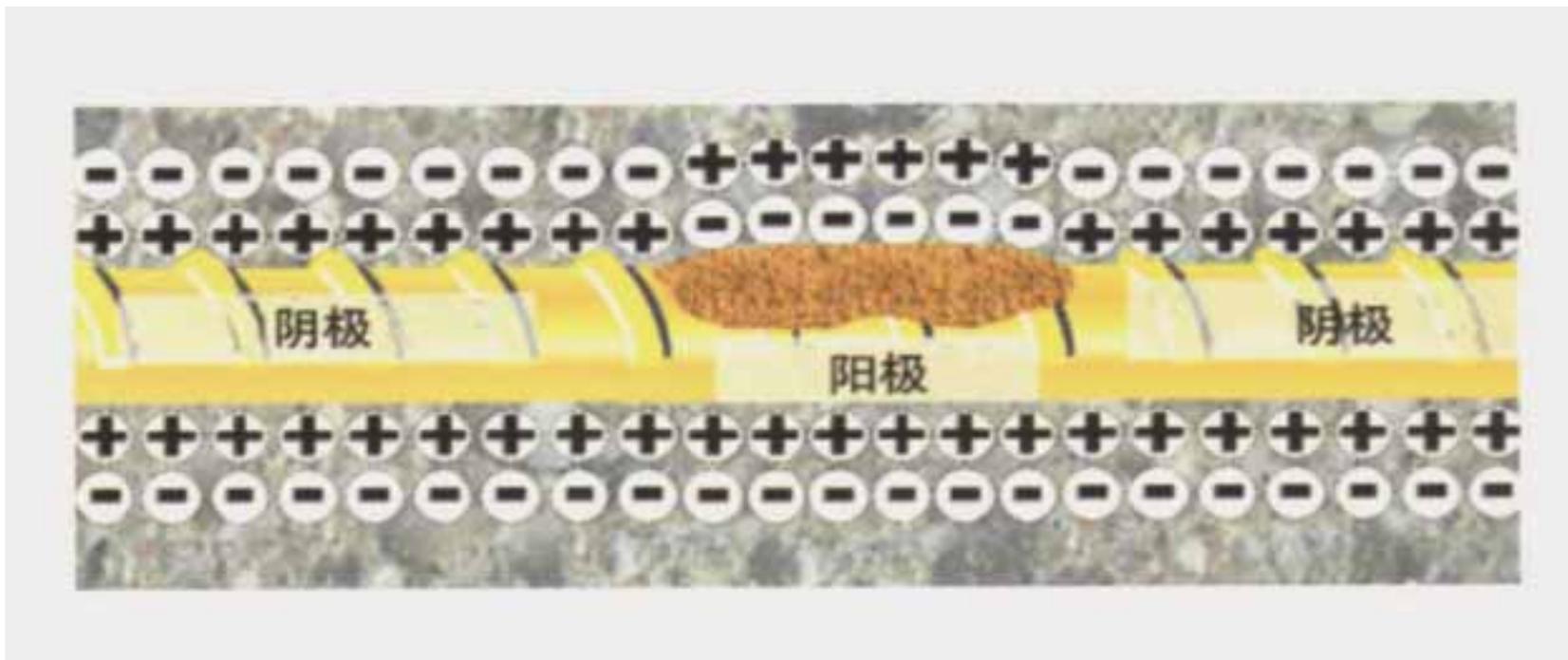


碳化引起的锈蚀



氯离子引起的锈蚀



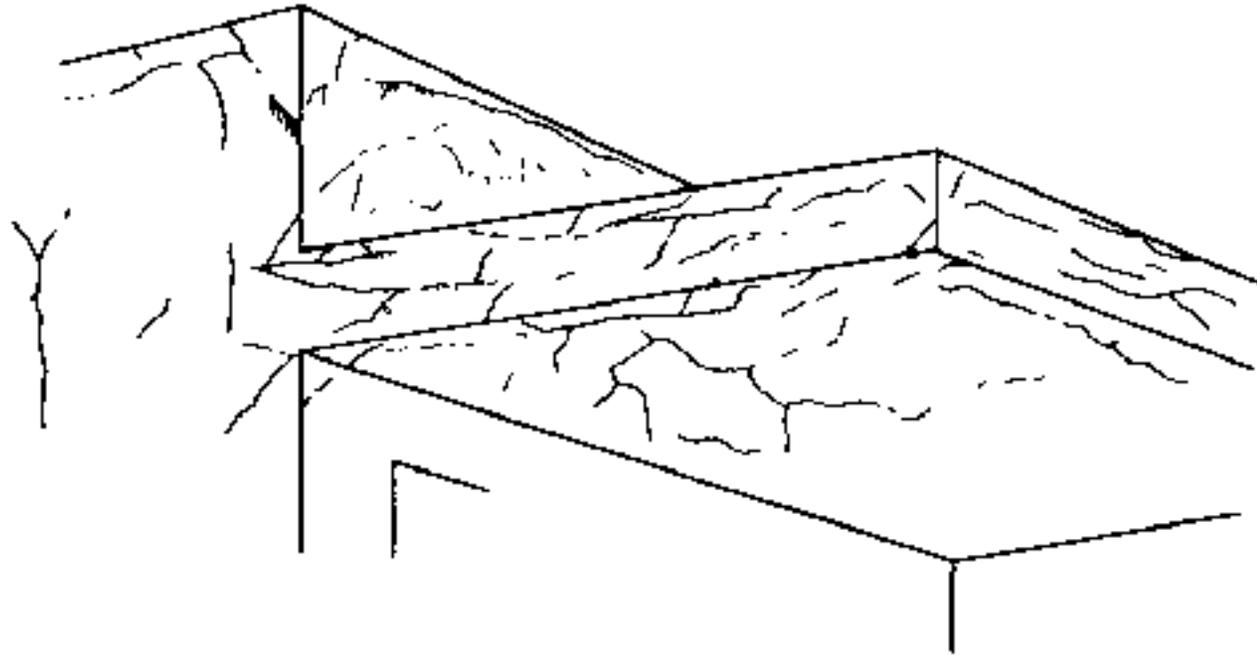


钢筋阻锈剂形成保护膜

在阳极，保护膜阻止铁离子的流失

在阴极，保护膜形成对氧的屏障

八、冻结溶解产生的裂缝



反复冻融产生的裂缝



青海 - 铁路桥基座冻融破坏



吉林省—某热电厂滚水坝混凝土
88年使用96年冻融破坏情况



吉林省一基础结冰冻胀，面板剪坏，目前未蓄水

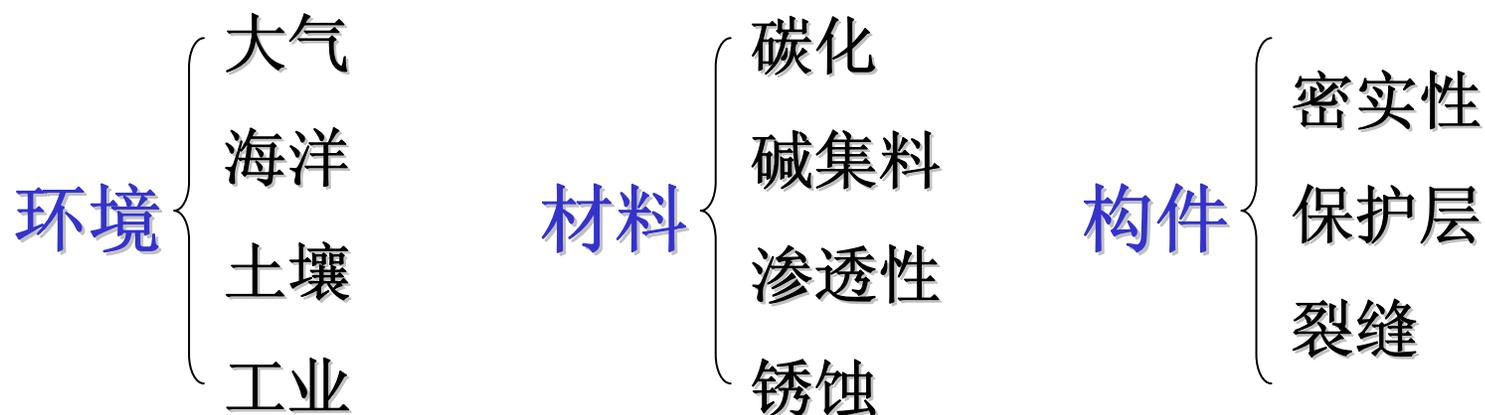


面板混凝土冻胀破坏细部情况

11.5 混凝土结构的耐久性

- ◆ 混凝土结构应能在自然和人为环境的化学和物理作用下，满足在规定的**设计工作寿命**内不出现无法接受的承载力减小、使用功能降低和不能接受的外观破损等的耐久性要求。
- ◆ **耐久性**是指结构在预定设计工作寿命期内，在正常维护条件下，不需要进行大修和加固满足，而满足正常使用和安全功能要求的能力。

11.5 混凝土结构的耐久性



11.5 混凝土结构的耐久性

- ◆ 对于一般建筑结构，设计使用年限为**50年**，重要的建筑物可取**100年**。
- ◆ 近年来，随着建筑市场化的发展，业主也可以对建筑的使用年限提出更高要求。
- ◆ 对于其它土木工程结构，根据其功能要求，设计使用年限也有差别，如桥梁工程一般要求在**100年**以上。

混凝土结构使用寿命



无损伤

劣化开始，可修补

毁坏,废弃



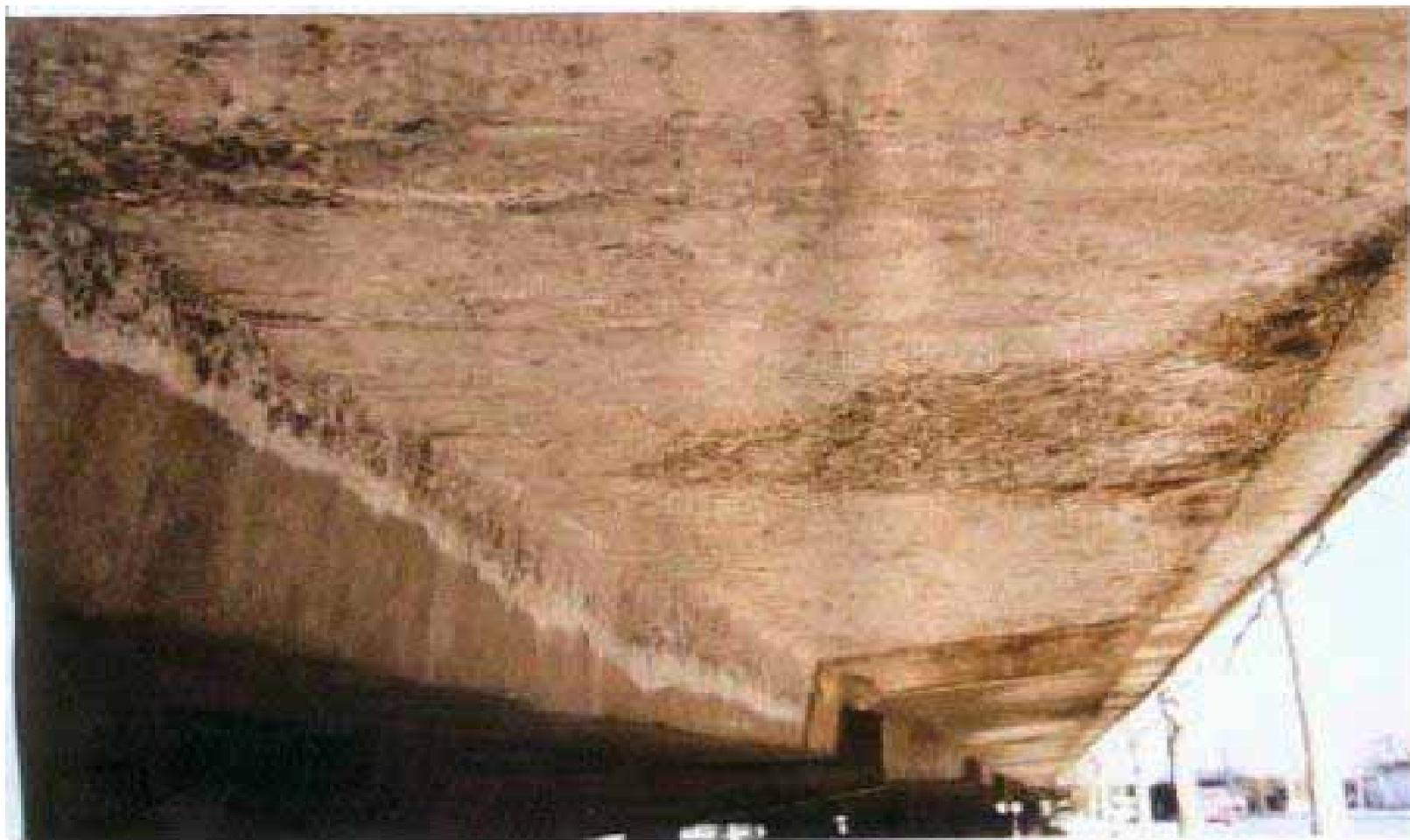
Deteriorated RC Bridge



Deterioration of Reinforced Concrete Bridge due to Poor Durability



**Highway Bridge in Service
New York State, US**



西直门桥底面冻融破坏，骨料外露

引自北京市政设计研究院的资料

山东潍坊白浪河大桥



山东潍坊白浪河大桥









中国美术馆全景



美术馆梁钢筋锈蚀情况

美国：

- **1989年**联邦公路管理局向国会提交的报告《美国公路和桥梁现状》指出，当时积压有待维修的混凝土桥梁所需维修费用**1550亿美元**。
- 美国联邦公路局登记在册（政府管理）桥梁：
 - 1992年 57.2万座，有缺陷21%**
 - 1999年 58.6万座，有缺陷15%**
 - 拆除老桥费用持续增加
- **1998年**美国土木工程学会报告：
 - 美国现有**29%**以上的桥梁和**1/3**以上的道路老化，有**2100**个水坝不安全，估计需有**1.3**万亿美元改善其安全状态

加拿大：

修复劣化损坏的全部基础设施工程估计要耗费**5000亿美元**

英国：

每年用于修复混凝土结构的费用达**200亿英镑**。

1972年在英格兰岛建造的环形快车路上的**11座高架桥**，建造费用**2800万英镑**，而**1974—1989年间的维修费用高达4500万英镑**，估计到**2004年**，维修费用将还要花费**1.2亿英镑**。

发达国家土建设施腐蚀造成的年损失约占**GDP的1.5~2%**，其中主要是混凝土结构腐蚀

欧洲：

1995年，**DuraCrete**计划，研究混凝土结构耐久性设计方法

2000年，提出《混凝土结构耐久性设计指南》

中国：

1995年，在役城镇民用建筑60亿平米，有30亿平米需要加固，其中10亿平米急需维修加固

2000年，公路桥梁278809座，其中危桥9597座，每年需要维修费38亿元

最近出版的《中国腐蚀调查报告》指出，建筑部门的腐蚀年损失约为1000亿人民币

1994年，土木工程领域唯一的攀登计划“重大土木及水利工程可靠性与耐久性的基础研究”

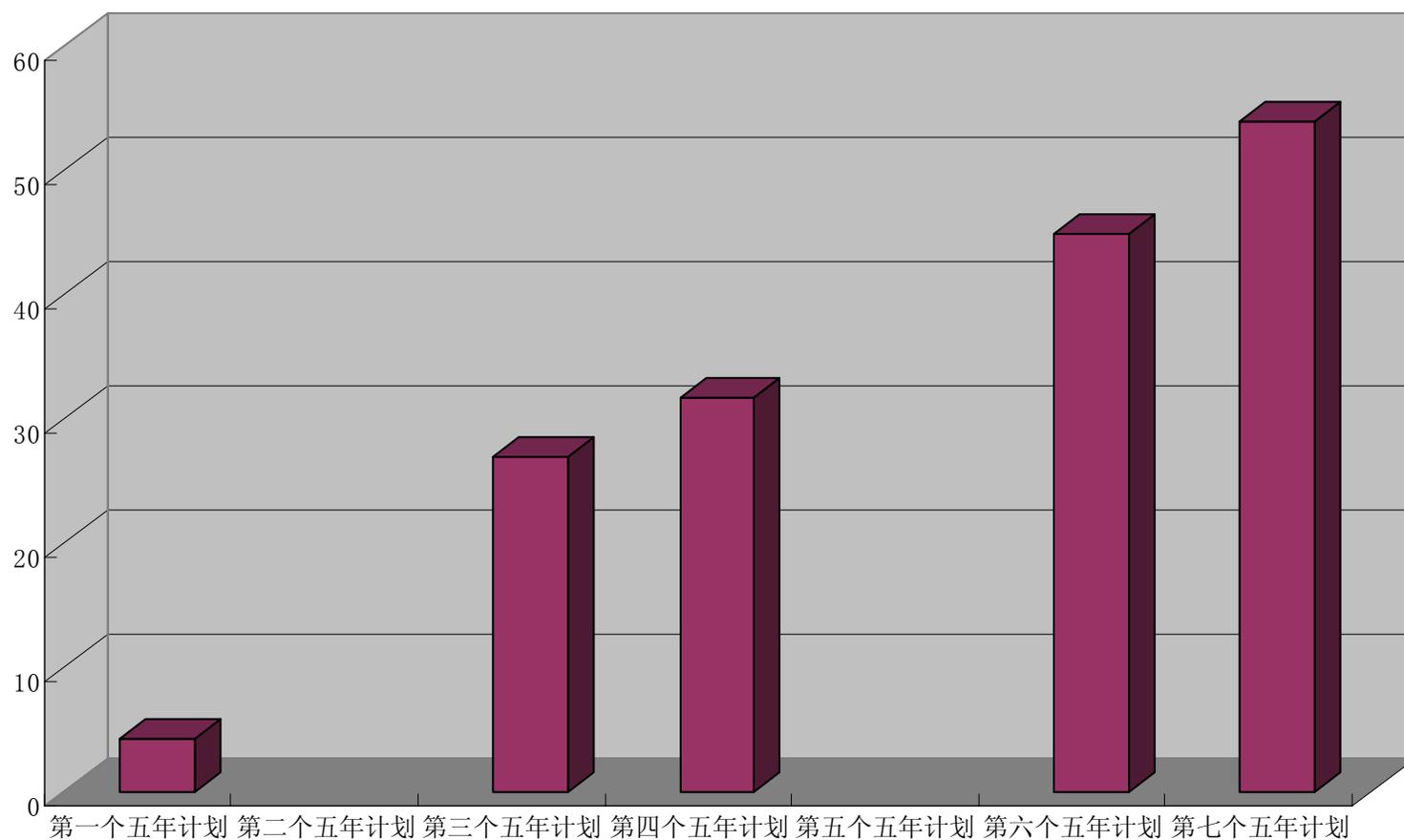
2000年，中国工程院召开“土建工程结构的安全性及耐久性”论坛

2004年，中国工程院土木水利与建筑学部出版《混凝土结构耐久性设计与施工指南》

混凝土结构 耐久性设计与施工指南

中国工程院土木水利与建筑学部
工程结构安全性与耐久性研究咨询项目组

中国建筑工业出版社



我国建国后各阶段维修改造投资 占总基本建设费用的比例

世界上经济发达国家的工程建设大体上经历了三个阶段：

(1)大规模建设；

(2)新建与改建、维修并重；

(3)重点转向既有建筑物的维修改造。

目前经济发达国家处于第三阶段，结构因耐久性不足而失效，或为保证继续正常使用而付出巨大维修代价，这使得耐久性问题变得十分重要。

我国50年代开始大规模建设的工程项目，由于当时经济基础薄弱，材料标准和设计标准都较低，除一些重要的工程项目目前需要继续维持其使用外，其它大部分工程已达到其使用寿命。

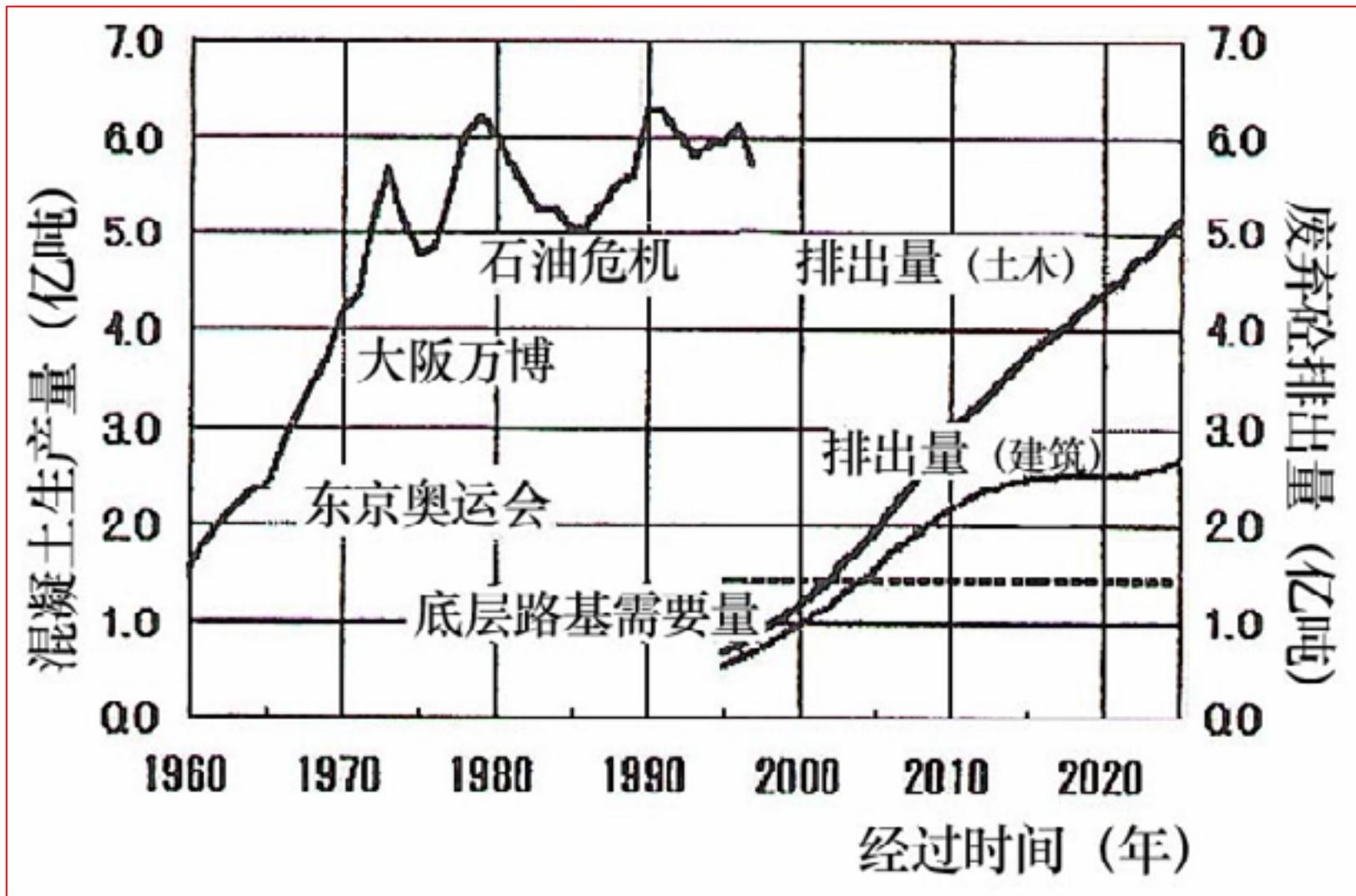
我国真正进入大规模建设是在改革开放以后，因此国外发达国家在耐久性上所遇到的问题应引起我国工程技术人员的足够重视，**避免重蹈发达国家的覆辙**，对国家经济建设造成巨大浪费。

我国现在面临的耐久性问题是发达国家早在二三十年以前曾经遇到过的

我国的耐久性设计标准一直偏低，对混凝土耐久性起关键作用的施工质量又最为薄弱，正常的检测和维修也不够重视

近年来为现代化建设而修建的大型工程，在耐久性上依然和过去一样低下

我们将很快迎来一个大建、大修与拆除重建同时并存的年代



混凝土结构耐久性不足的重要性

- 影响工程正常使用，缩短工程使用寿命

巨大的经济损失

(建造费用 + 维修费用 + 拆除与废弃物处置费用)
使用年限

- 背离可持续发展的道路
资源枯竭，国土破坏、环境污染
废弃混凝土难以处置

结构耐久性不足的主要原因

- 工程设计的耐久性标准过低
- 工程施工进度的不适当追求
- 缺乏正常检测与维修
- 构件强度设计的安全设置水准过低

五倍定律:

设计阶段对钢筋防护节省**1美元**

发现钢筋锈蚀时的维修费为**5美元**

混凝土表面顺筋开裂时的维修费为**25美元**

严重破坏时的维修费为**125美元**

混凝土结构的耐久性在很大程度上取决于结构施工过程中中的质量控制与质量保证以及使用过程中的正确维修与例行检查。

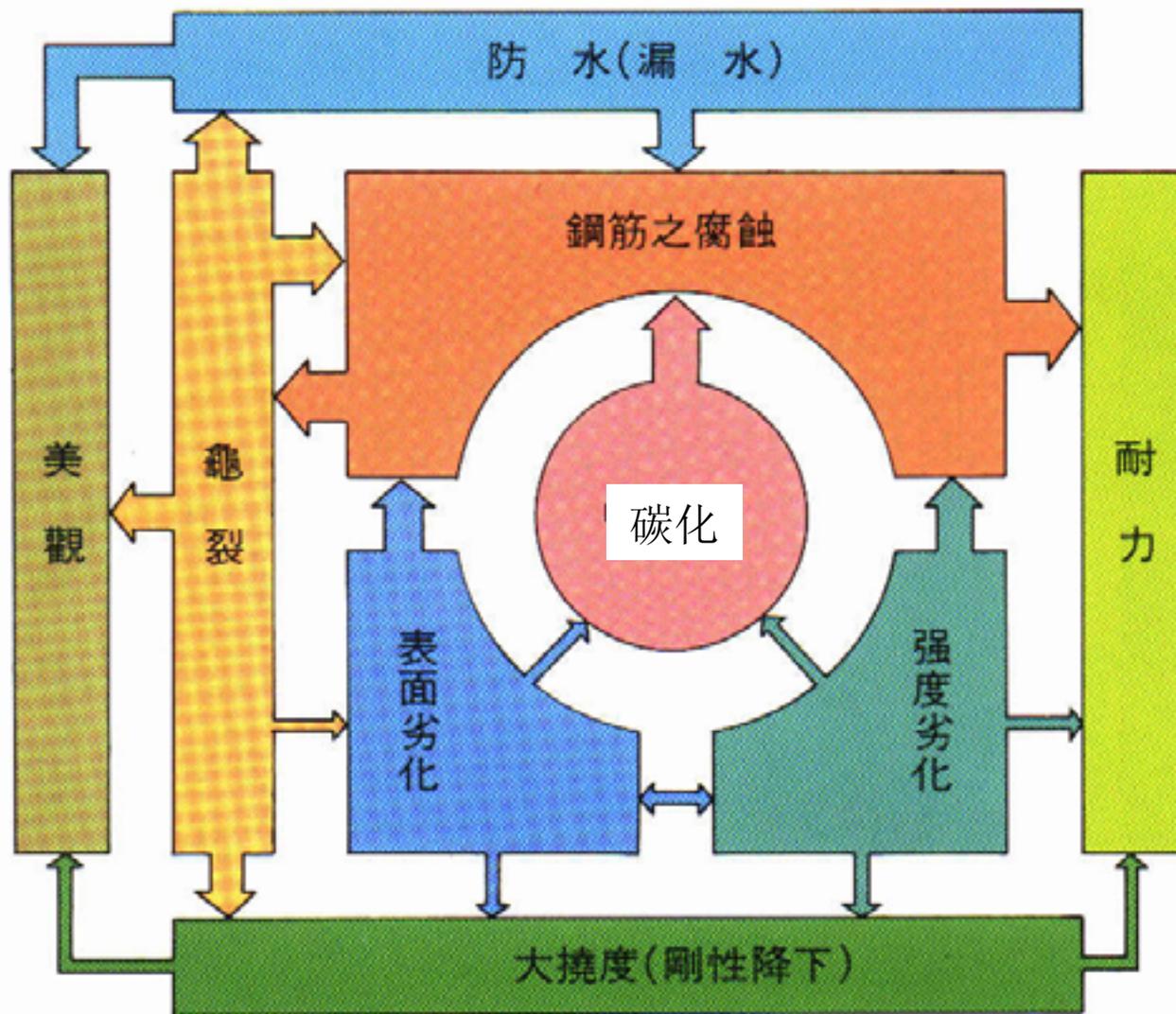
——《混凝土结构耐久性设计与施工指南》

国际桥梁与结构工程协会（IABSE）

——《结构工程师的道德准则》

土木工程的安全、耐久与可持续发展

一、影响混凝土结构耐久性的因素



内部因素:

混凝土强度
渗透性
保护层厚度
水泥品种
标号和用量
外加剂等

外部因素:

环境温度
湿度
CO₂含量
侵蚀性介质等

混凝土养护7天

混凝土养护1天

寿命相差4倍

1. 混凝土的冻融破坏

- ◆ 混凝土水化结硬后，内部有很多毛细孔。在浇筑混凝土时，为得到必要的和易性，往往会比水泥水化所需要的水多些。
- ◆ **多余的水份**滞留在混凝土毛细孔中。低温时水份因结冰产生体积膨胀，引起混凝土内部结构破坏。
- ◆ 反复冻融多次，就会使混凝土的损伤累积达到一定程度而引起结构破坏。
- ◆ 防止混凝土冻融破坏的主要措施是**降低水灰比**，**减少混凝土中多余的水份**。
- ◆ 冬季施工时，应**加强养护**，防止早期受冻，并掺入防冻剂等。

2. 混凝土的碱集料反应

- ◆ 混凝土集料中的某些**活性矿物**与混凝土微孔中的**碱性溶液**产生化学反应称为碱集料反应。
- ◆ 碱集料反应产生的碱-硅酸盐凝胶，吸水后会产生膨胀，**体积可增大3~4倍**，从而混凝土的剥落、开裂、强度降低，甚至导致破坏。
- ◆ 引起碱集料反应有三个条件：
 - (1)**混凝土的凝胶中有碱性物质**。这种碱性物质主要来自于水泥，若水泥中的含碱量（ Na_2O ， K_2O ）大于**0.6%**以上时，则会很快析出到水溶液中，遇到活性骨料则会产生反应；
 - (2)**骨料中有活性骨料**，如蛋白石、黑硅石、燧石、玻璃质火山石、安山石等含 SiO_2 的骨料；
 - (3)**水分**。碱骨料反应的充分条件是有水分，在干燥环境下很难发生碱骨料反应。

3、侵蚀性介质的腐蚀

(1) **硫酸盐腐蚀**：硫酸盐溶液与水泥石中的**氢氧化钙**及水化铝酸钙发生化学反应，生成石膏和硫铝酸钙，产生体积膨胀，使混凝土破坏。硫酸盐除在一些化工企业存在外，海水及一些土壤中也存在。当硫酸盐的浓度（以 SO_2 的含量表示）达到**2%**时，就会产生严重的腐蚀。

(2) **酸腐蚀**：混凝土是碱性材料，遇到**酸性物质**会产生化学反应，使混凝土产生裂缝、脱落，并导致破坏。酸不仅存在于化工企业，在地下水，特别是沼泽地区或泥炭地区广泛存在碳酸及溶有 CO_2 的水。此外有些油脂、腐植质也呈酸性，对混凝土有腐蚀作用。

(3) **海水腐蚀**：在海港、近海结构中的混凝土构筑物，经常收到海水的侵蚀。海水中的 NaCl 、 MgCl_2 、 MgSO_4 、 K_2SO_4 等成分，尤其是 Cl^- 和**硫酸镁**对混凝土有较强的腐蚀作用。在海岸飞溅区，受到干湿的物理作用，也有利于 Cl^- 和 SO_4 的渗入，极易造成钢筋锈蚀。

贵州铝厂一柱开胀





嘉裕关一结构梁腐蚀破坏



张掖—碱泉村



张掖一墙面



张掖—高架桥墩



青海化工厂一桥柱



青海化工厂一桥面护栏



团结湖一桥柱







4. 混凝土的碳化

- ◆ **混凝土中碱性物质** (Ca(OH)_2) 使混凝土内的钢筋表面形成氧化膜，它能有效地保护钢筋，防止钢筋锈蚀。
- ◆ 但由于大气中的二氧化碳 (CO_2) 与混凝土中的碱性物质发生反应，**使混凝土的Ph值降低**。其他物质，如 SO_2 、 H_2S ，也能与混凝土中的碱性物质发生类似的反应，使混凝土的Ph值降低，这就是混凝土的碳化。
- ◆ **当混凝土保护层被碳化到钢筋表面时**，将破坏钢筋表面的氧化膜，引起钢筋的锈蚀。此外，碳化还会加剧混凝土的收缩，可导致混凝土的开裂。
- ◆ 因此，**混凝土的碳化是混凝土结构耐久性的重要问题**。
- ◆ 混凝土的碳化从构件表面开始向内发展，到保护层完全碳化，所需要的时间与**碳化速度**、**混凝土保护层厚度**、**混凝土密实性**以及**覆盖层情况**等因素有关。

[1] 环境因素

- ◆ 碳化速度主要取决于空气中的 CO_2 浓度和向混凝土中的扩散速度。空气中的 CO_2 浓度大，混凝土内外 CO_2 浓度梯度也愈大，因而 CO_2 向混凝土内的渗透速度快，碳化反应也快。
- ◆ 空气湿度和温度对碳化反应速度有较大影响。因为碳化反应要产生水份向外扩散，湿度越大，水份扩散越慢。当空气相对湿度大于80%，碳化反应的附加水份几乎无法向外扩散，使碳化反应大大降低。
- ◆ 而在极干燥环境下，空气中的 CO_2 无法溶于混凝土中的孔隙水中，碳化反应也无法进行。
- ◆ 试验表明，当混凝土周围介质的相对湿度为50%~75%时，混凝土碳化速度最快。环境温度越高，碳化的化学反应速度越快，且 CO_2 向混凝土内的扩散速度也越快。

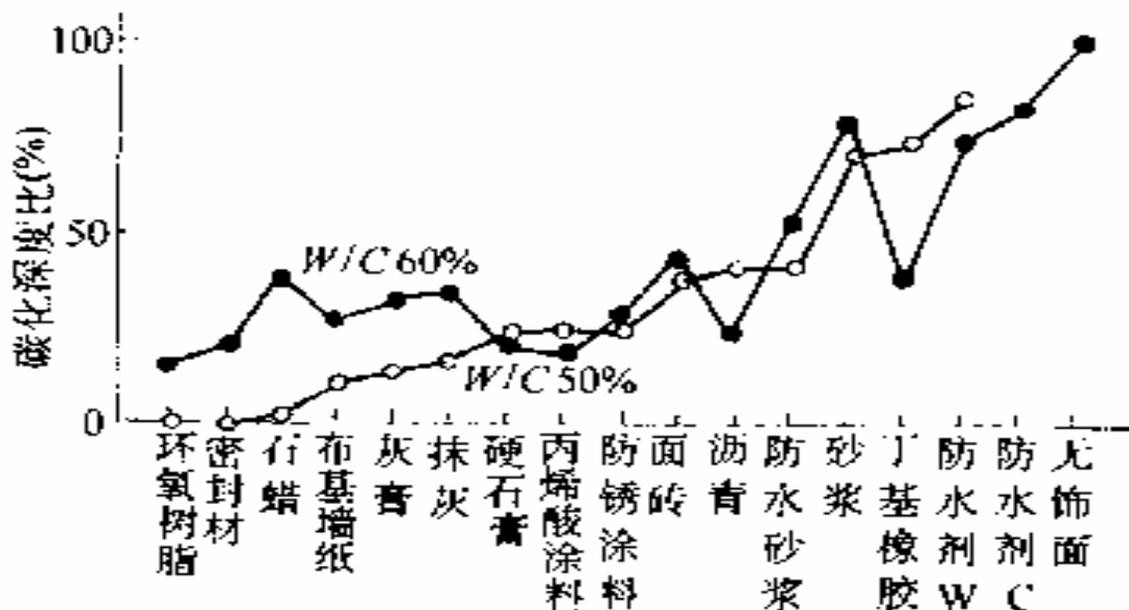
[2] 材料因素

- ◆ 水泥是混凝土中最活跃的成分，其品种和用量决定了单位体积中可碳化物质的含量，因而对混凝土碳化有重要影响。
- ◆ 单位体积中**水泥的用量越多**，会提高混凝土的强度，又会提高混凝土的抗碳化性能。
- ◆ **水灰比**也是影响碳化的主要因素。在水泥用量不变的条件下，水灰比越大，混凝土内部的孔隙率也越大，密实性就越差， CO_2 的渗入速度越快，因而碳化的速度也越快。
- ◆ 水灰比大会使混凝土孔隙中游离水增多，有利于碳化反应。
- ◆ 混凝土中**外加掺合料和骨料品种**对碳化也有一定的影响。

[3] 施工养护条件

混凝土搅拌、振捣和养护条件影响混凝土的密实性，因而对碳化有较大影响。此外，养护方法与龄期对水泥的水化程度有影响，进而影响混凝土的碳化。所以保证混凝土施工质量对提高混凝土的抗碳化性能十分重要。

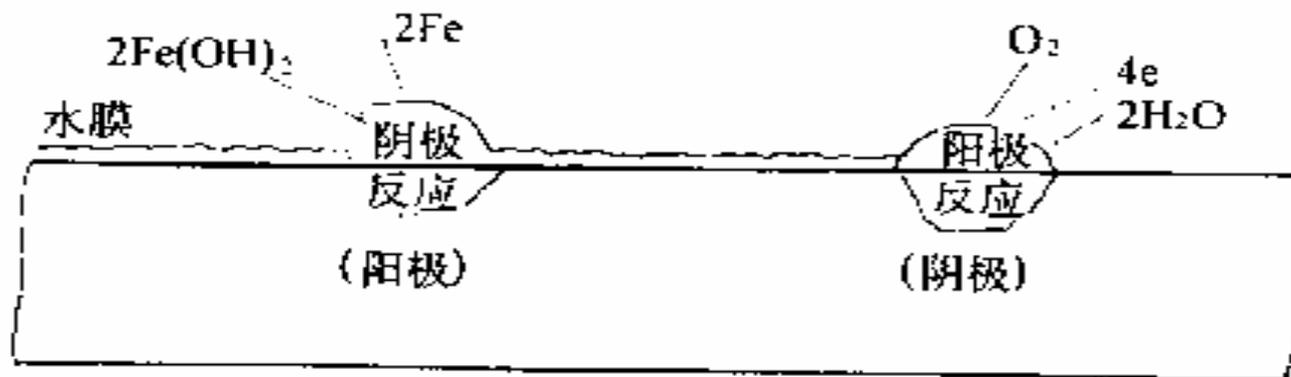
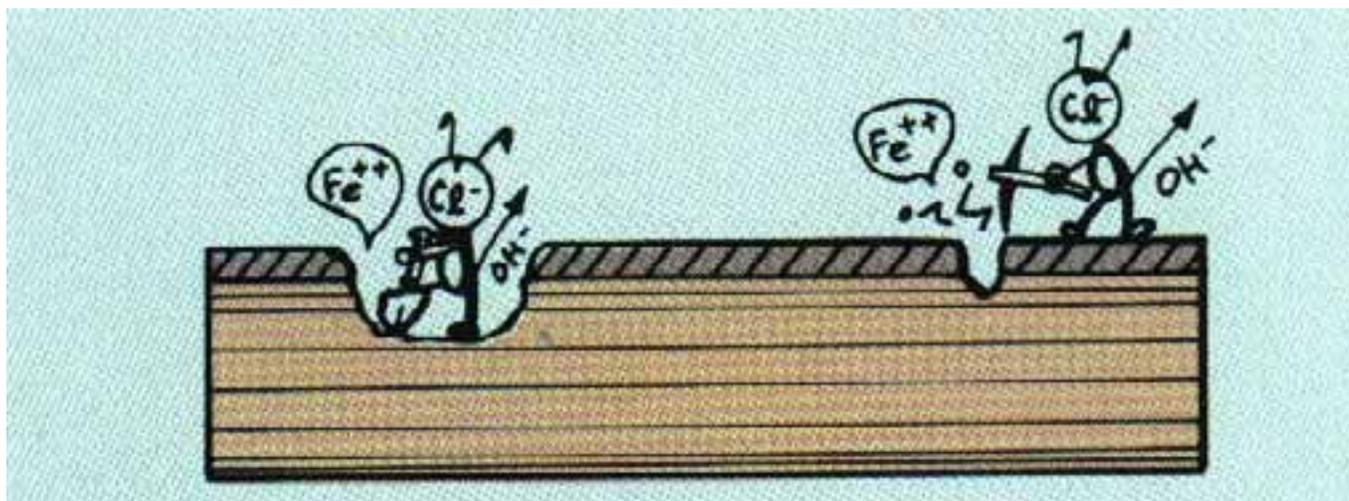
[4] 覆盖层



不同饰面材料的碳化深度比

5. 钢筋锈蚀

钢筋锈蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性的最关键问题。



- ◆ **当混凝土未碳化时**，由于水泥的高碱性，钢筋表面形成一层致密的氧化膜，阻止了钢筋锈蚀电化学反应。
- ◆ **当混凝土被碳化**，钢筋表面的氧化膜被破坏，在有水份和氧气的条件下，就会发生锈蚀的电化学反应。
- ◆ 钢筋锈蚀产生的铁锈（氢氧化亚铁 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ），体积比铁增加2~6倍，保护层被挤裂，使空气中的水份更易进入，促使锈蚀加快发展。
- ◆ **氧气和水份是钢筋锈蚀必要条件**，**混凝土的碳化仅是为钢筋锈蚀提供了可能**。
- ◆ 当构件使用环境很干燥（湿度 $<40\%$ ），或完全处于水中，钢筋的锈蚀极慢，几乎不发生锈蚀。
- ◆ 而裂缝的发生为氧气和水份的浸入创造了条件，同时也使混凝土的碳化形成立体发展。

- ◆ 但近年来的研究发现，**锈蚀程度与荷载产生的横向裂缝宽度无明显关系**，在一般大气环境下，裂缝宽度即便达到**0.3mm**，也只是在裂缝处产生锈点。
- ◆ 这是由于钢筋锈蚀是一个电化学过程，因此**锈蚀主要取决于氧气通过混凝土保护层向钢筋表面的阴极的扩散速度**，而这种扩散速度主要取决于混凝土的**密实度**。
- ◆ 裂缝的出现仅是使裂缝处钢筋局部脱钝，使锈蚀过程得以开始，但它对锈蚀速度不起控制作用。
- ◆ 因此，防止钢筋锈蚀最重要的措施是在增加混凝土的**密实性**和混凝土的**保护层厚度**。

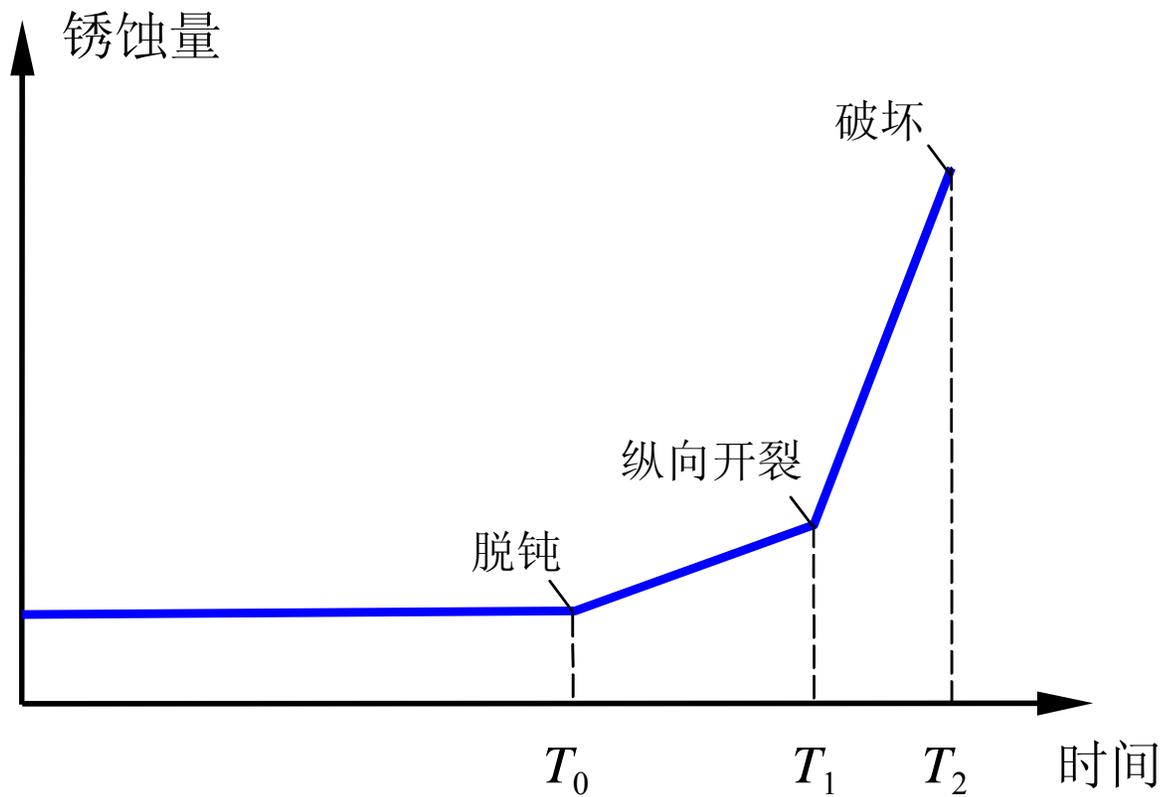
钢筋锈蚀引起混凝土结构损伤过程如下，首先在裂缝宽度较大处发生个别点的“坑蚀”，继而逐渐形成“环蚀”，同时向裂缝两边扩展，形成锈蚀面，使钢筋有效面积减小。严重锈蚀时，会导致沿钢筋长度出现纵向裂缝，甚至导致混凝土保护层脱落，习称“暴筋”，从而导致截面承载力下降，直至最终引起结构破坏。



钢筋锈蚀引起混凝土结构损伤过程如下，首先在裂缝宽度较大处发生个别点的“坑蚀”，继而逐渐形成“环蚀”，同时向裂缝两边扩展，形成锈蚀面，使钢筋有效面积减小。严重锈蚀时，会导致沿钢筋长度出现纵向裂缝，甚至导致混凝土保护层脱落，习称“暴筋”，从而导致截面承载力下降，直至最终引起结构破坏。



Carbonation



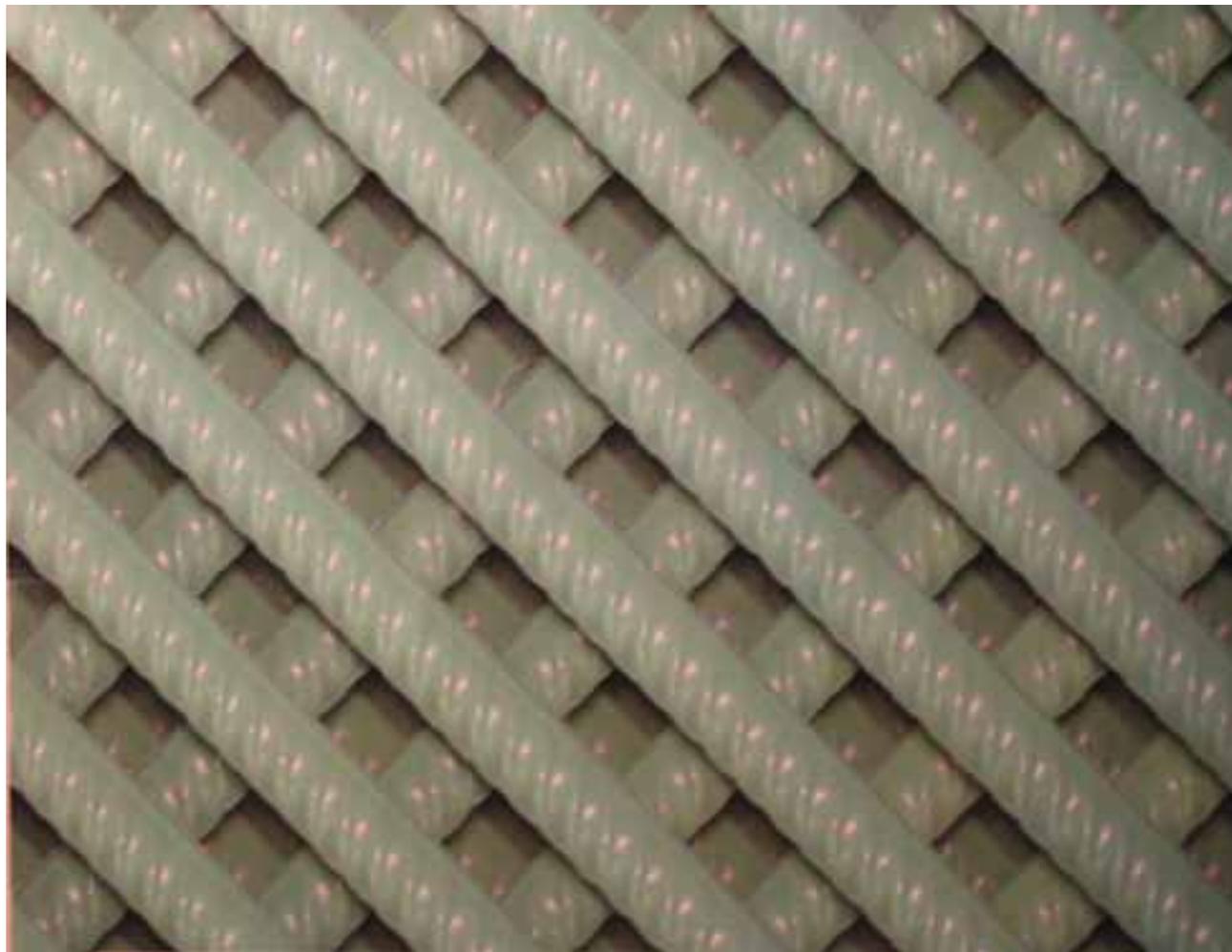
面积减小

屈服强度降低

粘结力降低

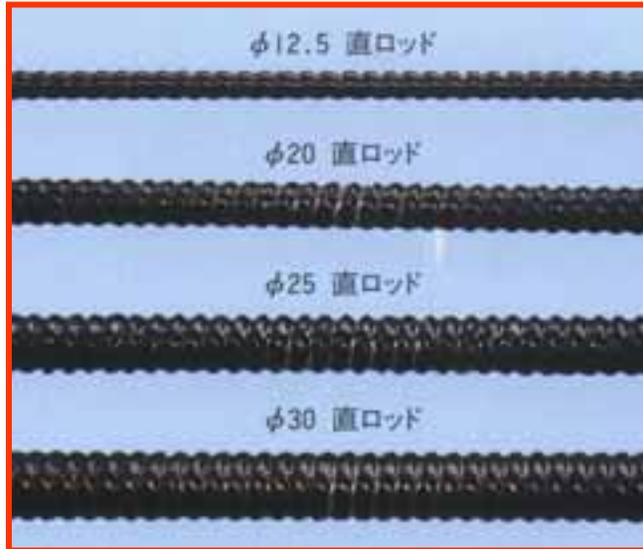
钢筋锈蚀引起混凝土结构损伤过程如下，首先在裂缝宽度较大处发生个别点的“坑蚀”，继而逐渐形成“环蚀”，同时向裂缝两边扩展，形成锈蚀面，使钢筋有效面积减小。严重锈蚀时，会导致沿钢筋长度出现纵向裂缝，甚至导致混凝土保护层脱落，习称“暴筋”，从而导致截面承载力下降，直至最终引起结构破坏。

除增加混凝土的密实度和保护层厚度外，采用涂面层、钢筋阻锈剂、涂层钢筋等措施来防止钢筋的锈蚀。



环氧涂层钢筋

FRP筋和索



我国耐久性状况

	中国	美国	英国
混凝土 最低强度	C15	C25	C30
保护层厚度 mm	板20 梁30 主筋	38,d<16 51,d>16 最外侧筋	C35,35 C40,40 最外侧筋
抗冻融	仅水工规范要 求引气	要求引气	要求引气

我国现在的大多数工程的耐久性都存在问题，但都符合我国规范

二、结构工作环境类别

- ◆ 混凝土结构的耐久性与结构工作的**环境**有密切关系。
- ◆ 同一结构在强腐蚀环境中要比一般大气环境中的使用寿命短
- ◆ 对于不同环境，可以采取不同措施来保证结构使用寿命。
- ◆ 如在恶劣环境，一味增加混凝土保护层是不经济的，效果也不一定好。可在构件表面采用防护涂层。

表 11-3 混凝土结构的使用环境类别

环境类别		说 明
一		室内正常环境；无侵蚀性介质、无高温高湿影响、不与土壤直接接触的环境
二	a	室内潮湿环境；露天环境；与无侵蚀性水及土壤直接接触的环境
	b	寒冷及严寒地区的露天环境；与无侵蚀性水及土壤直接接触的环境
三		使用除冰盐的环境；严寒寒冷地区的水位变动区；滨海地区室外环境；
四		海洋环境（海水潮汐区；浪溅区；海水下环境）
五		受人为和自然的化学侵蚀性物质影响的环境

三、耐久性极限状态与耐久性设计

- ◆ **混凝土结构的耐久性极限状态**，是指经过一定使用年限后，结构或结构某一部分达到或超过某种特定状态，以致结构不能满足预定功能的要求。
- ◆ 但经过简单修补、维修，费用不大，可恢复使用要求的情况，可以认为没有达到耐久性极限状态。
- ◆ 只有当严重超出正常维修费允许范围时，结构的使用寿命才终止。

三、耐久性极限状态与耐久性设计

[1] 对于不允许钢筋锈蚀的构件和环境，混凝土保护层完全碳化，即**钢筋脱钝的时间 T_1** 。

不允许钢筋锈蚀的构件和环境有：预应力混凝土构件；低温环境；反复荷载作用；塑性铰区；采用钢丝作主要受力钢筋的构件；重要的、有纪念性的建筑物。

[2] 钢筋锈蚀后截面损失率达到某一值 T_2 ，如1%~5%，可依耐久性等级而定。

该极限状态可为一般混凝土结构采用，因为钢筋从脱钝到丧失承载力还有相当长的时间，钢筋截面损失1%~5%对结构承载力的影响还不是很严重。

[3] 结构或构件的可靠指标降低到某一允许值 T_3 。

随着时间的推移，因荷载的作用、环境变化引起的材料老化、损伤，结构材料的性能逐渐下降，结构可靠度随时间逐渐降低，失效概率逐渐增大。

当可靠指标降低到不可接受的程度时，则认为达到了耐久性极限状态。

但结构经过维修，其可靠度将提高。

[4] 徐变位移达到某一限值。

徐变是混凝土的一项性质，有些结构甚至是重大结构因徐变过大而发生破坏，这也可认为是一种耐久性破坏。

- ◆ 对结构寿命的计算还是一个很困难的问题，目前主要对基于混凝土碳化和钢筋锈蚀所需要时间的计算。
- ◆ T_1 为混凝土保护层完全碳化所需要的时间，若不容许钢筋锈蚀，则 T_1 即为结构寿命；
- ◆ 若允许钢筋有一定量的锈蚀，则可取开始出现沿钢筋产生纵向裂缝的时间 T_1+T_2 作为结构寿命；
- ◆ 若允许结构承载力开始下降，则可取结构寿命 $T_1+T_2+T_3$ 。

四、保证耐久性的措施

1. 最小保护层厚度

- ◆ 为保证耐久性和钢筋的粘结力，对一、二、三类环境一般建筑结构（设计工作寿命**50**年），《规范》规定了最小混凝土保护层厚度。
- ◆ 对四、五类环境种的建筑结构，应按专门规定考虑。
- ◆ 当对结构设计工作寿命有更高要求时（**100**年），混凝土保护层厚度应将表5-1的数值乘以**1.4**或采用表面防护，定期维修等措施。

2. 混凝土的要求

- ◆ 耐久性的另一个重要方面是**混凝土密实性**，因为密实性好对延缓混凝土的碳化和钢筋锈蚀有很大作用。
- ◆ 提高混凝土密实性主要是减小水灰比和保证水泥用量。
- ◆ 若混凝土种氯离子含量过大，则会对钢筋锈蚀有恶劣影响。

北美（加拿大安大略省） 公路桥面板耐久性设计要求

年份	混凝土最低强度等级	板的最小厚度 (cm)	保护层的最小厚度 (cm)	其它要求
1958 前	C25	18	2.5	不要求引气和防水处理
58—61				增加：引气，防水处理
61—65				增加：防水层
65—72	C35	20	3.8	增加：橡胶膜防水
72—75				
75—78			6.3 ± 1.2	增加：顶层钢筋环氧涂膜
78—81				
81—86	C40	22.5	7 ± 2	
86—(91)				增加：扩大环氧涂膜钢筋的设置部位

表 11-4 结构混凝土耐久性的基本要求

环境类别		水灰比 不大于	水泥用量不少于 (kg/m ³)	混凝土强度 等级不小于	氯离子含量 不大于
一		0.65	200	C15	1.00%
二	a	0.60	225	C20	0.30%
	b	0.55	250	C25	0.30%
三		0.50	275	C30	0.15%

注：1、氯离子含量按水泥总重量的百分率计算；

2、预应力构件的混凝土中的氯离子含量不得超过 0.06%；

3、当混凝土中加入掺合料时，可酌情降低水泥用量；

处于二类环境中的基础，混凝土强度等级可采用 C20，但保护层厚度应符合《地基基础设计规范》的要求。

表 11-5 混凝土中的碱含量限值 (kg/m³)

环境类别	一般结构	重要结构	特殊结构
一	3.5		3.0
二、三			用非活性骨料

注：1、当混凝土中加入矿渣、粉煤灰等活性掺合料且有可靠根据时，可放宽碱含量的限值；

2、当没有活性骨料时，可不考虑碱含量。

[3] 裂缝控制：裂缝的出现加快了混凝土的碳化，也是使钢筋开始锈蚀的主要条件。为保证混凝土结构的耐久性，必须对裂缝进行控制。《规范》根据结构构件所处环境类别，钢筋种类对腐蚀的敏感性，以及荷载作用时间，将裂缝控制分为三个等级

一级：严格要求不出现裂缝的构件；按荷载标准组合计算时，构件受拉边缘混凝土不应产生拉应力。

二级：一般要求不出现裂缝的构件；按荷载标准组合计算时，构件受拉边缘混凝土不应大于混凝土抗拉强度标准值；而按荷载准永久组合计算时，构件受拉边缘混凝土不宜出现拉应力，

有可靠经验时可适当放松；

三级：允许出现裂缝的构件；按荷载标准组合并考虑长期作用影响计算时，构件的最大裂缝宽度应满足表**11-6**规定的限值。

表 11-6 裂缝控制等级与裂缝宽度限值

环境类别	钢筋混凝土结构		预应力混凝土结构	
	裂缝控制等级	最大裂缝宽度限值	裂缝控制等级	最大裂缝宽度限值
一	三	0.3	三	0.2
二	三	0.2	二	——
三	三	0.2	一	——

4. 其他措施

- ◆ 对于结构中使用环境较差的构件，宜设计成可更换或易更换的构件。
- ◆ 对于暴露在侵蚀性环境中的结构和构件，宜采用带肋环氧涂层钢筋，预应力钢筋应有防护措施。
- ◆ 采用有利提高耐久性的高强混凝土。



挤压环氧树脂修补裂缝