



混凝土结构设计原理

第8章 钢筋混凝土构件裂缝宽度和挠度验算

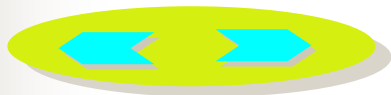
成都理工大学环境与土木工程学院

建筑工程教研室范涛



本章重点

- 了解受弯构件竖向弯曲裂缝的出现和开展过程；
- 掌握受弯构件裂缝宽度的验算方法；
- 掌握受弯构件截面刚度计算与变形验算方法。



第 8 章 钢筋混凝土构件裂缝宽度和挠度验算

结构的 功能

安全性 — 承载能力极限状态

适用性

影响正常使用：如吊车、精密仪器
对其它结构构件的影响

振动、变形过大

对非结构构件的影响：门窗开关，
隔墙开裂等

心理承受：不安全感，振动噪声

耐久性

裂缝过宽：钢筋锈蚀导致承载力降
低，影响使用寿命

外观感觉

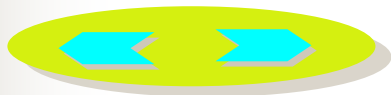
正常使用
极限状态



§ 8.1

概述

- ❖ 结构构件应根据承载能力极限状态及正常使用极限状态分别进行计算和验算。
- ❖ 通常，对各类混凝土构件都要求进行承载力计算；对某些构件（梁、柱、轴心受拉构件等），还应根据其使用条件，通过验算，使变形和裂缝宽度不超过规定限值，同时还应满足保证正常使用及耐久性的其他要求与规定限值，例如混凝土保护层的最小厚度、最大裂缝宽度等。





§ 8.1

概述

- ❖ 构件的裂缝宽度和挠度验算属于正常使用极限状态。
- ❖ 挠度过大影响使用功能，不能保证适用性；
而裂缝宽度过大，则同时影响使用功能和耐久性。

裂缝

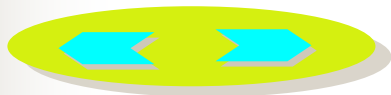
荷载引起的裂缝：与构件的受力特征有关。

(约占20%)

非荷载引起的裂缝：

由材料收缩、温度变化、钢筋锈蚀后体积增大、地基不均匀沉降等产生的裂缝。

(约占80%)



§ 8.1

概述

❖ 裂缝的分类

按裂缝的产生时间



施工期间产生的裂缝和使用期间产生的裂缝

按裂缝的产生原因



非受力因素产生的裂缝和受力因素产生的裂缝

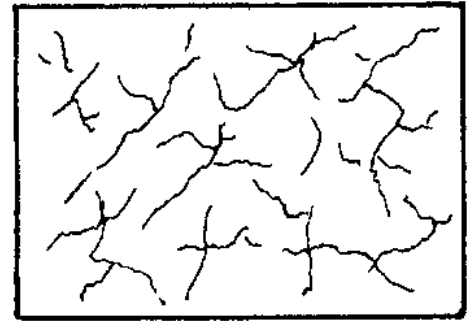
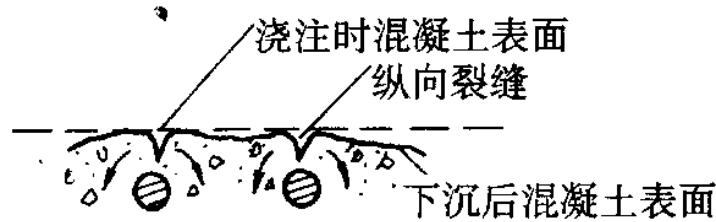
按裂缝的形态



龟裂、横向裂缝（与构件轴线垂直）、纵向裂缝、斜裂缝、八字裂缝、X形交叉裂缝等

❖ 裂缝的成因

施工期间的裂缝



塑性裂缝



固体下沉，表面泌水而引起的。
大风、高温使水分从混凝土表面快速蒸发引起的（龟裂）。

温度裂缝



大体积混凝土中由于混凝土水化作用产生的水化热使内外混凝土产生温度差。

约束收缩裂缝



混凝土的收缩受到约束后产生的裂缝

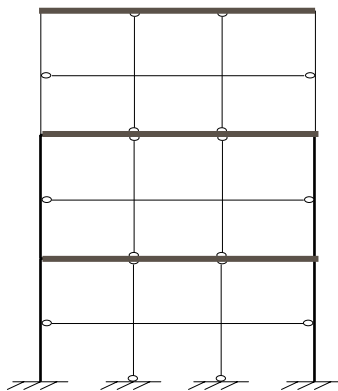
❖ 裂缝的成因

施工期间的裂缝

施工中的
受力裂缝



因施工程序不当而造成的受力裂缝



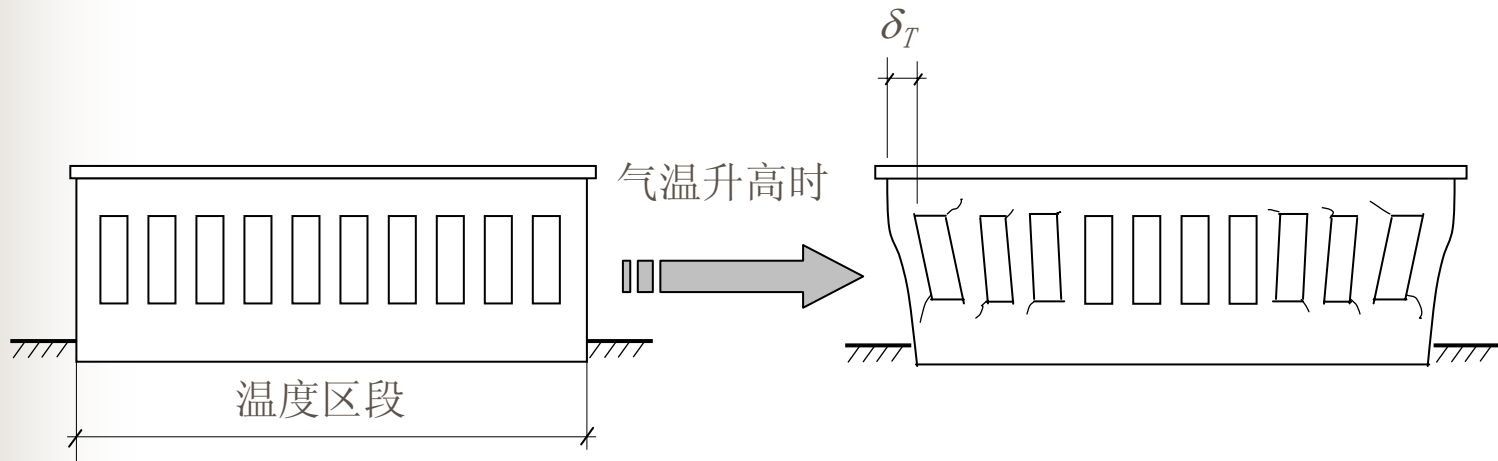
❖ 裂缝的成因

使用期间的裂缝----钢筋锈蚀引起的裂缝



❖ 裂缝的成因

使用期间的裂缝----温度（气温）变化引起的裂缝



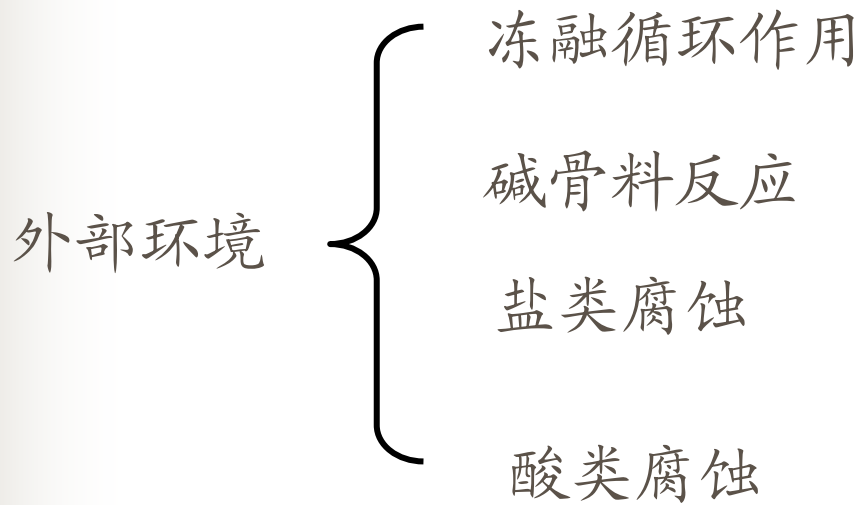
❖ 裂缝的成因

使用期间的裂缝----地基不均匀沉降引起的裂缝



❖ 裂缝的成因

使用期间的裂缝----外部环境引起的裂缝

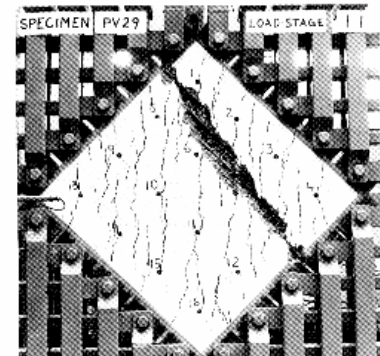
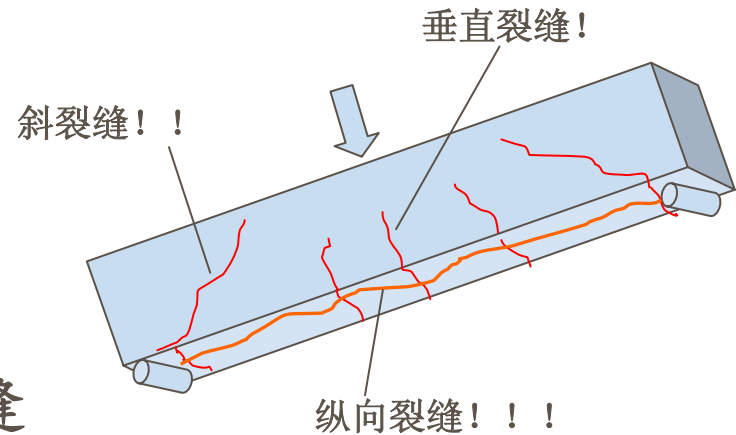


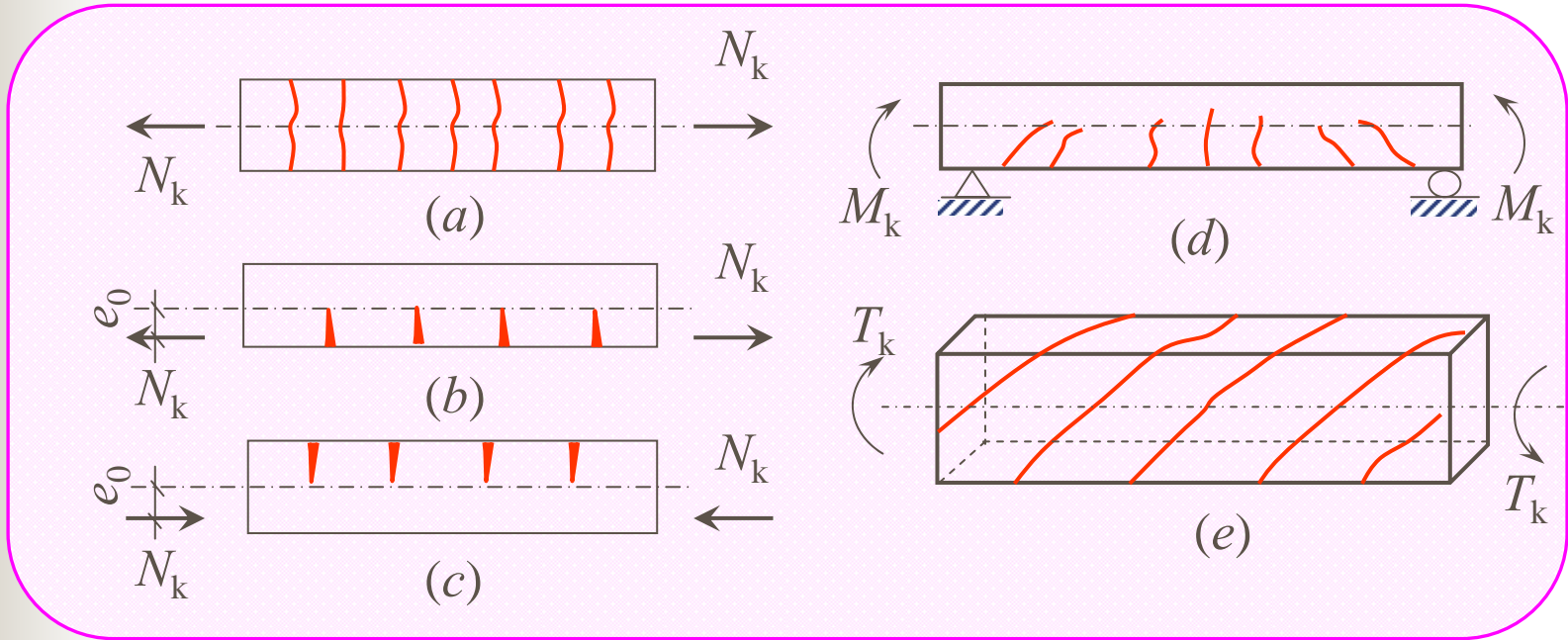
❖ 裂缝的成因

使用期间的裂缝----荷载引起的裂缝

拉、弯、剪、扭、粘结等引起的裂缝

目前，只有在拉、弯状态下混凝土横向裂缝宽度的计算理论比较成熟。这也是下面所要介绍的主要内容。





(a)轴心受拉； (b)偏心受拉； (c)偏心受压；
(d)受弯和受剪； (e)受扭。



非荷载引起的裂缝

- 为防止温度应力过大引起的开裂，规定了伸缩缝之间的**最大间距**。
- 为防止由于钢筋周围混凝土过快地碳化失去对钢筋的保护作用，出现锈胀引起的沿钢筋纵向的裂缝，规定了钢筋的混凝土保护层的**最小厚度**。

通常，裂缝宽度和挠度一般可分别用控制**最大钢筋直径**和**最大跨高比**来控制，**只有在构件截面尺寸小、钢筋应力大时进行验算。**



- ❖ 与不满足承载力极限状态相比，结构构件不满足正常使用极限状态对生命财产的危害性要小，正常使用极限状态的**目标可靠指标 β** 相对较低。
- ❖ 《规范》规定：结构构件承载力计算应采用**荷载设计值**；对于正常使用极限状态，结构构件应分别按荷载的**标准组合、准永久组合（频遇组合）**进行验算或**按照标准组合并考虑长期作用影响**进行验算，并应保证变形、裂缝、应力等计算值不超过相应的规定限值。
- ❖ 按正常使用极限状态验算结构构件的变形及裂缝宽度时，其荷载效应值大致相当与破坏荷载效应值的50%-70%。



- ❖ 裂缝宽度和变形的验算表达式如下：

$$S \leq C$$

式中

- S** —— 结构构件按荷载效应的标准组合、准永久组合或标准组合并考虑长期作用影响得到的**裂缝宽度或变形值**；
- C** —— 结构构件达到正常使用要求的**规定限值**、裂缝宽度和变形限值。



在进行荷载效应计算时，荷载组合有三种情况：

荷载效应的标准组合为：

$$S_k = S_{Gk} + S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} S_{Qik} \quad \dots 8-1$$

荷载效应的频遇组合为：

$$S_k = S_{Gk} + \psi_{f1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{qi} S_{Qik} \quad \dots 8-2$$

荷载效应的准永久组合为：

$$S_q = S_{Gk} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} S_{Qik} \quad \dots 8-3$$



§ 8.2 裂缝宽度验算

裂缝的控制等级分为三级，钢筋混凝土结构构件进行裂缝宽度的验算。

8.2.1 验算公式

$$w_{\max} \leq w_{\lim} \quad \dots 8-4$$

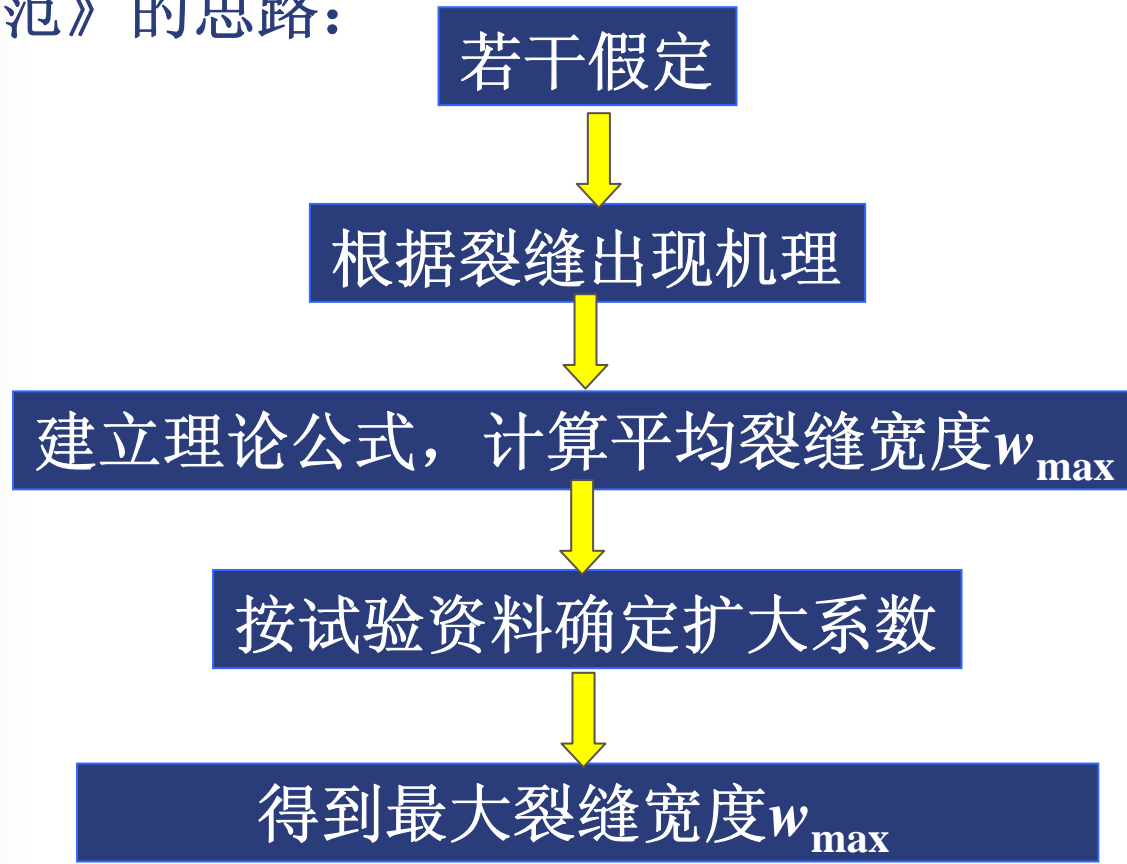
w_{\max} —— 按荷载效应标准值组合并考虑长期作用影响计算的最大裂缝宽度；

w_{\lim} —— 最大裂缝宽度的限值。对此建筑工程、公路桥涵工程有不同的要求。



8.2.2 w_{\max} 的计算方法

《规范》的思路：

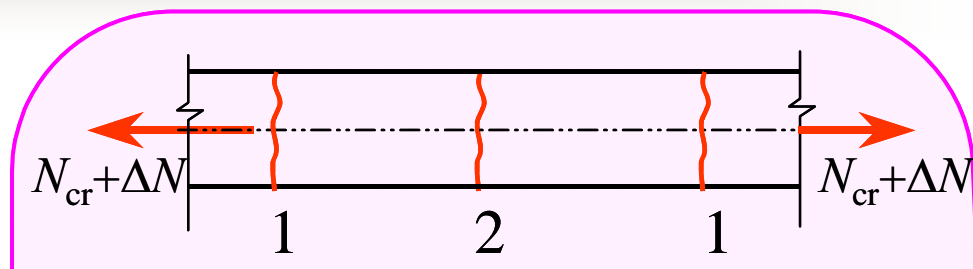




1. 裂缝的出现和开展

◆以轴心受拉构建为例：

出现：



当 $\sigma_c \geq f_{tk}$ ，在某一薄弱环节第一条裂缝出现，由于钢筋和混凝土之间的粘结，混凝土应力逐渐增加至 f_{tk} 出现第二批裂缝，一直到裂缝之间的距离近到不足以使粘结力传递至混凝土达到 f_{tk} ——完成裂缝出现的全部过程。

开展：

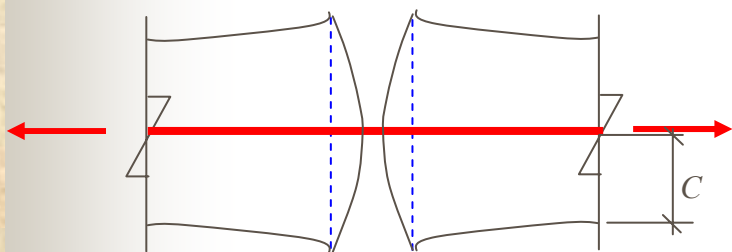
当荷载继续增加到 N_k ，在一个裂缝间距范围内由钢筋与混凝土应变差的累积量，即形成了裂缝宽度。



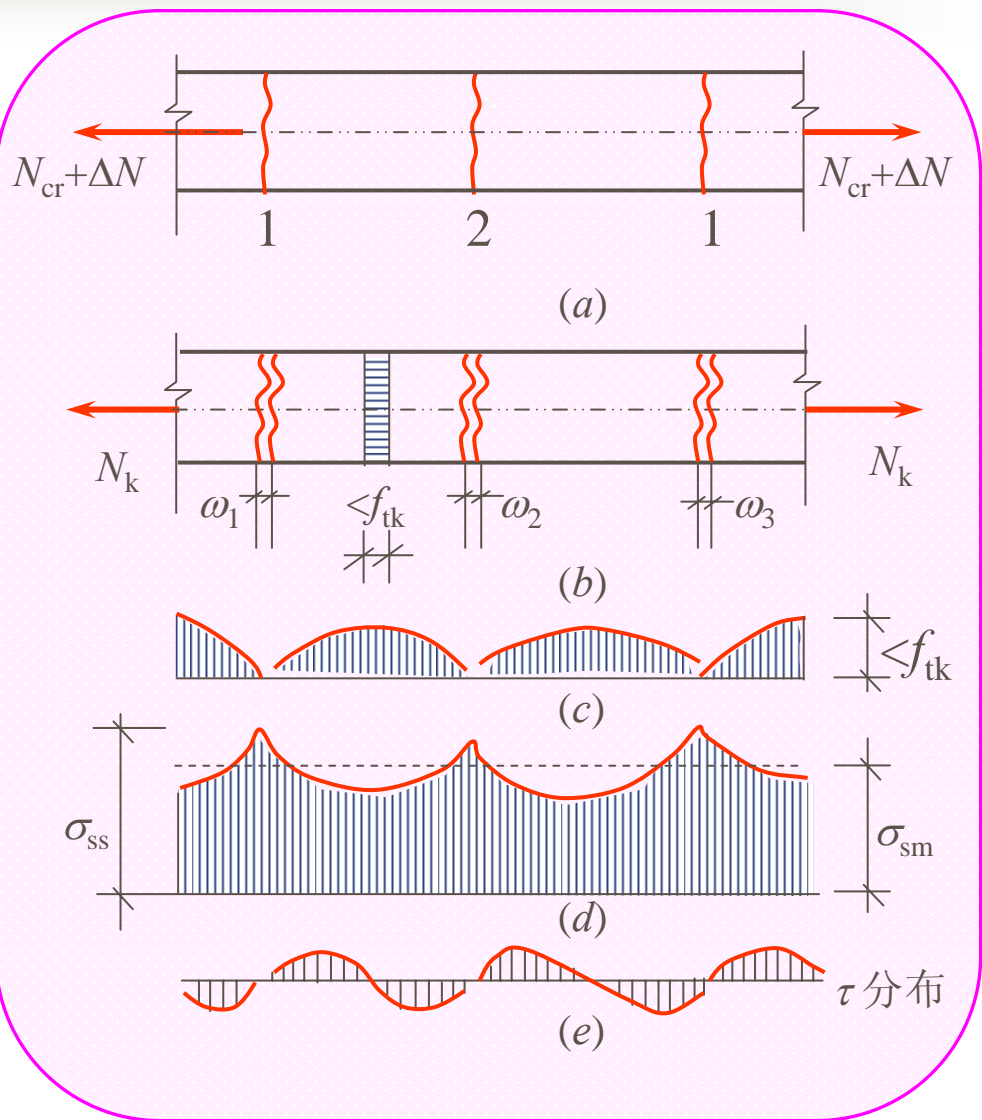
2. 平均裂缝宽度 w_m

粘结 - 滑移理论:

裂缝宽度等于**裂缝间距**范围内钢筋和混凝土的变形差；



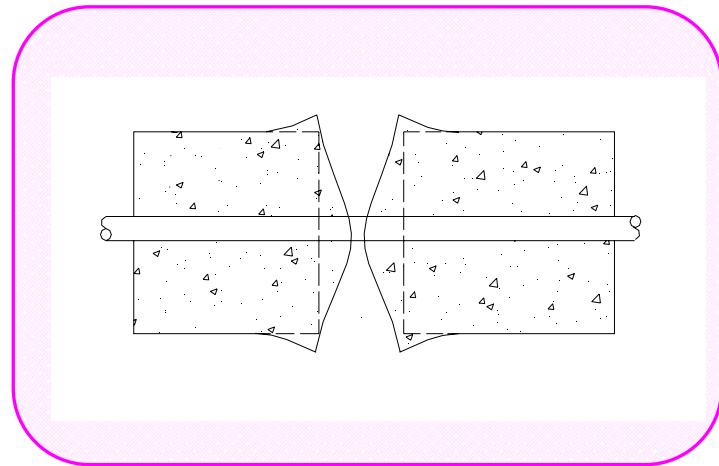
钢筋和混凝土之间发生滑移，混凝土回缩至图中虚线的位置。





❖ 无滑移理论

裂缝开展后，钢筋遇混凝土之间的粘结力并不破坏，故滑移很小可以忽略不计，钢筋处裂缝宽度要比构件表面裂缝宽度小很多。钢筋保护层厚度是影响裂缝宽度的主要因素。



我国《规范》是建立在粘结—滑移理论和无滑移理论的基础上，结合大量试验结果得到的半理论半经验公式。



2. 平均裂缝宽度 w_m

$$w_m = \int_0^{l_{cr}} (\varepsilon_s - \varepsilon_c) dl$$

$$w_m = (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) l_{cr} = \left(1 - \frac{\varepsilon_{sm}}{\varepsilon_{cm}} \right) \varepsilon_{sm} \cdot l_{cr} = \alpha_c \frac{\sigma_{sm}}{E_s} l_{cr}$$

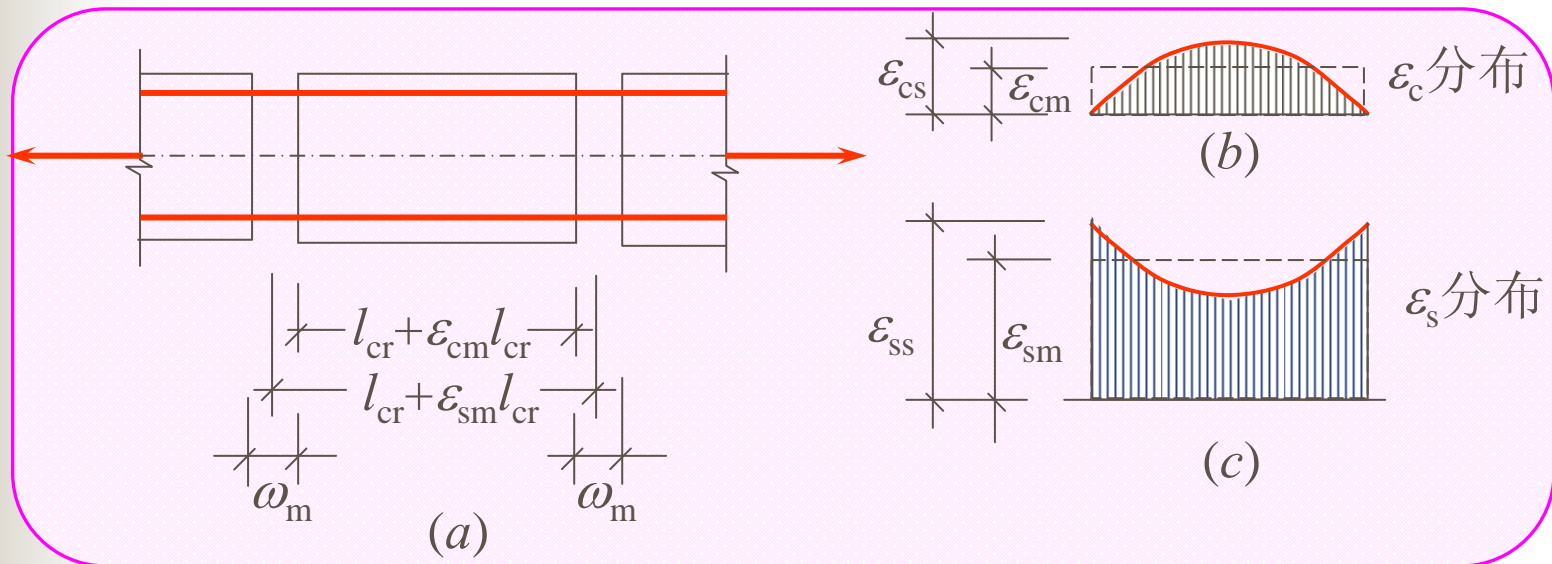
式中: α_c 取 0.85

$$\sigma_{sm} = \psi \sigma_{sk}$$

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

平均裂缝间距

...8-5



➤ ①平均裂缝间距 l_{cr}

理论分析表明，裂缝间距主要取决于有效配筋率 ρ_{te} ，钢筋直径 d 及其表面形状。此外还与混凝土保护层厚度 c 有关。

有效配筋率 ρ_{te} ——指按有效受拉混凝土截面面积 A_{te} 计算的纵向受拉钢筋的配筋率，即：

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

轴心受拉构件 $A_{te} = A$

受弯、偏压、偏拉 $A_{te} \begin{cases} \frac{h}{2} \cdot b & \text{矩形、T形截面} \\ \frac{h}{2} \cdot b + (b_f - b)h_f & \text{倒T形截面} \end{cases}$

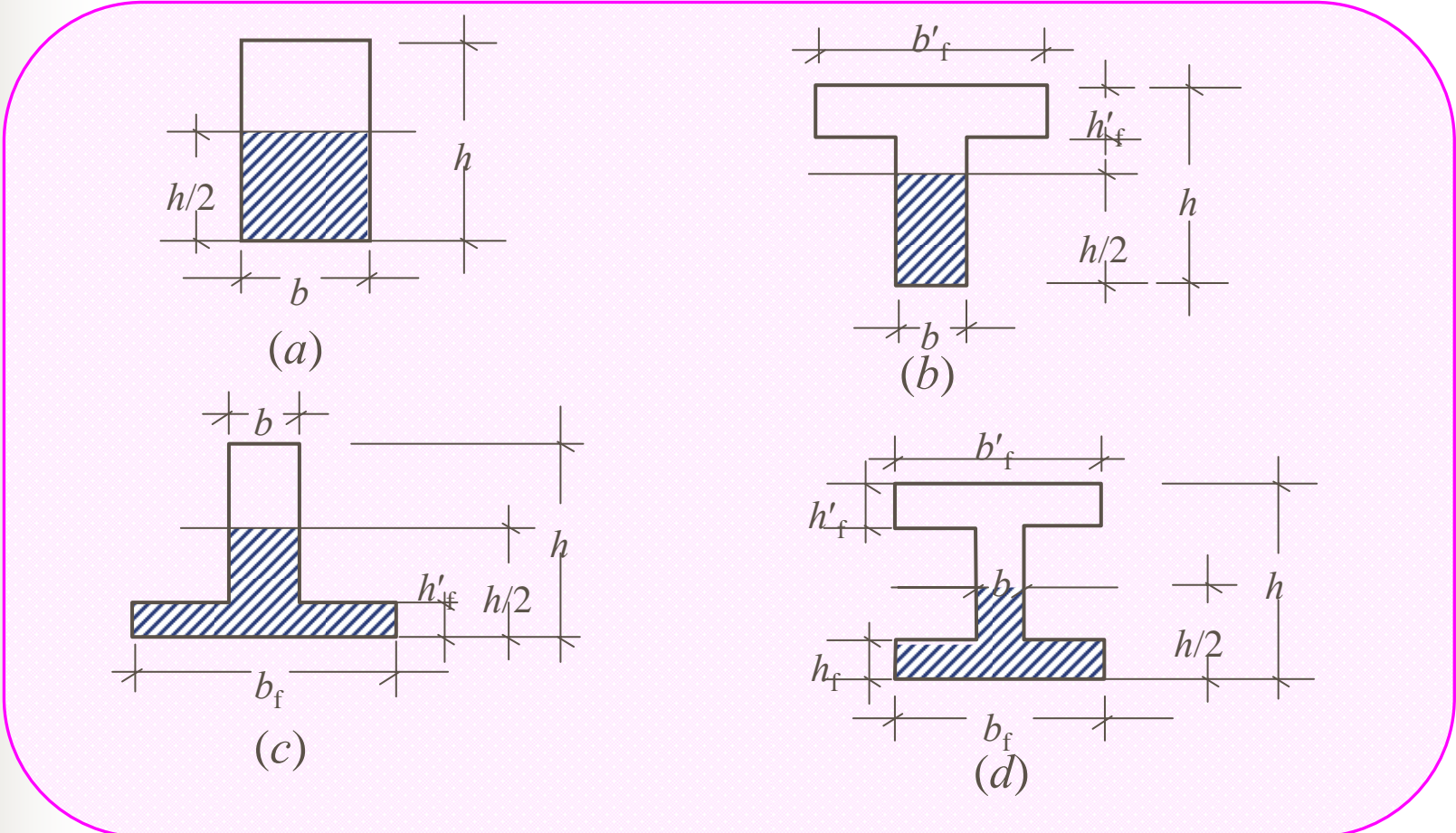
有效配筋率

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

$\frac{h}{2} \cdot b$ 矩形、T形截面

$A_{te} \frac{h}{2} \cdot b + (b_f - b)h_f$

倒T形截面





➤ ①平均裂缝间距 l_{cr}

$$l_{cr} = \beta \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right)$$

...8-9

式中:

β ——与受力特性有关的系数

c ——保护层厚度;

d_{eq} ——纵向受拉钢筋的等效直径, mm;

轴心受拉 $\beta=1.1$

受弯、偏心受压 $\beta=1.05$

偏拉 $\beta=1.0$

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



$$l_{cr} = \beta \left(1.9c + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right)$$

...8-9

d_{eq} ——纵向受拉钢筋的等效直径，mm；

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

v_i ——纵向受拉钢筋的表面特征系数

光面： $v=1.0$

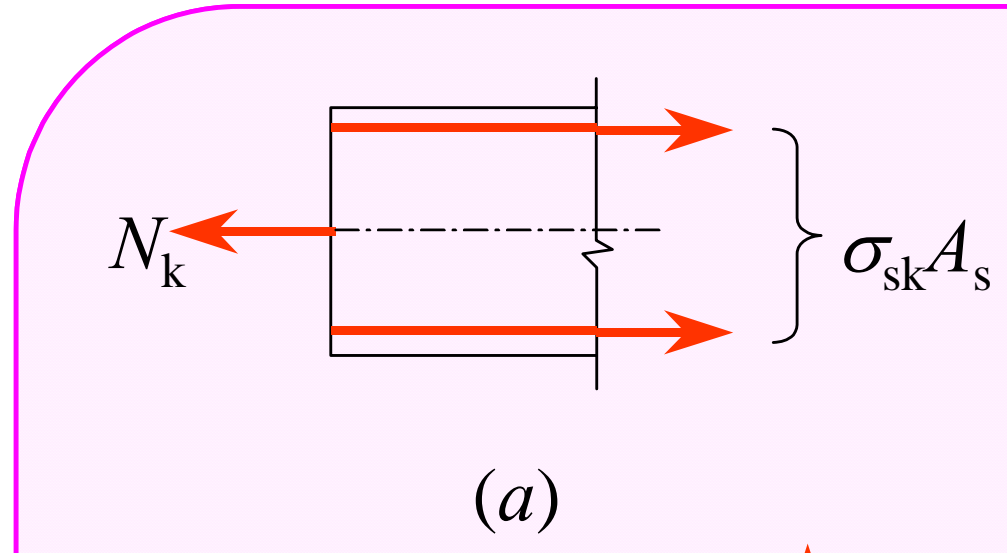
带肋： $v=0.7$

n_i ——第*i*种纵向受拉钢筋的根数；

ρ_{te} ——截面的有效配筋率， $\rho_{te} = A_s / A_{te}$



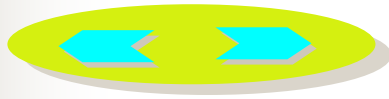
➤ ②裂缝截面处钢筋应力 σ_{sk}



轴心受拉：

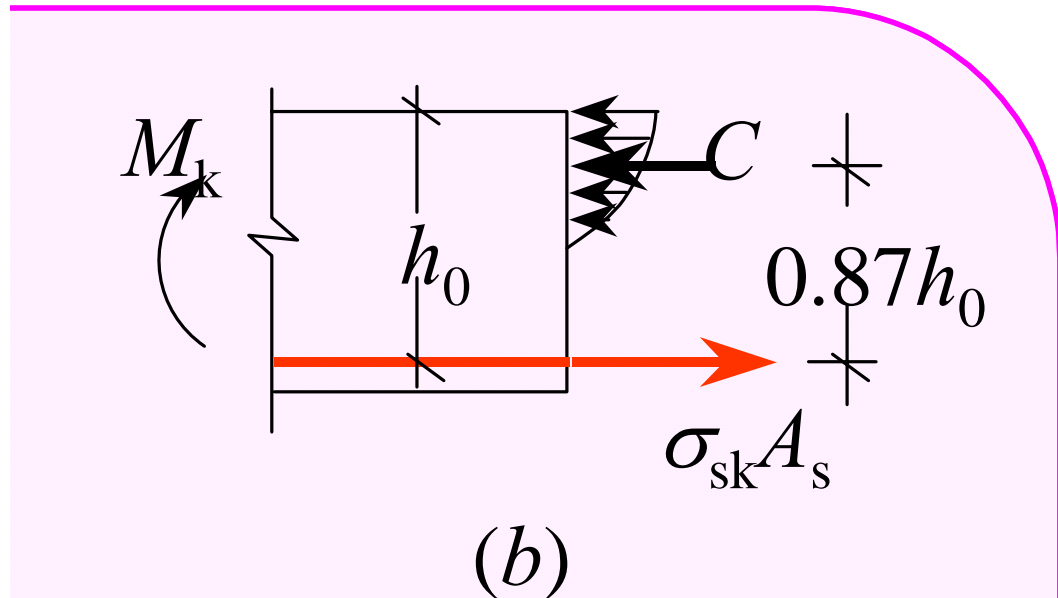
$$\sigma_{sk} = \frac{N_k}{A_s}$$

...8-8





➤ ② 裂缝截面处钢筋应力 σ_{sk}



受弯:

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k}{0.87h_0 A_s}$$

...8-9



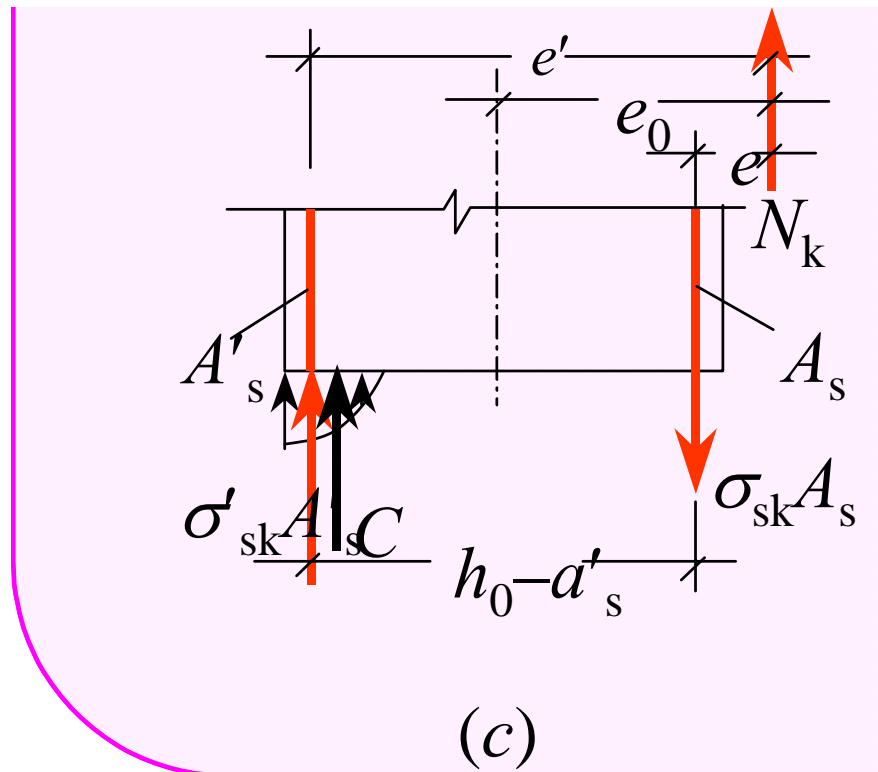


➤ ② 裂缝截面处钢筋应力 σ_{sk}

偏心受拉:

$$\sigma_{sk} = \frac{N_k e'}{A_s (h_0 - a'_s)}$$

...8-10





➤ ②裂缝截面处钢筋应力 σ_{sk}

偏心受压：

$$\sigma_{sk} = \frac{N_k (e - z)}{A_s z}$$

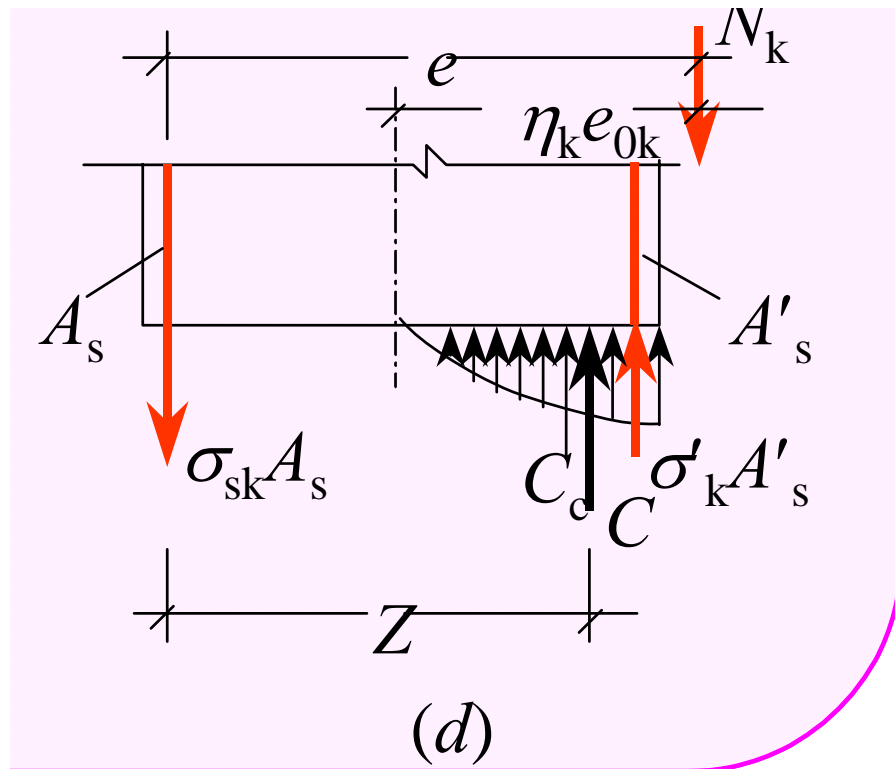
...8-11

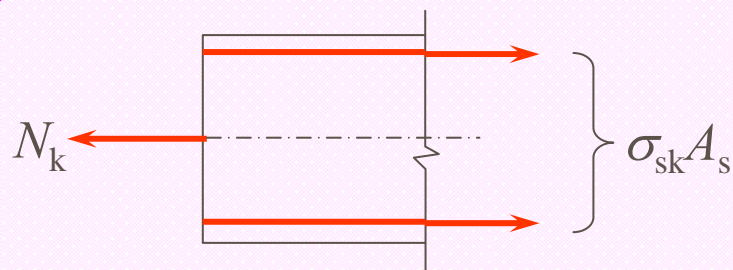
$$z = [0.87 - 0.12(1 - \gamma_f')(\frac{h_0}{e})]h_0$$

$$e = \eta_s e_0 + y_s$$

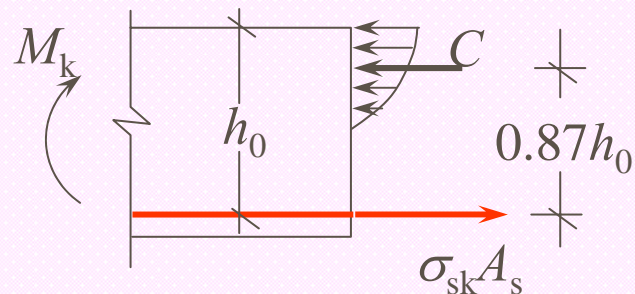
$$\eta_s = 1 + \frac{1}{4000e_0/h_0} (\frac{l_0}{h_0})^2$$

$$\gamma_f' = \frac{(b_f' - b)h_f'}{bh_0}$$

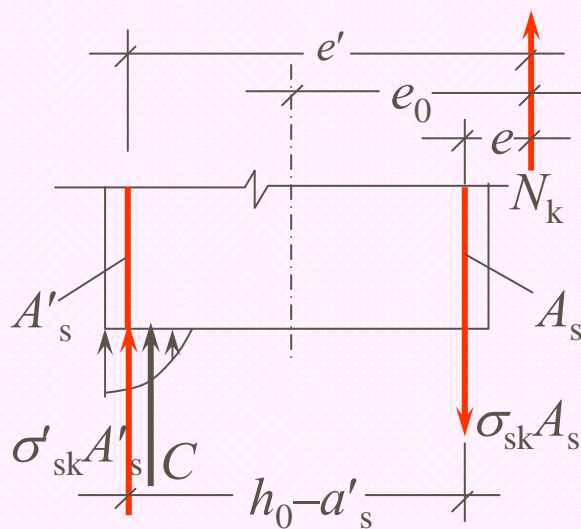




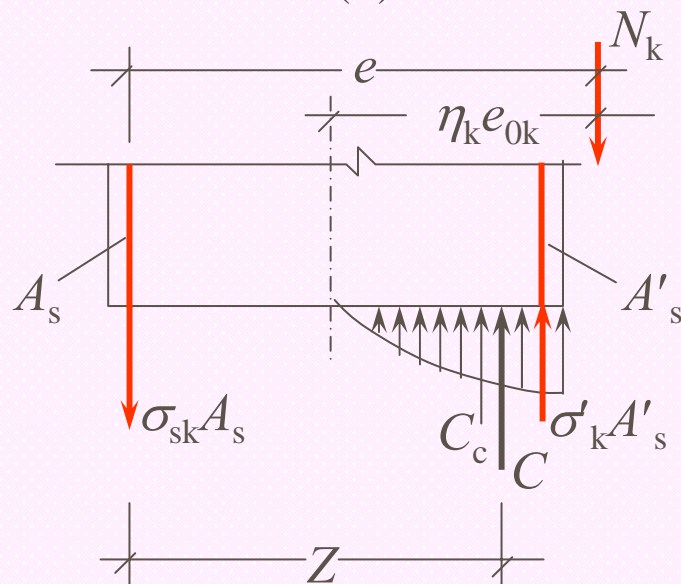
(a)



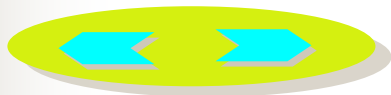
(b)



(c)



(d)





➤ ②裂缝截面处钢筋应力 σ_{sk}

轴心受拉:

$$\sigma_{sk} = \frac{N_k}{A_s}$$

...8-8

受弯:

$$\sigma_{sk} = \frac{M_k}{0.87h_0A_s}$$

...8-9

偏心受拉:

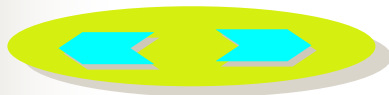
$$\sigma_{sk} = \frac{N_k e'}{A_s (h_0 - a'_s)}$$

...8-10

偏心受压:

$$\sigma_{sk} = \frac{N_k (e - z)}{A_s z}$$

...8-11





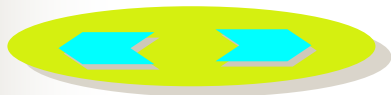
➤ ③钢筋应力不均匀系数 ψ

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

...8-7

$$(0.2 \leq \psi \leq 1.0)$$

- 对直接承受重复荷载的构件， $\psi = 1.0$ 。
- 不均匀系数 ψ 的物理意义：
 - 反映裂缝之间混凝土协助钢筋抗拉工作的程度。





3. 最大裂缝宽度 w_{max}

扩大系数

$$w_{max} = \tau_s \tau_l w_m$$

荷载长期效应裂缝扩大系数

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

...8-4

α_{cr}

构件受力特征系数

轴心受拉

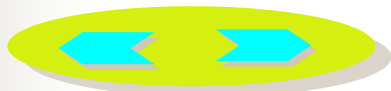
$$\alpha_{cr} = 2.7$$

偏心受拉

$$\alpha_{cr} = 2.4$$

受弯、偏压

$$\alpha_{cr} = 2.1$$





4. JTG D62—2004（桥涵规范）的方法

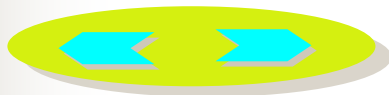
特征裂缝宽度 w_{fk} （保证率为95%）—相当于《混凝土结构设计规范》中的最大裂缝宽度 w_{max}

一般矩形、T形和工字形截面受弯构件：

$$w_{fk} = C_1 C_2 C_3 \frac{\sigma_{ss}}{E_s} \left(\frac{30 + d}{0.28 + \rho} \right) \quad \dots 8-12$$

$$\rho = \frac{A_s}{bh_0 + (b_f - b)h_f} \quad \dots 8-13$$

$$\sigma_{ss} = \frac{M_s}{0.87 A_s h_0} \quad \dots 8-14$$





C_1 ——钢筋表面形状系数，对光面钢筋，

$C_1=1.4$ ；对带肋钢筋， $C_1=1.0$ ；

C_2 ——作用长期效应影响系数， $C_2=1+0.5N_l/N_s$ ，

其中 N_l 和 N_s 分别为按作用长期效应组合和短期效应组合计算的弯矩值或轴力值；

C_3 ——与构件形式有关的系数，当为钢筋混凝土板式受弯构件时， $C_3=1.15$ ，当为其他受弯构件时， $C_3=1.0$ ；

σ_{ss} ——钢筋应力。

$$\sigma_{ss} = \frac{M_s}{0.87 A_s h_0}$$

圆形截面偏心受压构件（略）





8.2.3减小裂缝宽度的措施

当计算裂缝宽度超过裂缝宽度的限值时，从最大裂缝计算公式可知，常见的减小裂缝宽度的措施有：

- 优先选择带肋钢筋；
- 选择直径较小的钢筋；
- 增加钢筋用量。

附表 3-2 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	——



§ 8.3 受弯构件挠度计算

► 变形控制的目的和要求

❖ (1) 保证建筑的使用功能要求

❖ 结构构件产生过大的变形将损害甚至丧失其使用功能。例如，放置精密仪器设备的楼盖梁、板的挠度过大，将使仪器设备难以保持水平；吊车梁的挠度过大会妨碍吊车的正常运行等。

❖ (2) 防止对结构构件产生不良影响

❖ 主要是指防止结构性能与设计中的假定不符。例如，梁端的旋转将使支撑面积减小，支撑反力偏心距增大，当梁支撑在砖墙(或柱)上时，可能使墙体沿梁顶、底出现内外水平缝，严重时将产生局部承压或墙体失稳破坏等。



变形控制的目的和要求

❖ (3) 防止对非结构构件产生不良影响

❖ 这包括防止结构构件变形过大会使门窗等活动部件不能正常开关；防止非结构构件如隔墙及天花板的开裂、压碎或其他形式的破坏等。

❖ (4) 保证人们的感受在接受程度之内

❖ 例如，防止厚度较小板上人后产生过大的颤动或明显下垂引起的不安全感；防止可变荷载（活荷载、风荷载等）引起的振动及噪声对人的不良感觉等。

❖ 随着高强度混凝土和钢筋的采用，构件截面尺寸相应减小，变形问题更为突出。



8.3.1 验算公式

$$a_{f, \max} \leq a_{f, \lim} \quad (8-20)$$

附表 3-1 受弯构件的挠度限值

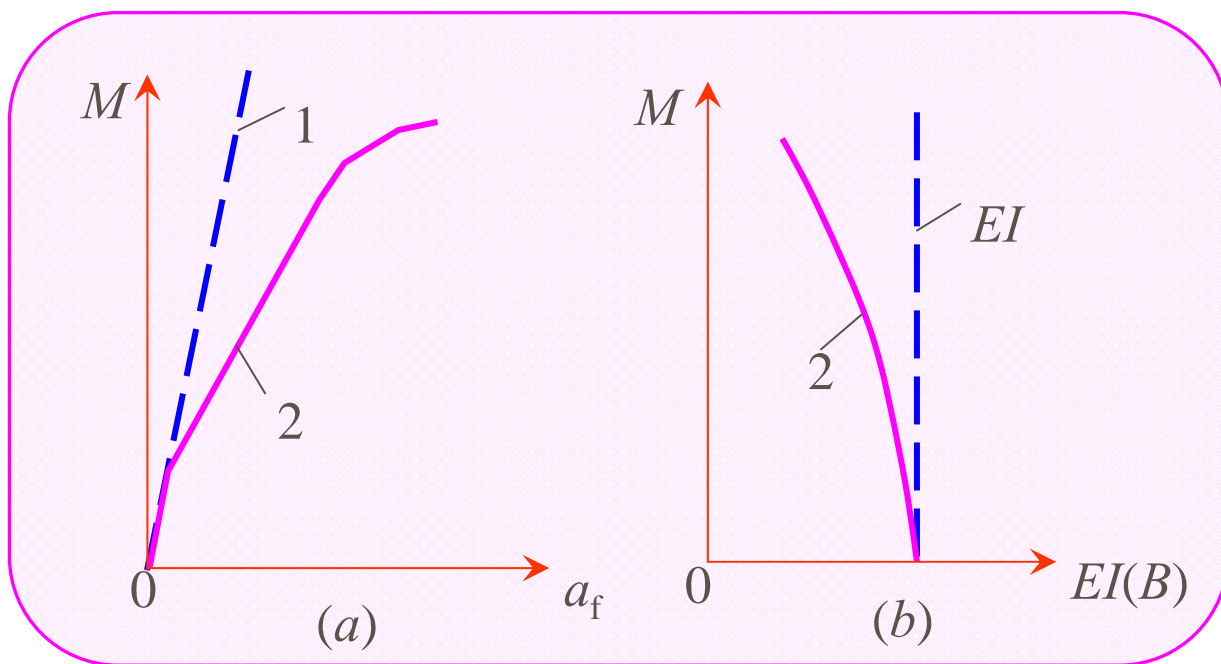
构件类型	挠度限值（以计算跨度 l_0 计算）
吊车梁：手动吊车	$l_0/500$
电动吊车	$l_0/600$
屋盖、楼盖及楼梯构件：	
当 $l_0 \leq 7\text{m}$ 时	$l_0/200(l_0/250)$
当 $7\text{m} \leq l_0 \leq 9\text{m}$ 时	$l_0/250(l_0/300)$
当 $l_0 > 9\text{m}$ 时	$l_0/300(l_0/400)$

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。



8.3.2 $a_{f, \max}$ 计算方法

钢筋混凝土梁的挠度与弯矩的关系是非线性的。



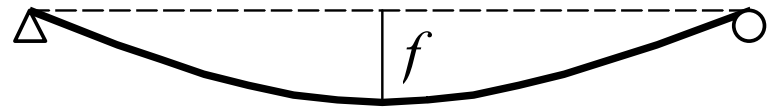
1——线性； 2——非线性。



用材料力学的公式：

对于简支梁承受**均布荷载**作用时，其跨中挠度：

$$\alpha_f = \frac{5(g_k + q_k)l_0^4}{384EI}$$



B_s —— 荷载效应标准组合下的受弯构件的短期刚度

B —— 按荷载效应标准组合并考虑荷载长期作用影响的抗弯刚度

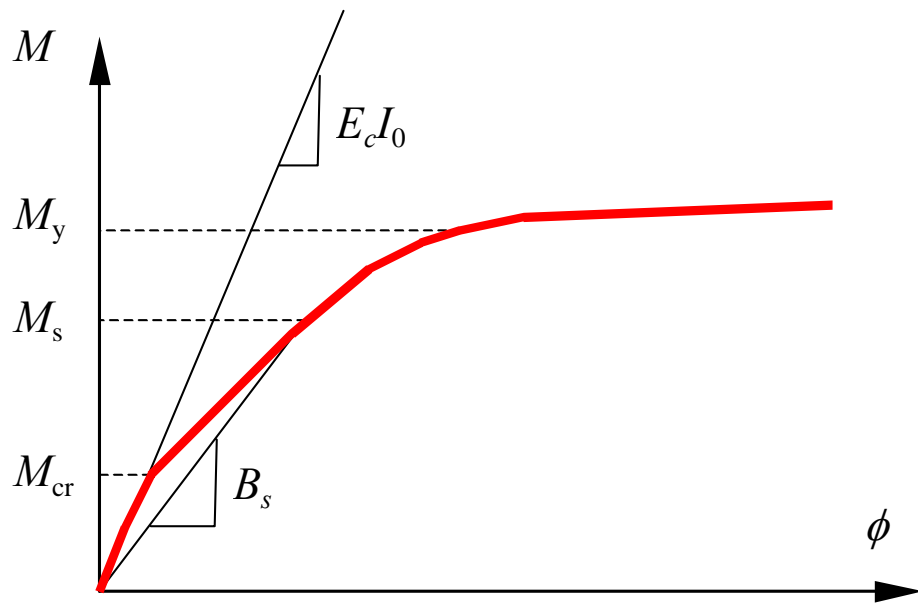
$$\alpha_f = \frac{5(g_k + q_k)l_0^4}{384B} \text{ —— 钢筋混凝土梁的挠度计算}$$

$$\text{集中荷载: } f = \frac{1}{48} \cdot \frac{Pl^3}{B} = \frac{1}{12} \cdot \frac{Ml^2}{B}$$



1. 短期刚度 B_s 的计算

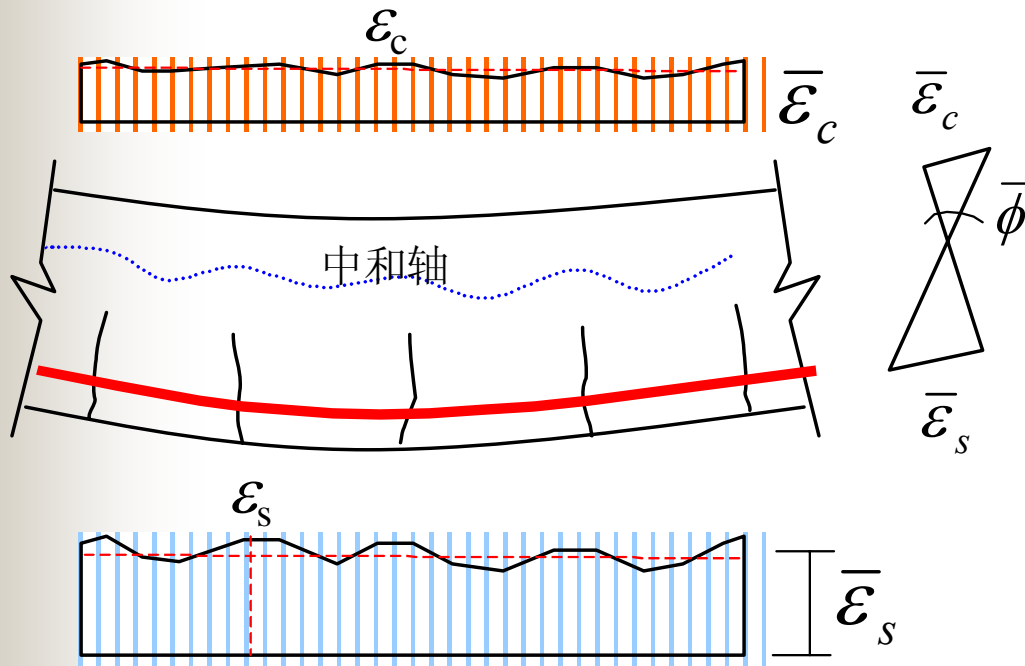
由于混凝土开裂、弹塑性应力-应变关系和钢筋屈服等影响，**钢筋混凝土适筋梁的 $M-\phi$ 关系不再是直线**，而是随弯矩增大，截面曲率呈曲线变化。



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：



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

$$B_s = \frac{M_s}{\bar{\phi}}$$

$$\psi_c = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s}$$

$$\psi = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s}$$



刚度公式的建立的思路

➤ 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

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

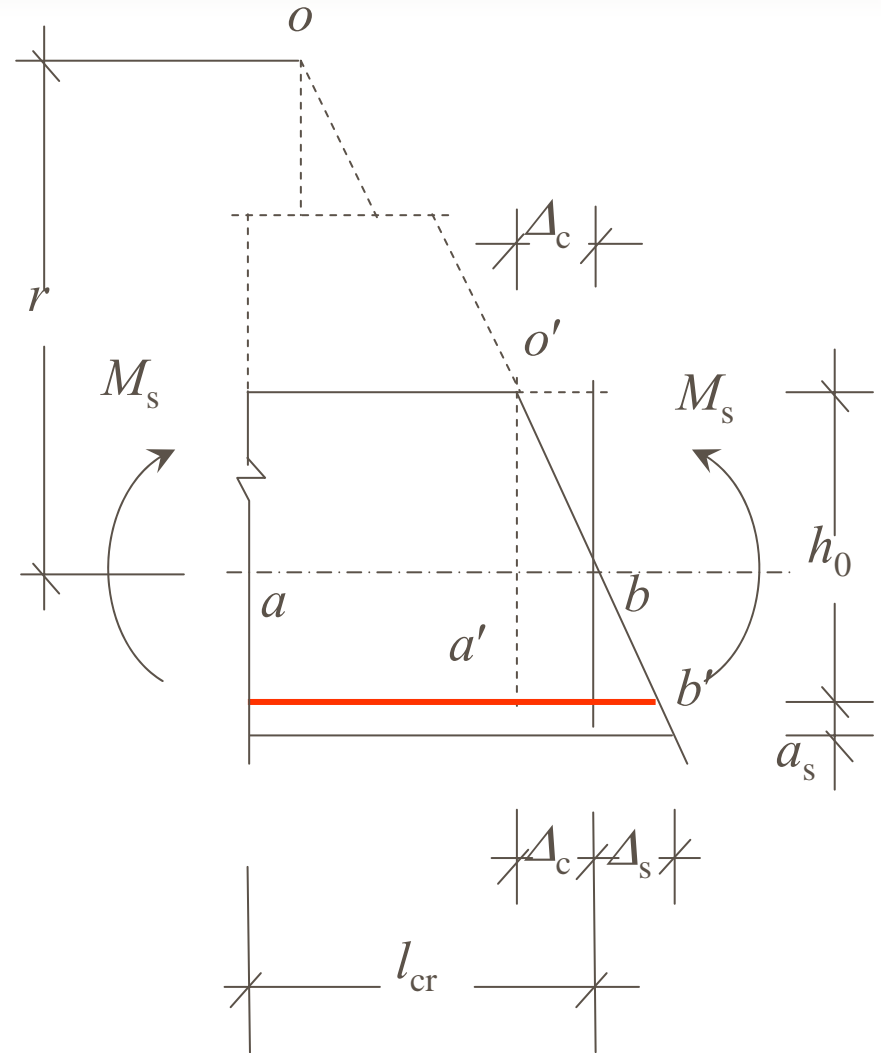
平衡关系

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



(1)几何关系:

$$\frac{1}{r} = \bar{\phi} = \frac{\bar{\epsilon}_s + \bar{\epsilon}_c}{h_0}$$





(1)几何关系:

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

(2)物理关系:

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

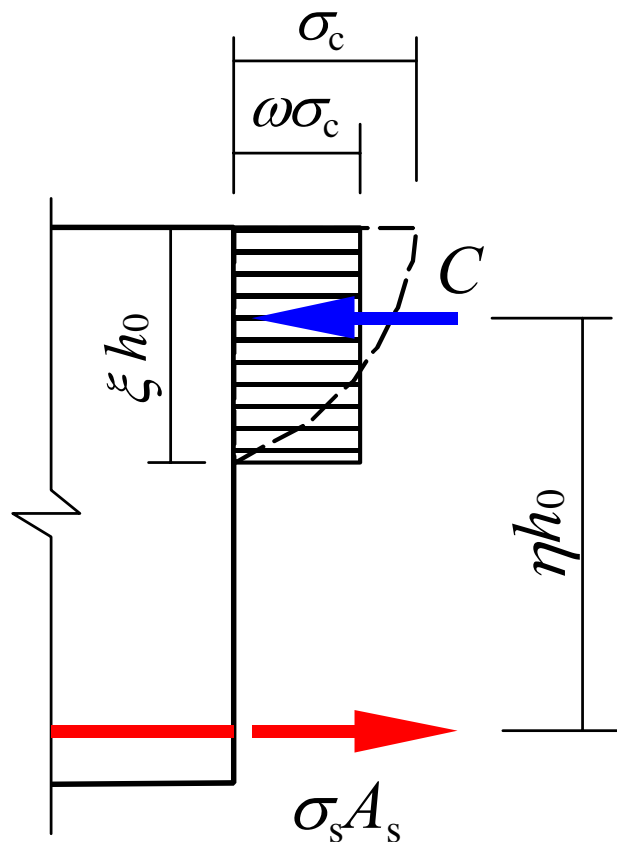
(3)平衡关系: 根据裂缝截面的应力分布

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

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

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

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





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

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

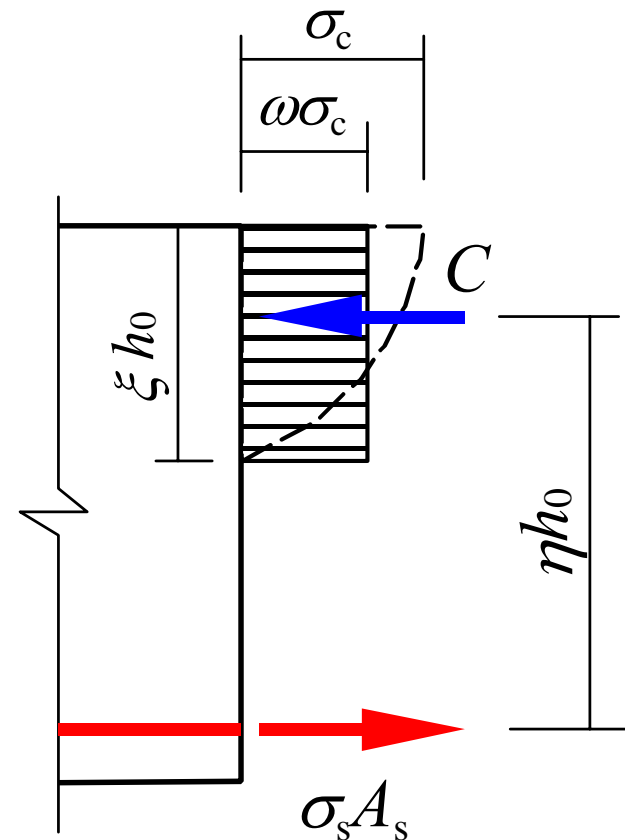
(3)平衡关系: 根据裂缝截面的应力分布

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

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

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

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





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

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

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

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



1. 短期刚度 B_s 的计算

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

● 关于参数 η 、 ζ 和 ψ

1) 开裂截面的内力臂系数 η

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。对常用的混凝土强度和配筋情况， 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

根据试验实测受压边缘混凝土的压应变，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。



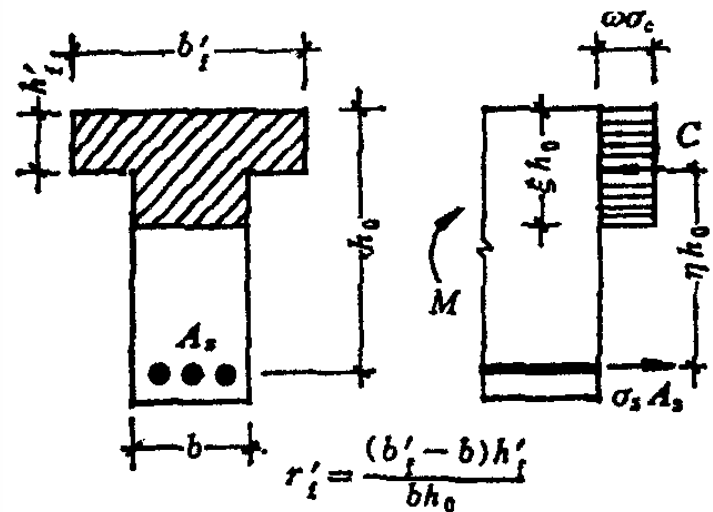
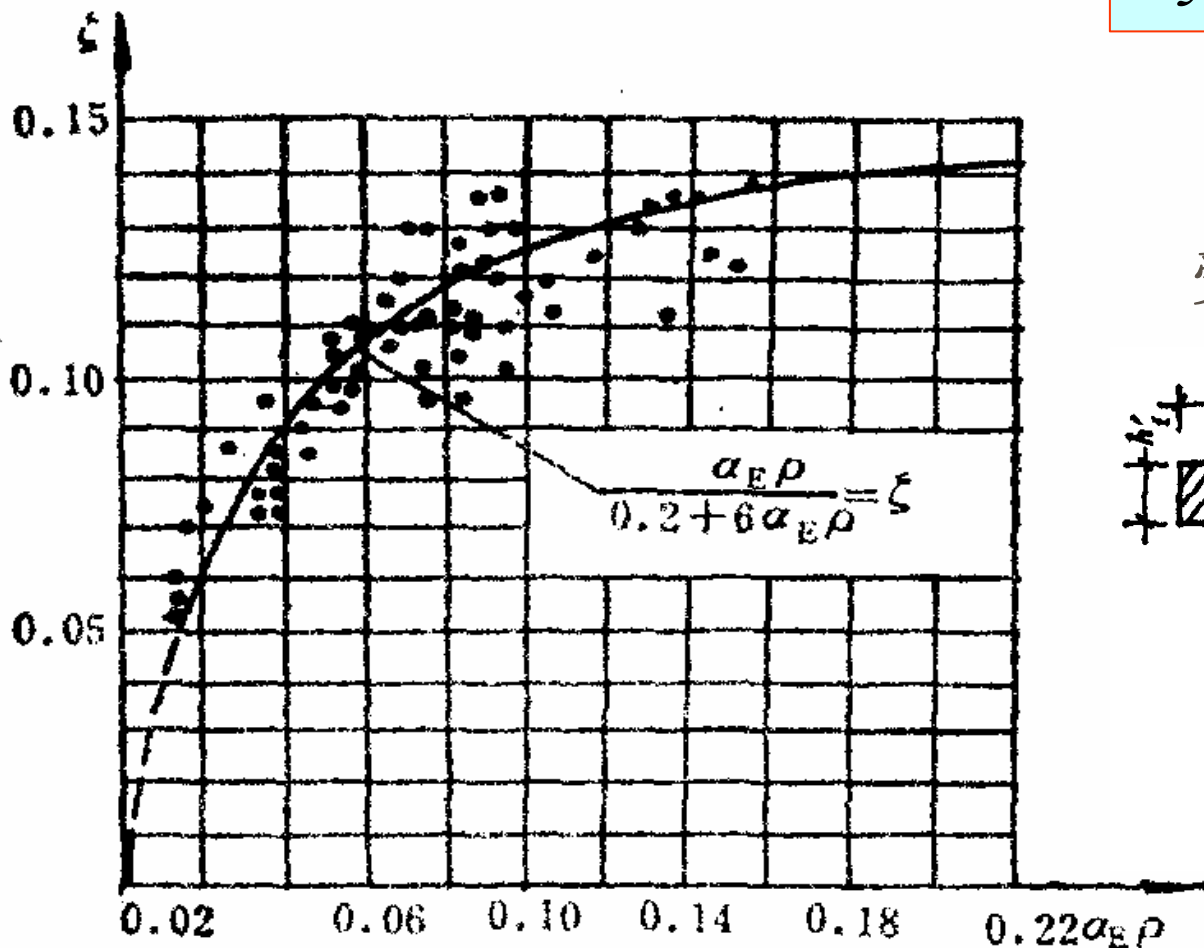
2) 受压区边缘混凝土平均应变综合系数 ζ

《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

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

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

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

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 $\psi = 1.0$ 。

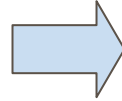
ρ_{te} 为以有效受拉混凝土截面面积计算的受拉钢筋配筋率。

A_{te} 为有效受拉混凝土截面面积，对受弯构件取

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



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



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

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

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。



1. 短期刚度 B_s 的计算

$$\frac{M}{EI} = \frac{1}{r} \quad EI = \frac{M}{\frac{1}{r}}$$

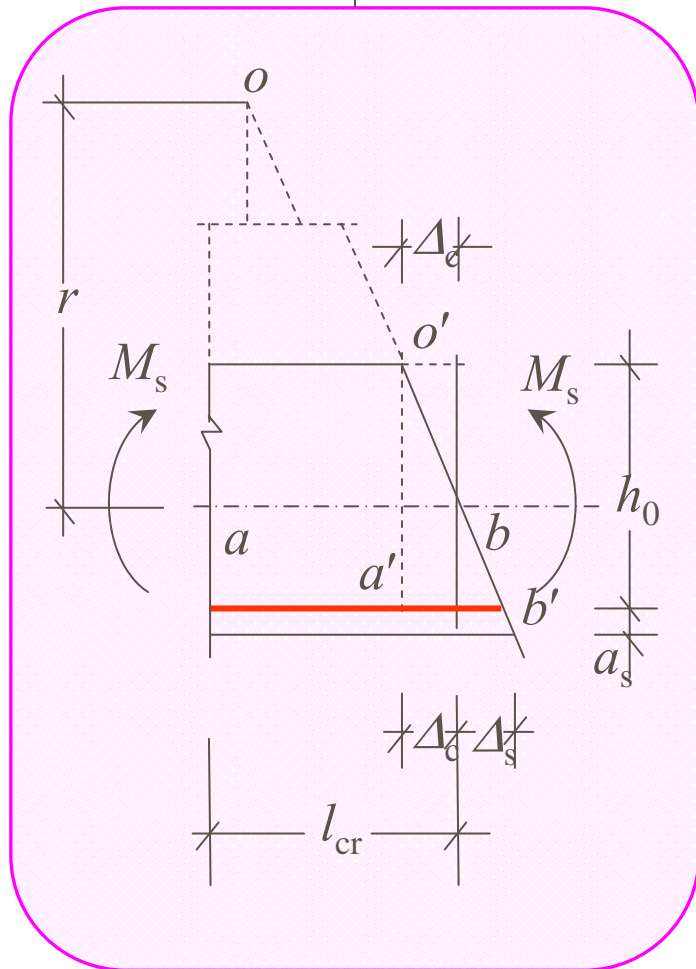
$$\left\{ \begin{aligned} \frac{1}{r} &= \frac{\varepsilon_{cm} + \varepsilon_{sm}}{h_0} \\ \frac{1}{r} &= \frac{M_s}{B_s} \end{aligned} \right. \quad \leftarrow \text{相似三角形}$$

$$\varepsilon_{cm} = \frac{M_s}{\zeta b h_0^2 E_c} \quad \varepsilon_{sm} = \psi \frac{M_s}{\eta h_0 A_s E_s}$$

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

...8-31

式中: $r'_f = \frac{(b'_f - b)h'_f}{bh_0}$





2. 长期刚度 B 的计算

在长期荷载作用下，由于混凝土的徐变，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 可按下式计算：

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

$$a_f = \theta \cdot \alpha \frac{M_q}{B_s} l^2 + \alpha \frac{(M_k - M_q)}{B_s} l^2 \Rightarrow a_f = \alpha \frac{M_k}{B} l^2$$



2. 长期刚度 B 的计算

$$a_f = \alpha \frac{M_q l^2}{B_s} \cdot \theta + \alpha \frac{(M_k - M_q) l^2}{B_s}$$

将弯矩分成两部分：

$$M_q + (M_k - M_q)$$

产生随时间增大的挠度

产生短期的挠度

$$a_f = \alpha \frac{[M_q \theta + (M_k - M_q)] l^2}{B_s} = \alpha \frac{[M_q (\theta - 1) + M_k] l^2}{B_s}$$

$$= \alpha \left[\frac{M_k}{M_q (\theta - 1) + M_k} \right] B_s$$

B



$$B = \frac{M_k}{M_q(\theta - 1) + M_k} B_s \quad \dots 8-33$$

M_k ——荷载效应标准组合计算的弯矩值；

M_q ——荷载效应准永久组合计算的弯矩值；

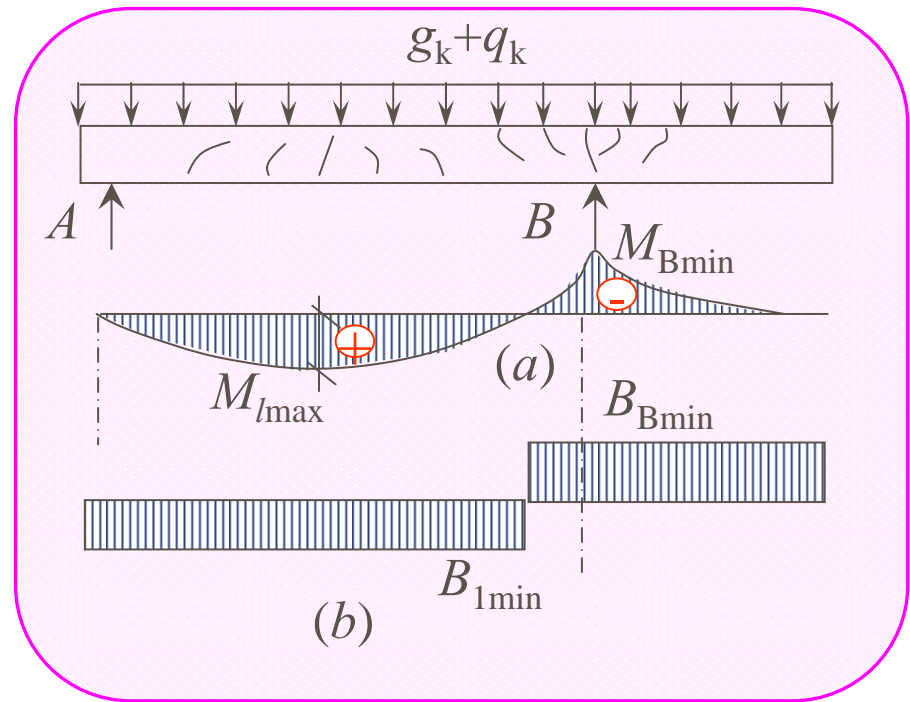
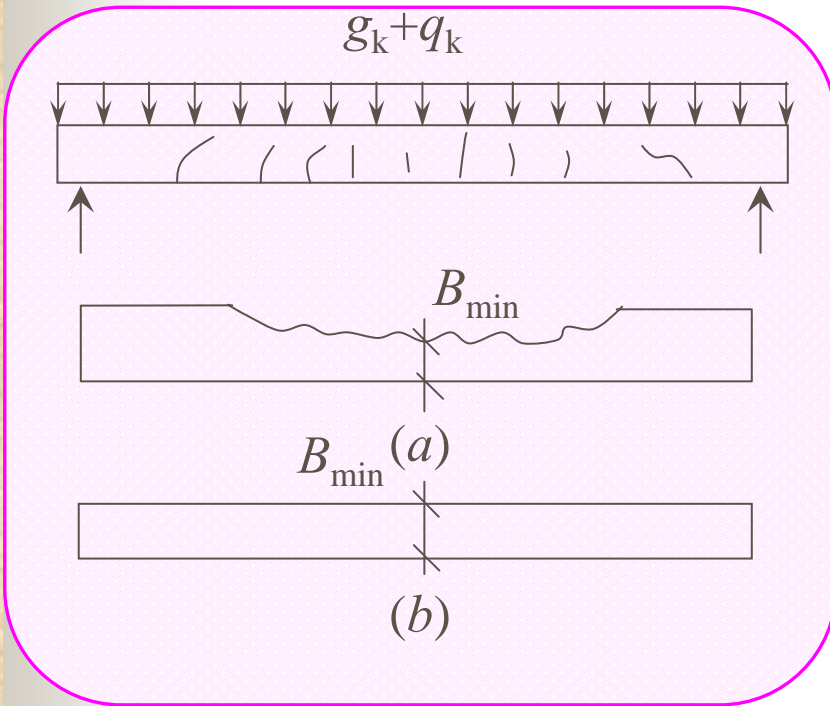
θ ——挠度增大系数， $\theta = 2.0 - 0.4\rho' / \rho$ ；

B_s ——短期刚度按式(8-31)计算。



3. 最小刚度原则

- ❖ 受弯构件在正常使用状态下，沿长度方向的刚度是变化的。
- ❖ 取同一弯矩符号区段内的最小刚度作为等刚度，按材料力学的方法计算。





❖ 提高刚度的有效措施 $h_0 \uparrow$

❖ 或 $A_s \uparrow$ 增加 ρ'

4. 图表法

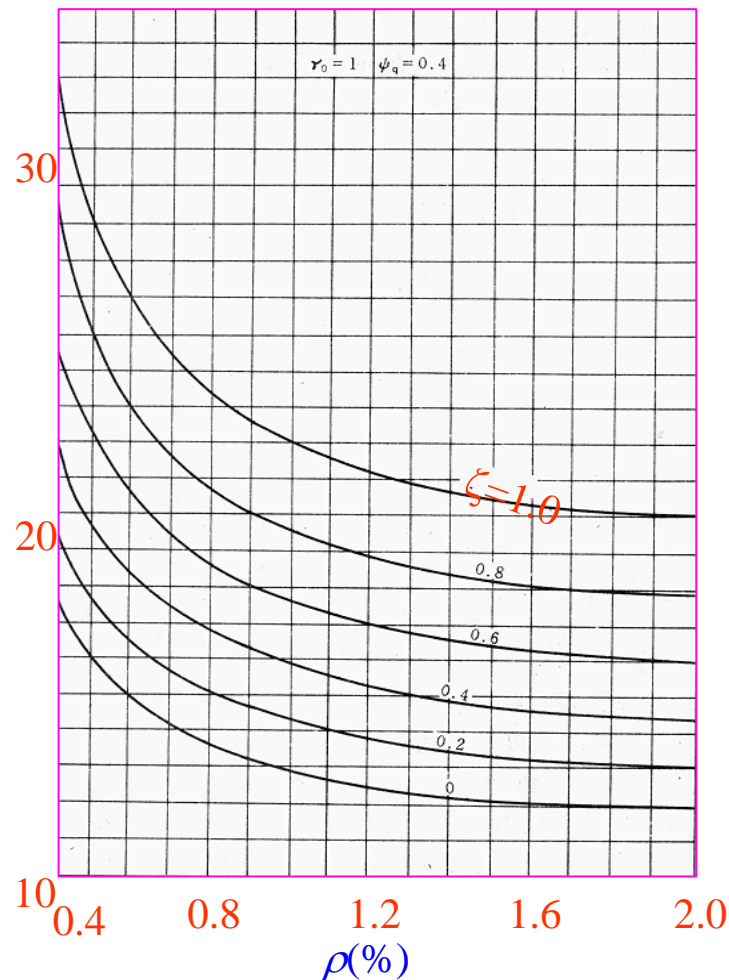
$$\zeta = 1 - M_{Gk} / M_k$$

M_{Gk} —— 永久荷载标准值产生的弯矩

M_k —— 荷载短期效应组合产生的弯矩

❖ 实际上是限制跨高比 l_0/h_0 。

l_0/h_0





5. JTG D62—2004（桥涵规范）的方法

公路桥涵钢筋混凝土受弯构件,在正常使用状态下的挠度,可根据给定的构件用结构力学的方法计算。

受弯构件的刚度可按下式计算:

$$B = \frac{B_0}{\left(\frac{M_{cr}}{M_s}\right)^2 + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_s}\right)^2\right] \frac{B_0}{B_{cr}}} \quad \dots 8-17$$

$$M_{cr} = \gamma f_{tk} W_0 \quad \dots 8-18$$



式中：

B ——开裂构件等效截面的抗弯刚度；

B_0 ——全截面的抗弯刚度， $B_0=0.95 E_c I_0$ ；

B_{cr} ——开裂截面的抗弯刚度， $B_{cr}=E_c I_{cr}$ ；

M_{cr} ——开裂弯矩；

γ ——构件受拉区混凝土塑性影响系数， $\gamma=2S_0/W_0$ ；

S_0 ——全截面换算截面重心轴以上（或以下）部分对面积重心轴的面积矩；

W_0 ——换算截面抗裂验算边缘的弹性抵抗矩；

I_0 ——全截面换算截面惯性矩；

I_{cr} ——开裂截面换算截面惯性矩。



§ 8.4

耐久性设计

- ◆ 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。



§ 8.4 耐久性设计

- ◆ 对于一般建筑结构，设计工作寿命为**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寿命提出更高要求。对于其它土木工程结构，根据其功能要求，设计工作寿命也有差别，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

§ 8.4 耐久性设计

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



§ 8.4 耐久性设计

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。

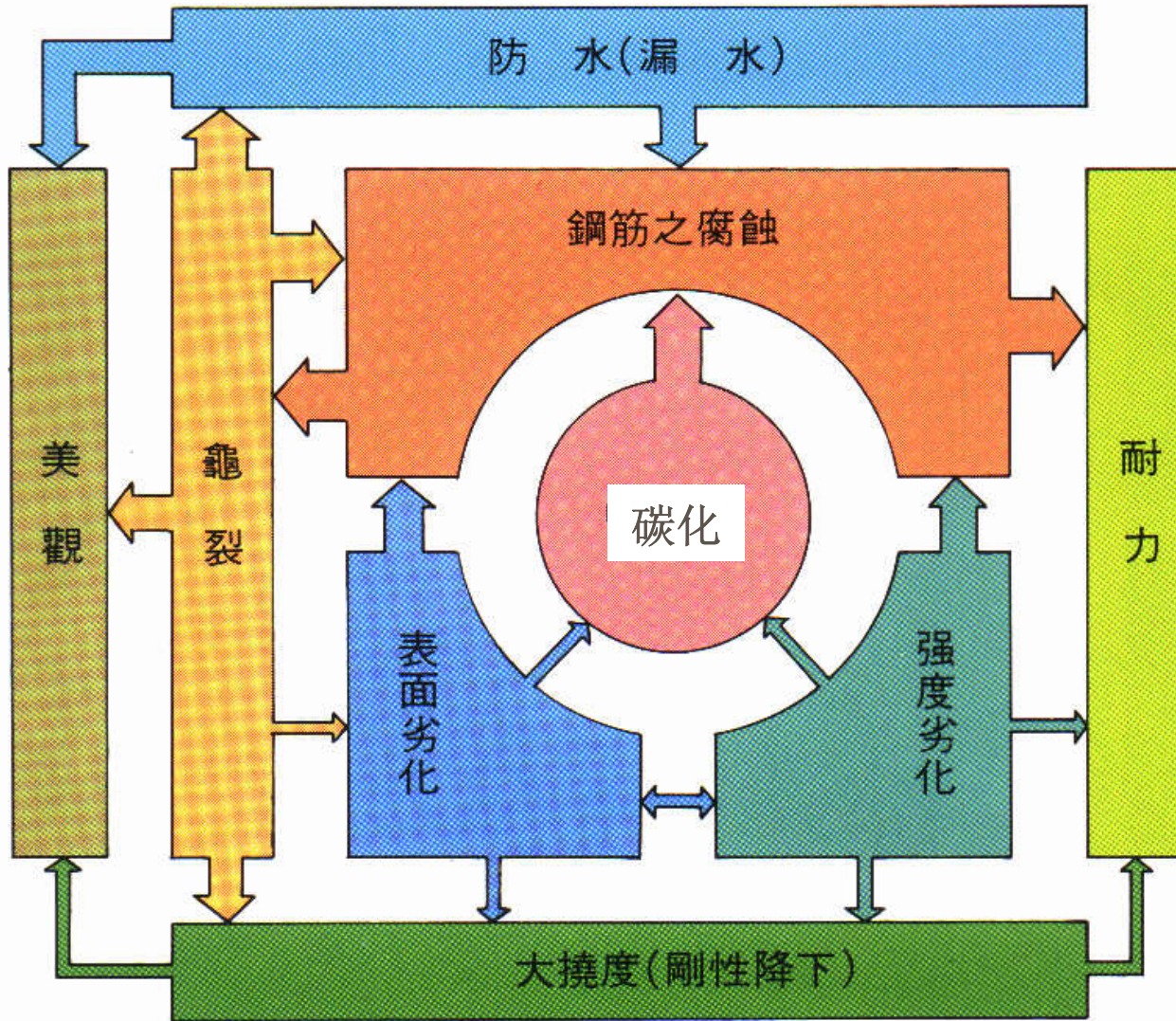
目前经济发达国家处于第三阶段，结构因耐久性不足而失效，或为保证继续正常使用而付出巨大维修代价，这使得耐久性问题变得十分重要。

§ 8.4

耐久性设计

- 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。

8.4.1 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
 CO_2 含量
 侵蚀性介质等

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SO₂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CO₂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、侵蚀性介质的腐蚀

(1)硫酸盐腐蚀

(2)酸腐蚀

(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

—成都理工大学—





骆驼城乡
碱泉村
JIAN QUAN CUN

张掖一墙面

成都理工大学



张掖—高架桥墩

—成都理工大学—



青海化工厂一桥柱

—成都理工大学—



青海化工厂—桥面护栏

—成都理工大学—



桥柱

—成都理工大学—



沈阳—山海关高速公路路缘石

—成都理工大学—



沈阳—山海关掺入硅灰、减水剂、超细粉煤灰的路缘



沈阳—山海关高速公路冬季撤盐

成都理工大学



4、混凝土的碳化

- ◆ **混凝土中碱性物质** ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 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**CO₂浓度**和向混凝土中的**扩散速度**。空气中的CO₂浓度大，混凝土内外CO₂浓度梯度也愈大，因而CO₂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CO₂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CO₂向混凝土内的扩散速度也越快。

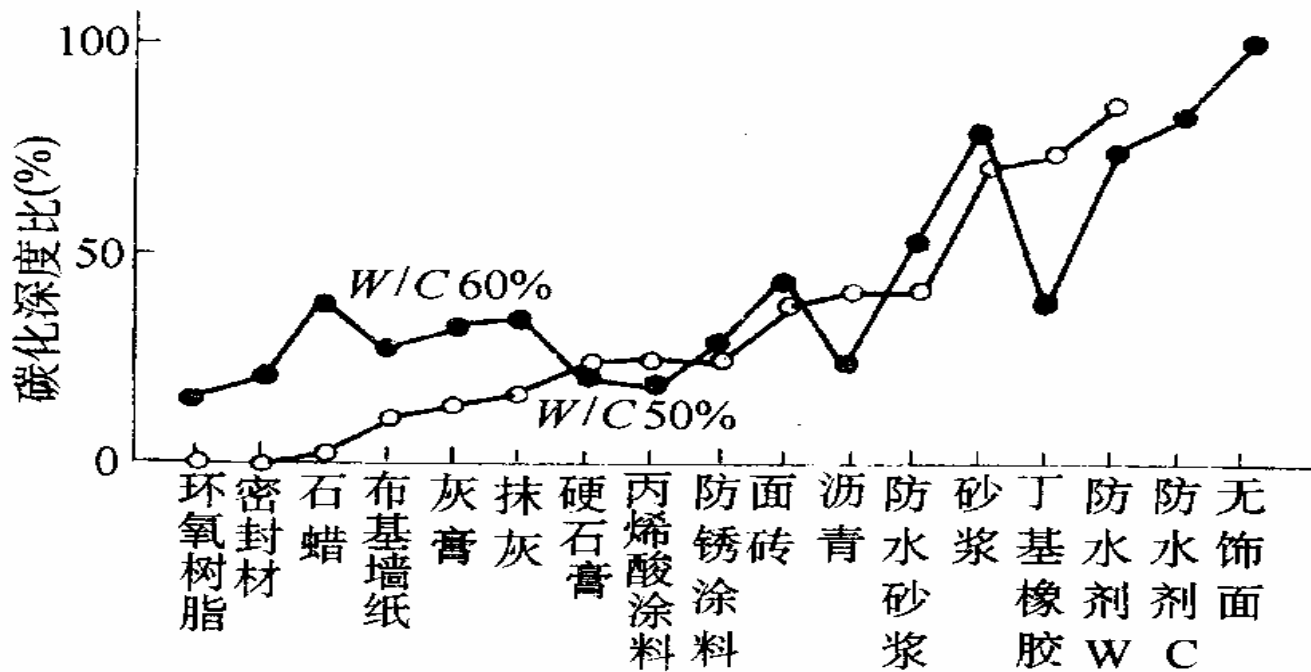
[2] 材料因素

- ◆ 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。

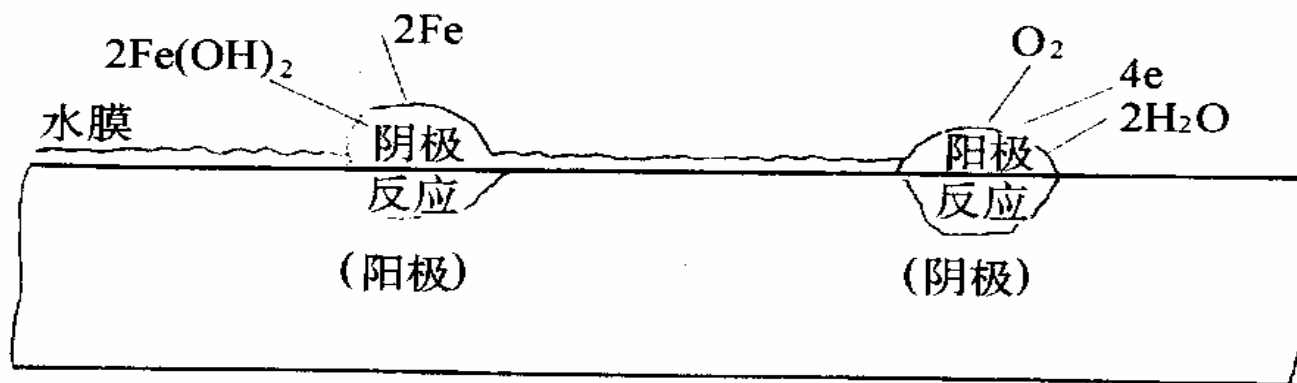
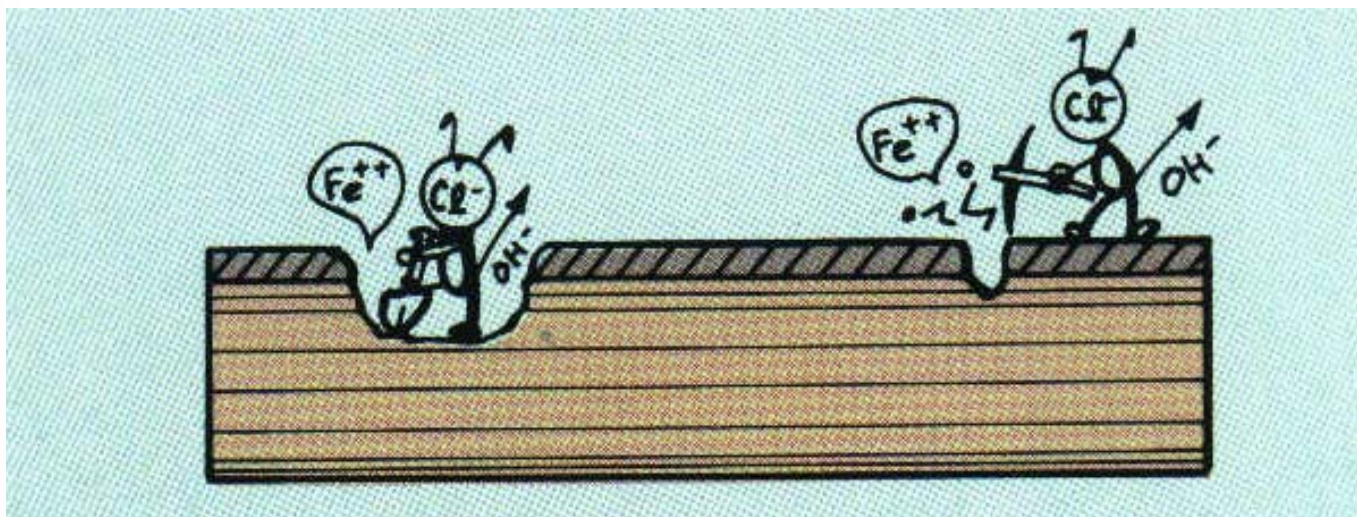
[4] 覆盖层



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过程。
- ◆ **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**。

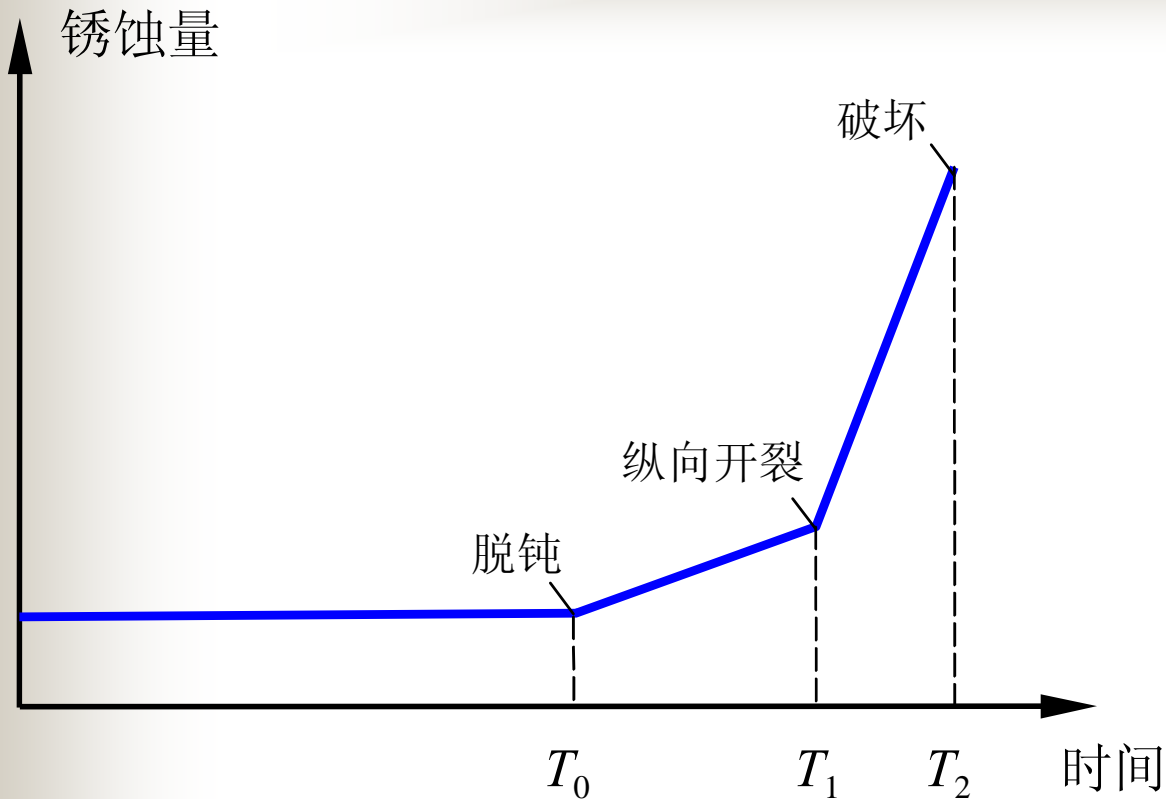
钢筋锈蚀引起混凝土结构损伤过程如下，首先在裂缝宽度较大处发生个别点的“**坑蚀**”，继而逐渐形成“**环蚀**”，同时向裂缝两边扩展，形成锈蚀面，使钢筋有效面积减小。严重锈蚀时，会导致**沿钢筋长度出现纵向裂缝**，甚至导致混凝土保护层脱落，习称“**暴筋**”，从而导致截面承载力下降，直至最终引起结构破坏。



钢筋锈蚀



Carbonation



面积减小
屈服强度降低
粘结力降低

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。

8.4.2 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。

8.4.2 结构工作环境类别

《规范》中，提出把结构工作环境分为五大类：

表 8-1 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

8.4.3 结构耐久性等级

耐久性设计的目标是要保证结构的使用年限，也称为设计使用寿命。

我国设计标准的设计基准期为50年，它与设计使用寿命不完全相同。

设计使用寿命和结构的重要性有关。

按照我国的实际情况，把设计使用年限等级分为四级：

I 级	特别重要建筑结构	设计使用年限 ≥ 100 年
II 级	一般建筑结构	设计使用年限 50 年
III 级	易于替换的结构构件	设计使用年限 25 年
IV 级	临时性建筑结构	设计使用年限 5 年

8.4.4 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。

8.4.4 保证耐久性的措施

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。

8.4.4 保证耐久性的措施

表 8-3 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。

8.4.4 保证耐久性的措施

表 8-4 混凝土中的碱含量限值 (kg/m^3)

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。

8.4.4 保证耐久性的措施

[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

二级：一般要求不出现裂缝的构件

三级：允许出现裂缝的构件

8.4.4 保证耐久性的措施

[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**。