

第九章 混凝土构件的变形、 裂缝及混凝土结构的耐久性

内蒙古科技大学建筑与土木工程学院

概 述

第三章已提到结构的极限状态分为两类：

承载能力极限状态

结构或构件达到最大承载力或者不适于继续承载的过大变形

（雨篷倾覆、烟囱抗风不足而倾倒、轴压构件中混凝土达到材料强度、细长杆达到临界荷载后失稳、构件三铰共线丧失承载能力）。

超过该极限状态，结构就不能满足预定的安全性要求。

- ◆对各类结构构件都要求按承载能力极限状态计算。
- ◆采用荷载设计值及材料强度的设计值。

正常使用极限状态

结构或构件达到影响正常使用或耐久性能的某项规定限值。
产生了较大的变形，影响正常使用和外观。

（吊车梁变形过大致使吊车不能正常行驶，梁挠度过大）

产生了过宽的裂缝，对耐久性有影响或给人不安全感。

（水池池壁开裂漏水不能正常使用、裂缝过宽导致钢筋锈蚀）

产生过大的振动，影响使用。

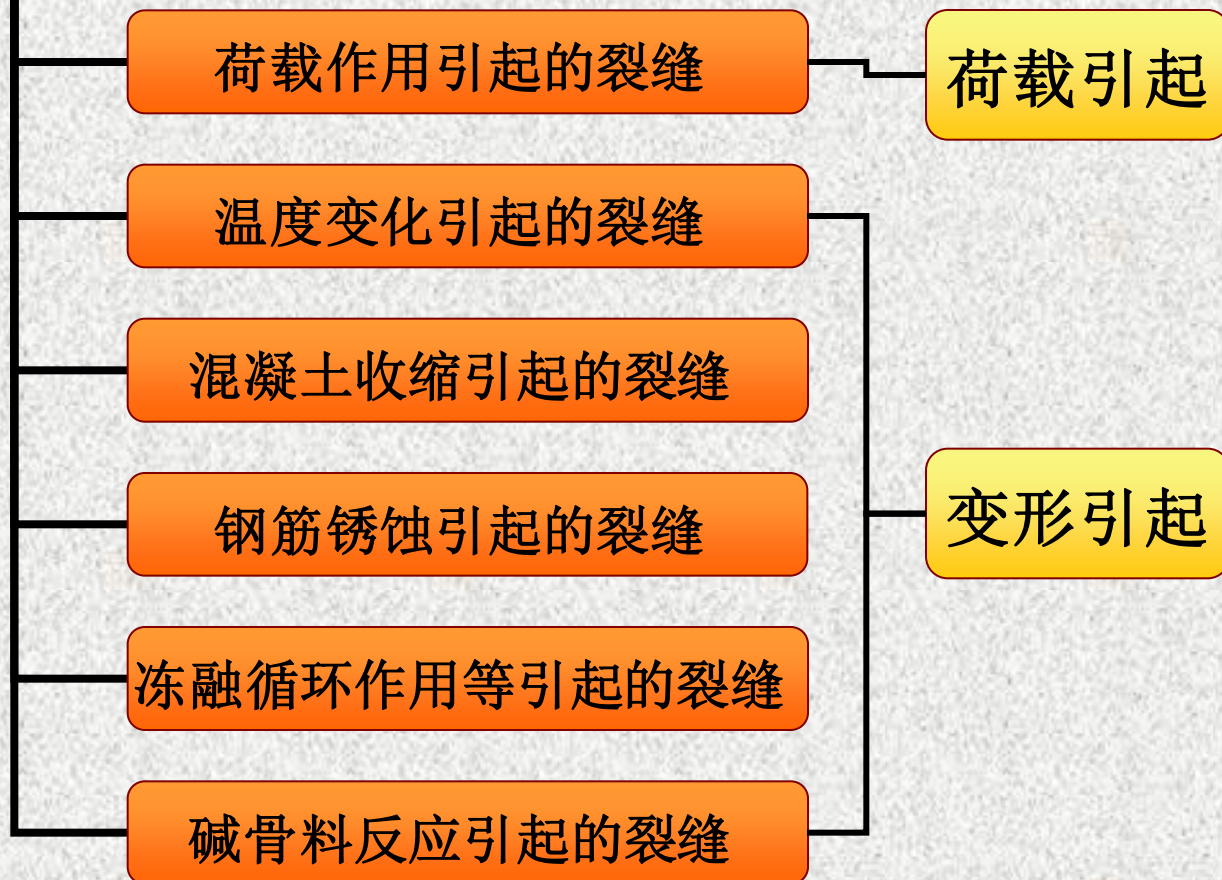
（由于机器振动导致结构的振幅超过正常使用要求规定限值）

超过该极限状态，结构就不能满足预定的适用性和耐久性要求。

◆对结构构件还应按正常使用极限状态校核。

9.2.1 裂缝的成因

裂缝按成因分类

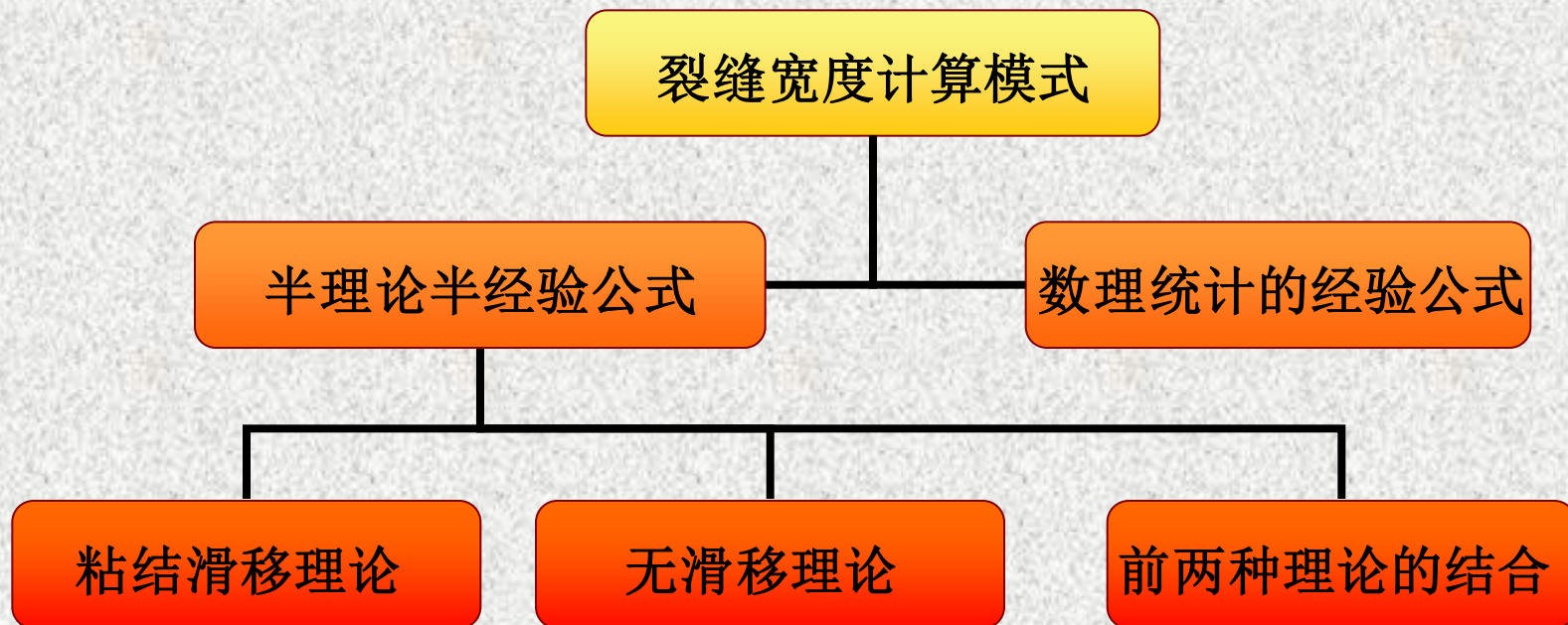


9.2.2 裂缝控制目的和要求

- 裂缝控制的目的
 - 使用功能的要求
 - 建筑外观的要求
 - 耐久性的要求
 - 《混凝土结构设计规范》对荷载作用下正截面裂缝的控制要求
 - 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
 - 按荷载标准组合时，构件受拉边缘混凝土拉应力不应大于混凝土轴心抗拉强度标准值；
 - 三级：允许出现裂缝的构件
 - 对钢筋混凝土构件，按荷载准永久组合并考虑长期作用影响计算时，构件的最大裂缝宽度不应超过规定的最大裂缝宽度限值。
 - 对预应力混凝土构件，按荷载标准组合并考虑长期作用影响计算时，
- 9.2 裂缝宽度验算

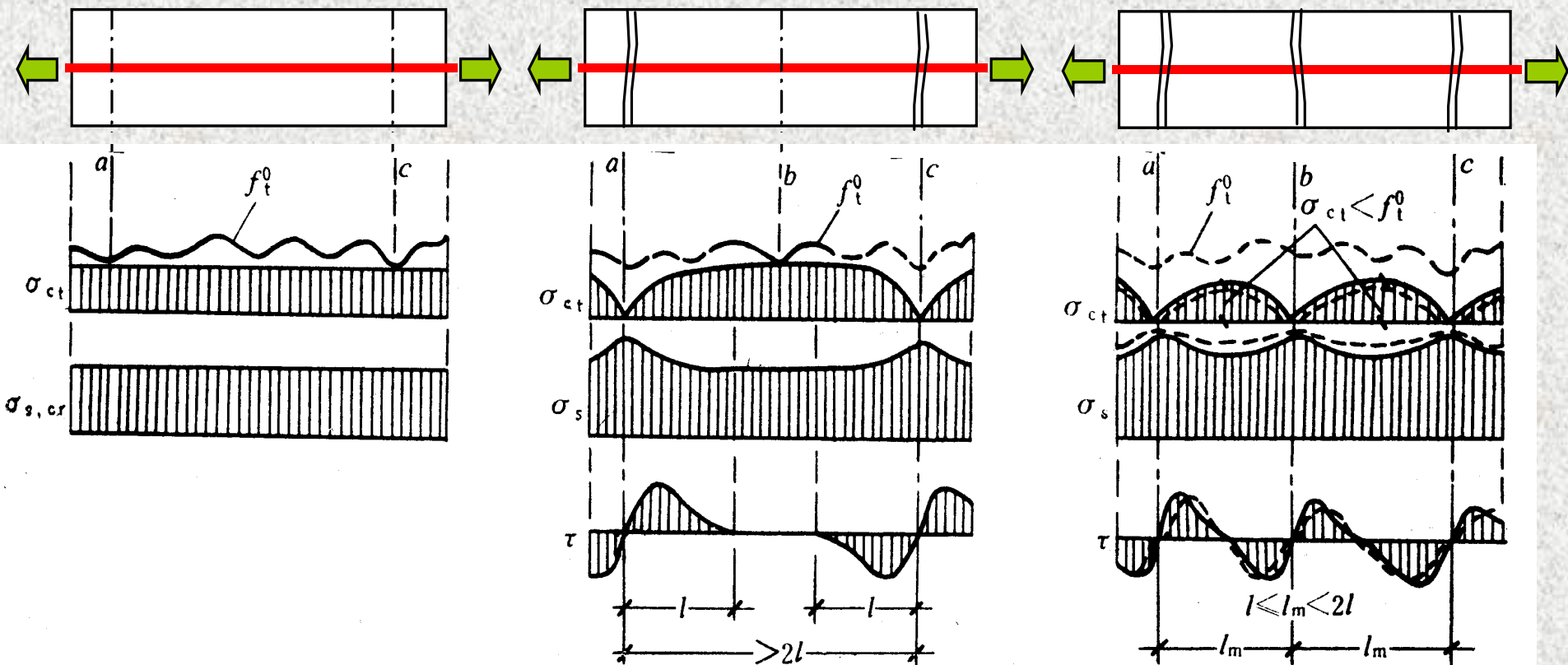
9.2.3 裂缝的计算模式

■ 裂缝宽度计算模式



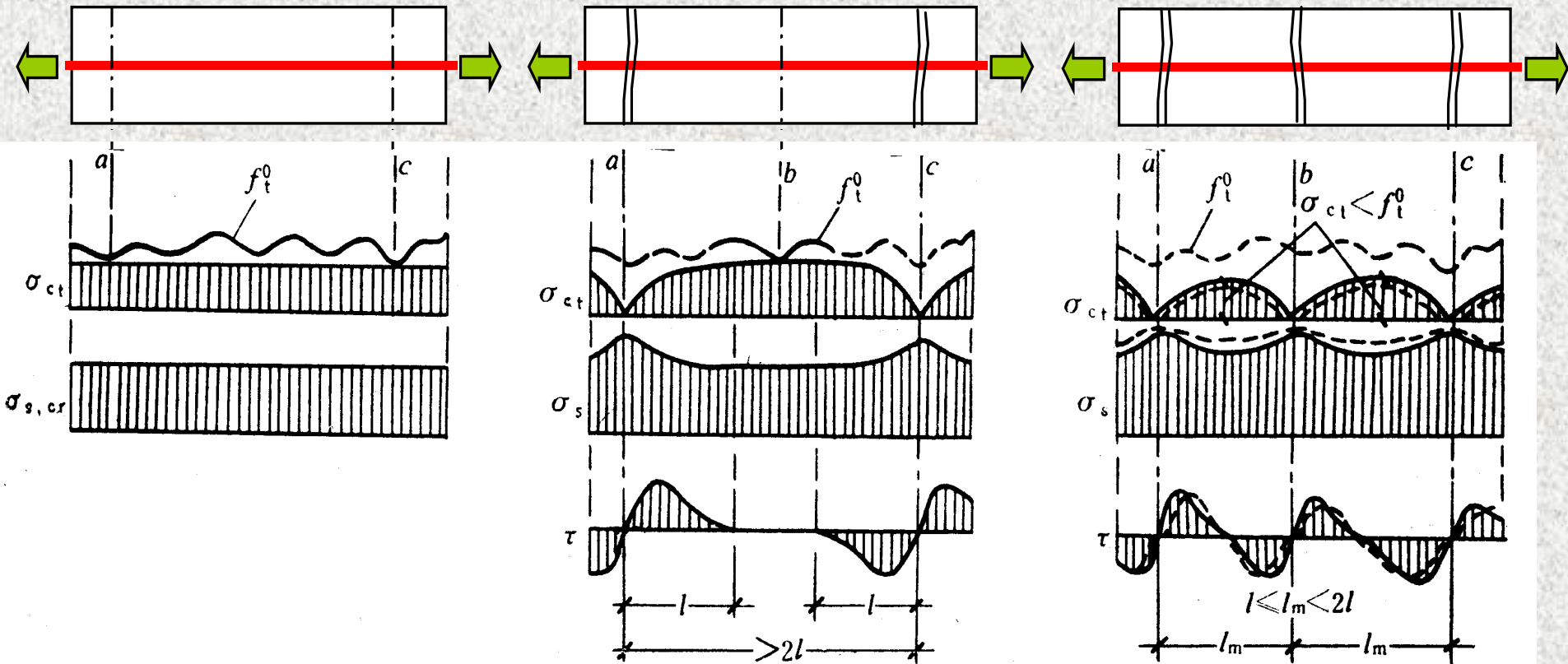
- 我国《混凝土结构设计规范》提出的裂缝宽度计算公式主要以粘结滑移理论为基础，同时也考虑了混凝土保护层厚度及钢筋约束区的影响。

9.2.4 裂缝的出现和开展过程



- 构件未开裂前，钢筋和混凝土变形相同，应力沿构件轴线均匀分布；
- 当轴向拉力增加到开裂轴力时，在**某一薄弱截面A处**首先开裂。
- 在裂缝截面处，混凝土退出工作，钢筋的应力突增。原来张紧的混凝土向裂缝两侧回缩，混凝土与钢筋之间有相对滑移和**粘结应力**。

9.2.4 裂缝的出现和开展过程



- 通过粘结应力的作用，钢筋拉应力逐渐传递给混凝土而减小，混凝土拉应力由0逐渐增大，当达到距裂缝截面A某一距离 l_{cr} 的截面B时，混凝土应力有达到其抗拉强度，荷载略有增加，在B截面处会出现新的裂缝。

9.2.5 平均裂缝间距

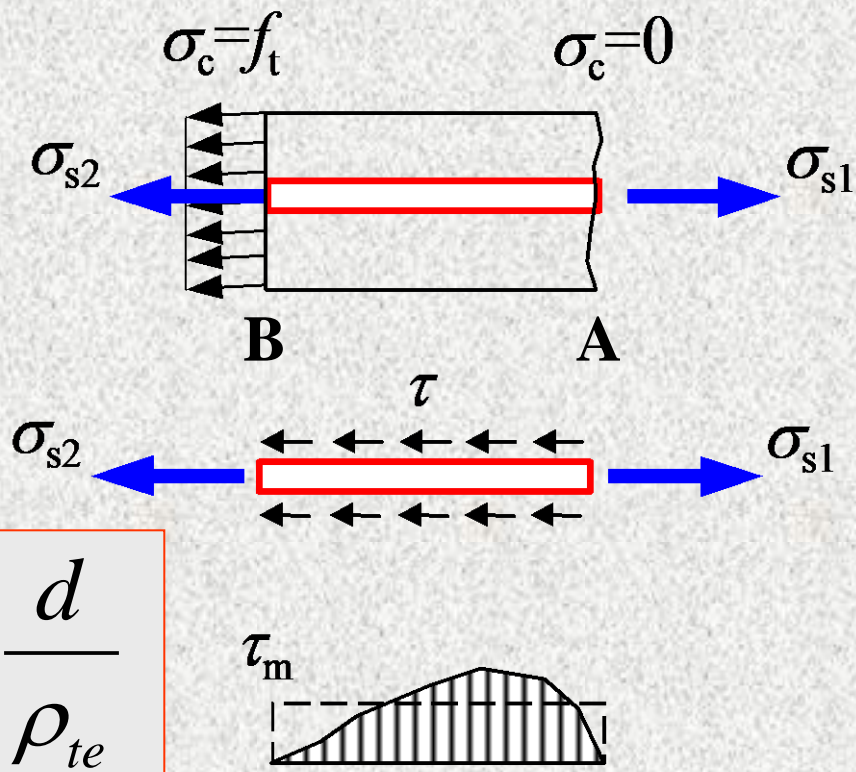
$$\sigma_{s1} A_s = \sigma_{s2} A_s + f_t A_c$$

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

$$l = \frac{f_t A_{te}}{\tau_m u} = \frac{f_t A_{te}}{\tau_m \cdot \pi d} = \frac{1}{4} \cdot \frac{f_t}{\tau_m} \cdot \frac{d}{\rho_{te}}$$



$$l_m = 1.9c_s + 0.08 \cdot \frac{d_{eq}}{\rho_{te}}$$



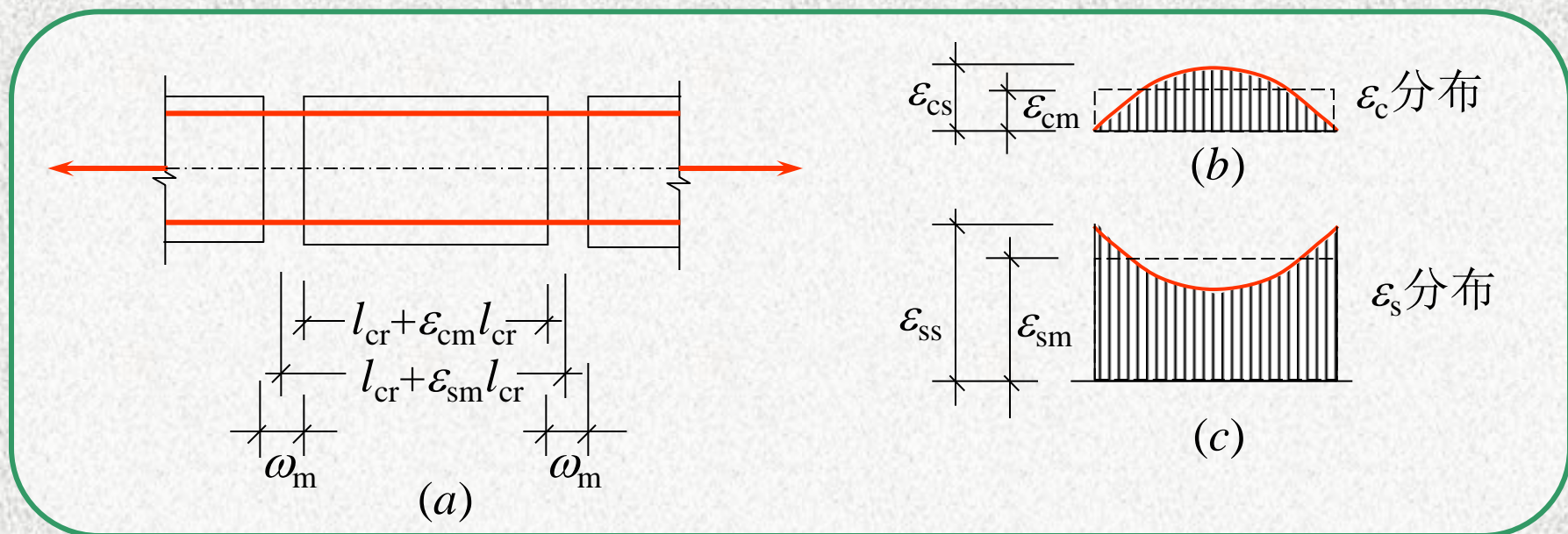
考虑到钢筋表面粗糙情况对粘结力的影响

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

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

9.2.6 平均裂缝宽度

原因：裂缝宽度是由于钢筋与混凝土间出现相对滑移，引起混凝土回缩而产生的。



按粘结滑移理论，平均裂缝宽度是指纵向受拉钢筋重心水平处构件侧表面的裂缝宽度；

平均裂缝宽度可由两条相邻裂缝之间钢筋的平均伸长值与相应水平处受拉混凝土的平均伸长值之差求得。

$$w_m = \varepsilon_{sm} l_m - \varepsilon_{ctm} l_m = \varepsilon_{sm} \left(1 - \frac{\varepsilon_{ctm}}{\varepsilon_{sm}}\right) l_m$$

9.2.6 平均裂缝宽度

令

$$\varepsilon_{sm} = \psi \varepsilon_{sk} = \psi \frac{\sigma_s}{E_s}$$

$$\left(1 - \frac{\varepsilon_{ctm}}{\varepsilon_{sm}}\right) \approx 0.85$$

$$W_m = 0.85 \psi \frac{\sigma_{sq}}{E_s} l_m$$

式中： σ_{sm} 、 ε_{sm} ——纵向受拉钢筋的平均拉应力和拉应变；

ε_{cm} ——与纵向受拉钢筋相同水平处侧表面混凝土的平均拉应变；

σ_{sk} ——裂缝截面处纵向受拉钢筋的应力；

l_m ——平均裂缝间距；

ψ ——钢筋应力的不均匀系数。

9.2.6 平均裂缝宽度

◆ 裂缝截面处钢筋应力 σ_s :

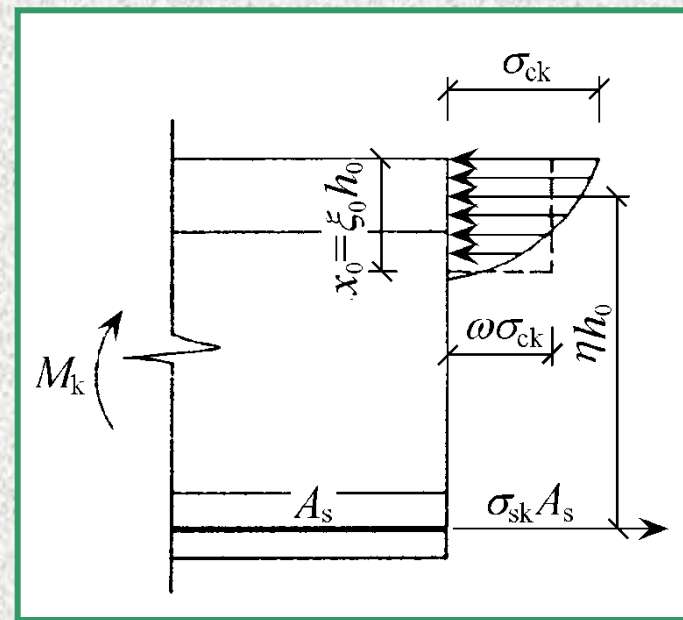
① 受弯构件:

$$\sigma_{sq} = \frac{M_q}{0.87h_0A_s}$$

② 轴心受拉构件:

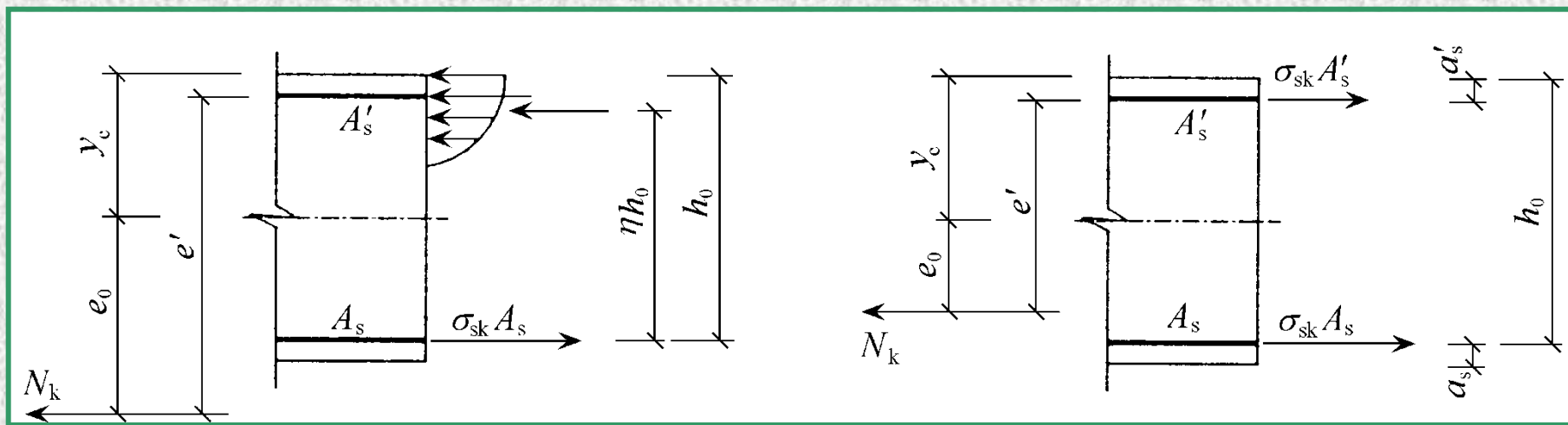
$$\sigma_{sq} = \frac{N_q}{A_s}$$

式中： M_q 、 N_q ——按荷载效应的准永久组合计算的弯矩值、轴向拉力值。



9.2.6 平均裂缝宽度

◆ 裂缝截面处钢筋应力 σ_s :



③ 偏心受拉构件:
$$\sigma_{sq} = \frac{N_q e'}{A_s (h_0 - a'_s)}$$

式中: e' ——轴向拉力作用点至受压区或受拉较小边纵向钢筋合力点的距离;

$$e' = (e_0 + y_c - a'_s)$$

y_c ——截面重心至受压或较小受拉边缘的距离。

9.2.6 平均裂缝宽度

④ 偏心受压构件：

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

式中： e —— N_k 至受拉钢筋 A_s 合力点的距离；

$$z = \left[0.87 - 0.12(1 - \gamma'_f) \left(\frac{h_0}{e} \right)^2 \right] h_0$$

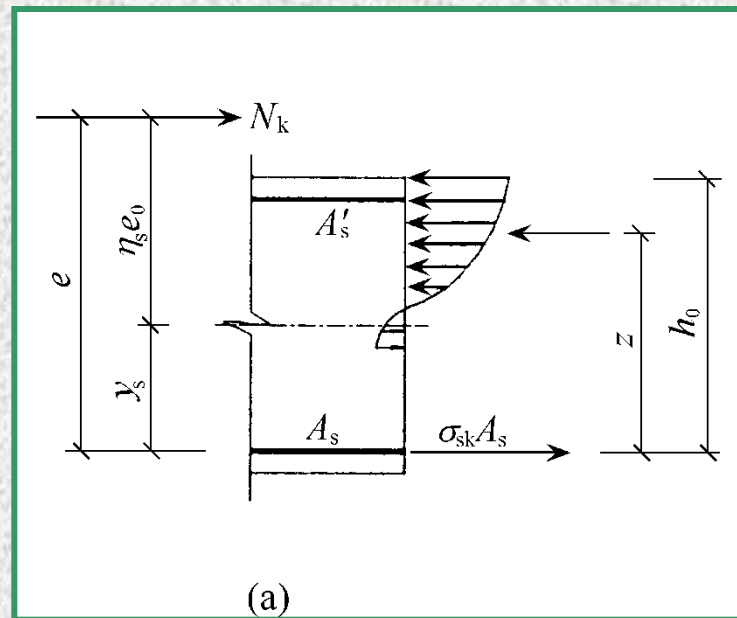
$$z \leq 0.87$$

当偏心受压构件的 $l_0/h > 14$ 时，还应考虑侧向挠度的影响。

$$e = \eta_s e_0 + y_s$$

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

y_s ——截面重心至纵向受拉钢筋合力点的距离。



9.2.7 最大裂缝宽度

- ★ 最大裂缝宽度由平均裂缝宽度乘以“扩大系数”得到。
“扩大系数”主要考虑两种情况：在荷载标准组合下裂缝宽度的不均匀性；在荷载长期效应组合的影响下，最大裂缝宽度会进一步增大。

《混凝土设计规范》最大裂缝宽度计算公式：

$$W_{\max} = \alpha_{cr} \psi \frac{\sigma_{sq}}{E_s} \left(1.9c_s + 0.08 \frac{d_{eq}}{\rho_{te}} \right)$$

9.2.7 最大裂缝宽度

c_s ——最外层纵向受拉钢筋外边缘至受拉区底边的距离 (mm)；当 $c_s < 20$ 时，取 $c_s = 20$ 。当 $c_s > 65$ 时，取 $c_s = 65$ 。

d_{eq} ——纵向受拉钢筋的等效直径 (mm)；

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

n_i 、 d_i ——受拉区第 i 种纵向受拉钢筋的根数；

v_i ——第 i 种纵向受拉钢筋的相对粘结特性系数；

光圆钢筋： $v_i = 0.7$ 带肋钢筋： $v_i = 1.0$

α_{cr} ——构件受力特征系数；轴心受拉构件： $\alpha_{cr} = 2.7$

偏心受拉构件： $\alpha_{cr} = 2.4$ ；

受弯和偏心受压构件： $\alpha_{cr} = 1.9$ 。

9.2.8 影响裂缝宽度的主要因素

- 纵向受拉钢筋的应力 σ_{sk}
- 纵筋直径 d
- 纵向受拉钢筋表面形状
- 纵向受拉钢筋配筋率 ρ_{te}
- 混凝土保护层厚度 c
- 荷载性质
- 构件受力性质
- 混凝土强度等级对裂缝宽度的影响不大

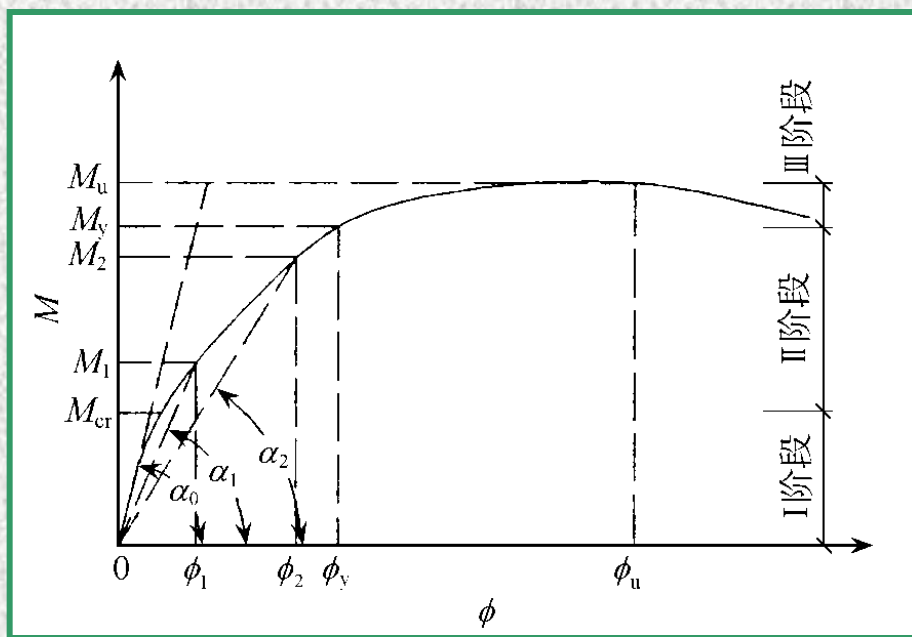
变形控制的目的和要求

- 对受弯构件进行变形控制的主要目的
 - 保证结构的使用功能要求
 - 避免非结构构件的损坏
 - 满足外观和使用者的心理要求
 - 避免对其他结构构件的不利影响
- 对于变形控制主要限于受弯构件挠度，使变形的计算值不超过允许的限值，即 $f \leq f_{lim}$

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

9.3.1 混凝土受弯构件变形计算的特点

- 混凝土受弯构件变形计算的特点
 - EI 是梁的截面弯曲刚度，是度量截面抵抗弯曲变形能力的重要指标；
 - 对匀质弹性材料梁， $M-f$ 或 $M-\phi$ 始终保持不变的线性关系；
 - 对于非匀质的混凝土材料，为区别于弹性弯曲刚度 EI ，用符号 B_s 来表示截面弯曲刚度。
- 钢筋混凝土梁的截面弯曲刚度随弯矩的变化特点



9.3.2 截面弯曲刚度的计算公式

➤ 平均曲率

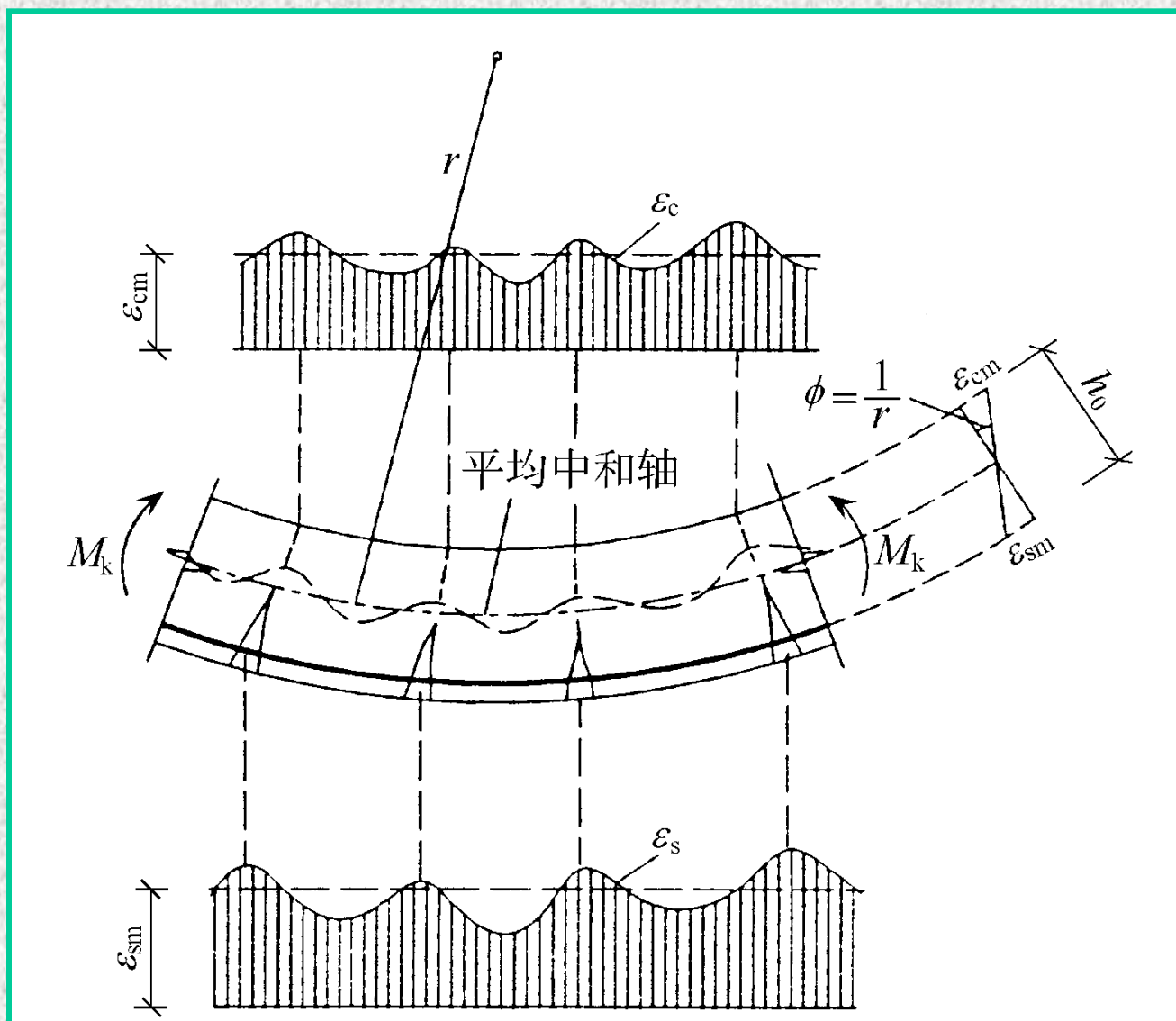
根据平均应变符合平截面的假定，可得平均曲率为

$$\phi = \frac{1}{r} = \frac{\varepsilon_{sm} + \varepsilon_{cm}}{h_0}$$

r ——平均曲率半径

ε_{sm} 、 ε_{cm} ——纵向受拉钢筋重心处的平均拉应变和受压区边缘混凝土的平均压应变

h_0 ——截面的有效高度



梁纯弯段内各截面应变及裂缝分布

9.3.2 截面弯曲刚度的计算公式

➤ 平均应变 ε_{sm} 、 ε_{cm}

$$\varepsilon_{sm} = \psi \varepsilon_{sk} = \psi \frac{\sigma_{sk}}{E_s} = \psi \frac{M_k}{E_s A_s \eta h_0}$$

$$\varepsilon_{cm} = \psi_c \varepsilon_{ck} = \psi_c \frac{\sigma_{ck}}{E'_c} = \psi_c \frac{\sigma_{ck}}{\lambda E_c} = \frac{M_k}{\zeta b h_0^2 E_c}$$

σ_{ck} ——按荷载效应的标准组合计算的裂缝截面处受压区边缘混凝土的压应力

$$\sigma_{ck} = \frac{M_k}{\omega(\gamma'_f + \xi_0) \eta b h_0^2}$$

ζ ——受压区边缘混凝土平均应变综合系数，又称截面弹塑性抵抗矩系数

$$\zeta = \omega \lambda (\gamma'_f + \xi_0) \eta / \psi_c$$

9.3.2 截面弯曲刚度的计算公式

➤ 短期刚度 B_s 的计算公式

公式适用于矩形、T形、
倒T形和I形截面受弯构件，
计算的平均曲率与试验结果
符合较好。

$$B_s = \frac{M_k}{\phi} = \frac{M_k h_0}{\varepsilon_{sm} + \varepsilon_{cm}} = \frac{1}{\frac{\psi}{A_s \eta h_0^2 E_s} + \frac{1}{\zeta b h_0^3 E_c}}$$



$$\alpha_E = \frac{E_s}{E_c}$$

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



$$\frac{\alpha_E \rho}{\zeta} = 0.2 + \frac{6\alpha_E \rho}{1 + 3.5\gamma_f'} \quad \text{且 } \eta = 0.87$$

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

9.3.3 考虑荷载长期作用影响时受弯构件刚度B的计算

荷载长期作用下刚度降低的原因：

- (1) 受压区混凝土发生徐变
- (2) 裂缝间受拉混凝土的应力松弛、混凝土和钢筋的滑移徐变，使受拉混凝土不断退出工作
- (3) 裂缝不断向上发展，使其上部原来受拉的混凝土脱离工作，使内力臂减小
- (4) 由于受拉区和受压区混凝土的收缩不一致，使梁发生翘曲，亦将导致曲率的增大和刚度的降低
- (5) 所有影响混凝土徐变和收缩的因素都将影响刚度的降低，使构件挠度增大

9.3.3 考虑荷载长期作用影响时受弯构件刚度B的计算

采用荷载标准组合时

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

M_k ——按荷载的标准组合计算的弯矩，取计算区段内的最大弯矩值

M_q ——按荷载的准永久组合计算的弯矩，取计算区段内的最大弯矩值

B_s ——荷载效应的标准组合作用下受弯构件的短期刚度

θ ——考虑荷载长期作用对挠度增大的影响系数 $\theta = 2.0 - 0.4 \frac{\rho'}{\rho}$

采用荷载准永久组合时

$$B = \frac{B_s}{\theta}$$

注意：对翼缘位于受拉区的倒T形截面， θ 值应增加20%。

当建筑物所处的环境很干燥时， θ 值应增加15%~20%。

9.3.4 提高受弯构件刚度的措施

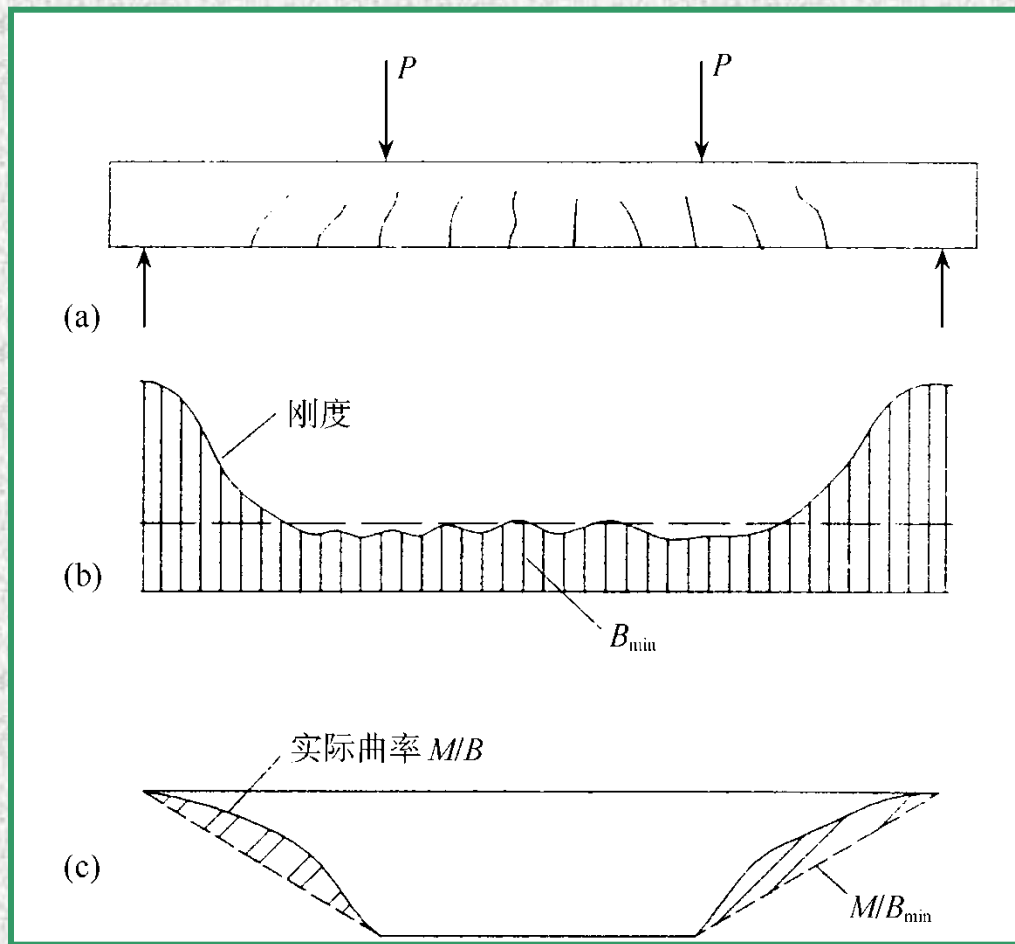
- ◆ 若验算结果 $f > [f]$ ，从短期刚度计算公式可知，增加截面高度是提高截面抗弯刚度，减小构件挠度的最有效措施；
- ◆ 若构件截面受到限制不能加大时，可考虑增加受拉钢筋的配筋率或提高混凝土强度等级，但作用并不显著。
- ◆ 对某些构件还可以充分利用纵向受压钢筋对长期刚度的有利影响，在受压区配置一定数量的受压钢筋；
- ◆ 另外，采用预应力混凝土构件也是提高构件刚度的有效措施。

9.3.5 最小刚度原则与挠度验算

最小刚度原则就是在同一符号弯矩区段内最大弯矩 M_{\max} 处的截面刚度 B_{\min} 作为该区段的刚度 B 以计算构件的挠度。

一方面按 B_{\min} 计算的挠度值偏大，另一方面，不考虑剪切变形的影响，对出现斜裂缝的情况，剪跨内钢筋应力大于按正截面的计算值，这些均导致挠度计算值偏小。上述两方面的影响大致可以互相抵消，对国内外约350根试验梁验算结果，计算值与试验值符合较好。因此，采用“最小刚度原则”是可以满足工程要求的。

9.3.5 最小刚度原则与挠度验算



沿梁长的刚度和曲率分布

9.3.5 最小刚度原则与挠度验算

《规范》规定钢筋混凝土受弯构件的挠度应满足

$$f \leq f_{\text{lim}}$$

f_{min} ——受弯构件的挠度限值

f ——根据最小刚度原则采用的刚度计算的挠度，当跨间为同号弯矩时

$$f = \alpha \frac{M_k l_0^2}{B}$$