



第五讲：钢筋与混凝土之间的粘结与锚固

任晓丹

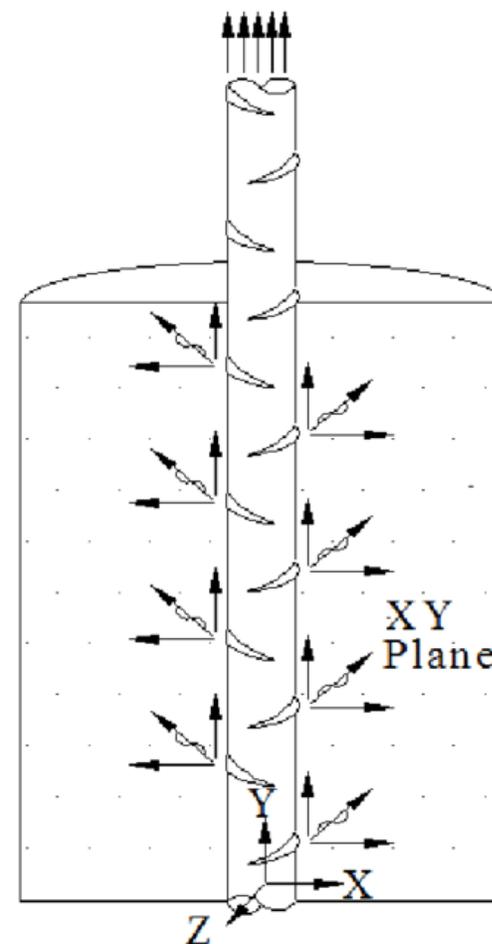
同济大学土木工程学院

概述

➤ 粘结应力

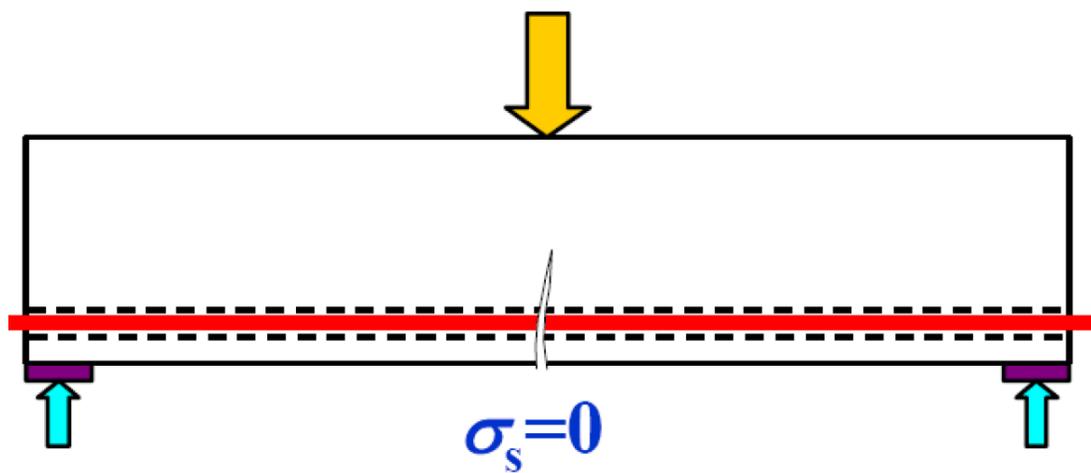
- **定义：**为抵抗相对滑移(变形差)沿钢筋与混凝土界面产生的剪应力。
- **作用：**钢筋和混凝土之间传递荷载和协调变形。
- **粘结应力的大小：**等于钢筋中力的变化率
衡量

即在任意两个截面之间如果钢筋应力没有变化，
粘结应力就不存在。

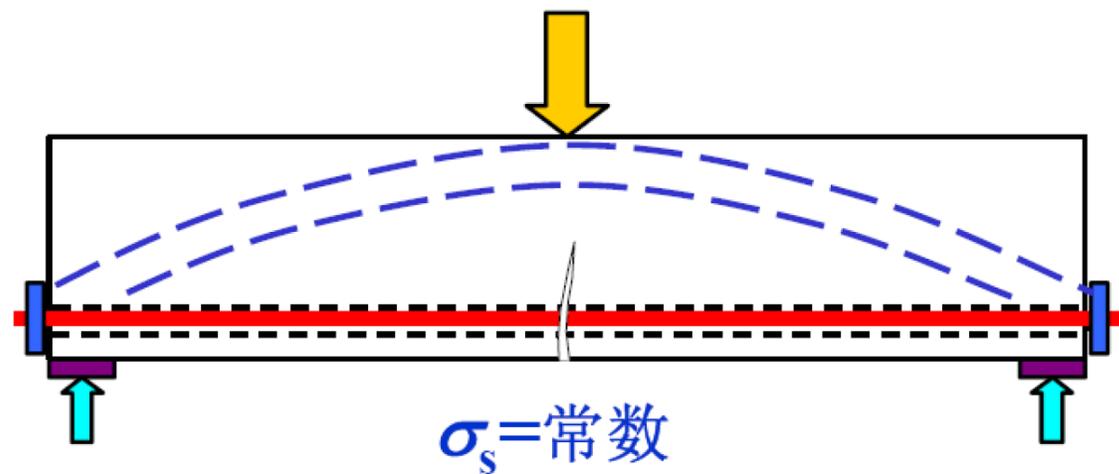


概述

➤ 粘结应力



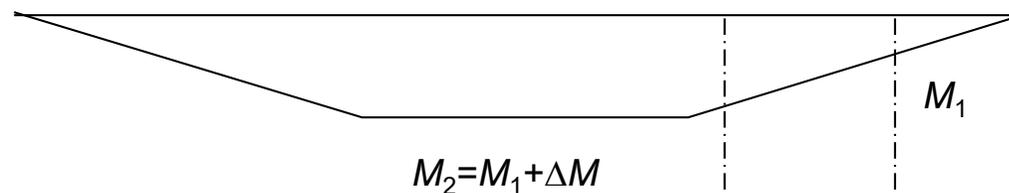
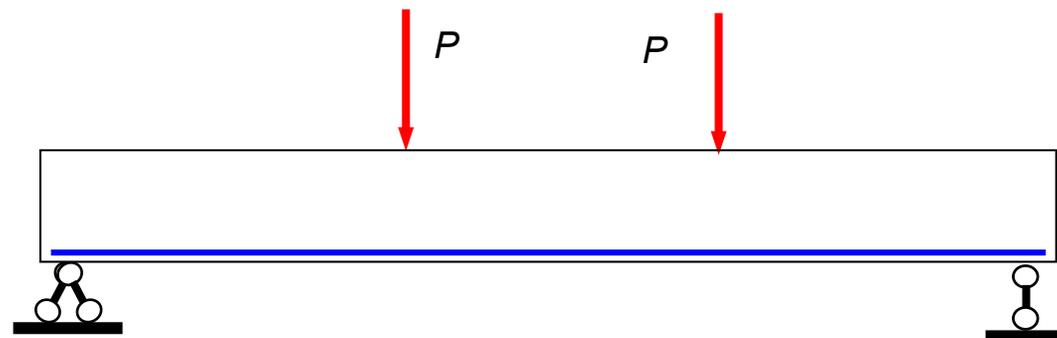
无粘结梁受力



端部有锚固无粘结梁受力

概述

➤ 开裂前的粘结作用



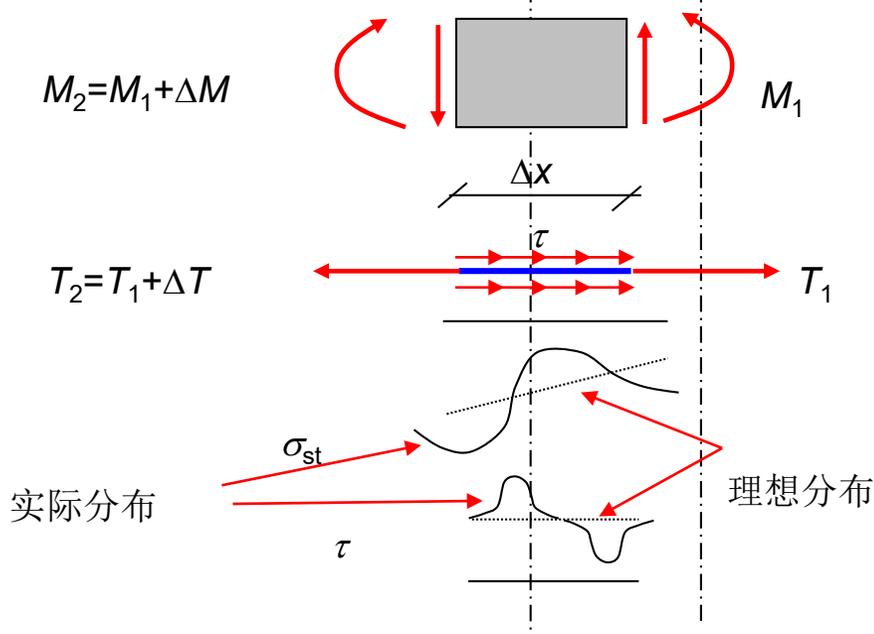
$$T_1 = \frac{M_1}{\gamma_s h} \quad T_2 \approx \frac{M_2}{\gamma_s h} = \frac{M_1 + \Delta M}{\gamma_s h}$$

$$\Delta T = \frac{\Delta M}{\gamma_s h}$$

$$\tau = \frac{\Delta T}{\Delta x \mu_s} = \frac{\Delta M}{\Delta x \gamma_s h \mu_s} = \frac{V}{\gamma_s h \mu_s}$$

梁中粘结应力的分布与V的分布规律相同；实际上由于微裂缝的存在分布规律还要变化

钢筋的周长

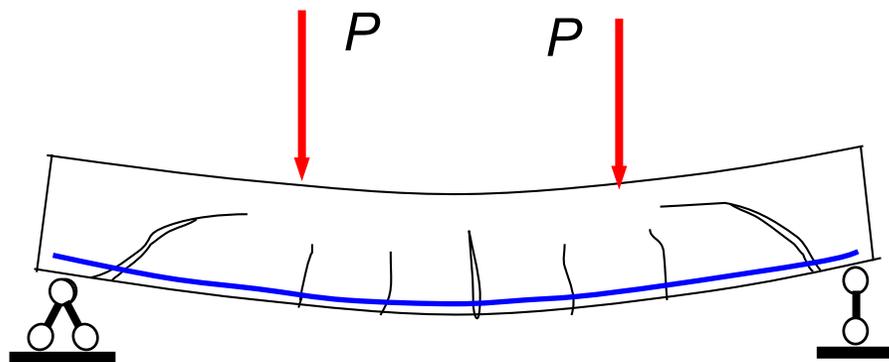


概述

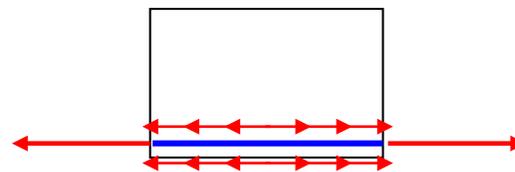
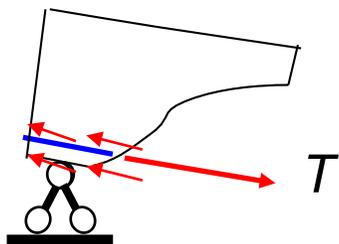
- 开裂之后粘结问题大致可以分为两类：
 - **锚固粘结问题**：包括支座锚固长度、搭接长度等；
 - **裂缝间局部粘结问题**：包括裂缝宽度和间距计算、混凝土受拉程度等。粘结性能的退化和丧失必然导致结构力学性能的降低甚至丧失。

概述

➤ 粘结



两种粘结作用



保证钢筋和混凝土
共同工作

锚固粘结

缝间粘结

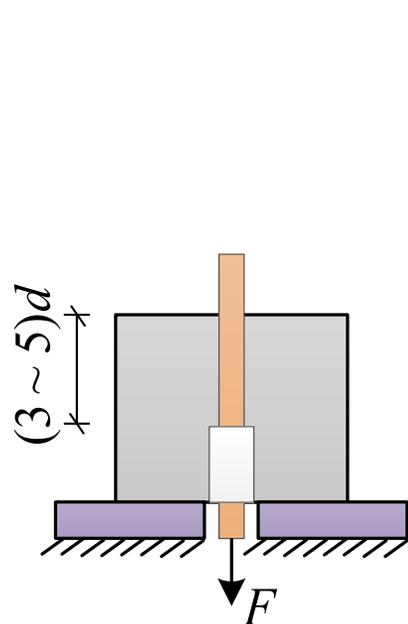
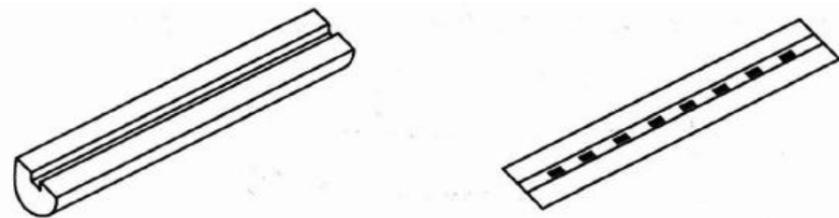
改善钢筋混凝土的
耗能性能

概述

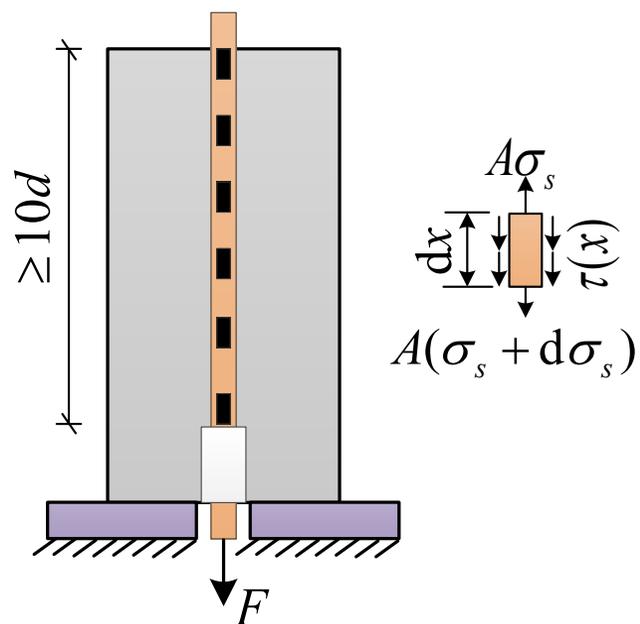
➤ 粘结实验

拉拔试验：拉拔试验分为短锚试验和长锚试验；尽管短锚拉拔试件与实际受力状态不符，但短锚试件制作简单、成本较低、受力明确及原理简单，为了比较不同变量对钢筋与混凝土粘结性能的影响，常利用短锚试件来研究局部粘结强度及局部粘结应力-滑移本构关系；长锚试件一般用来研究粘结应力沿粘结长度的分布情况。

钢筋加工与贴片



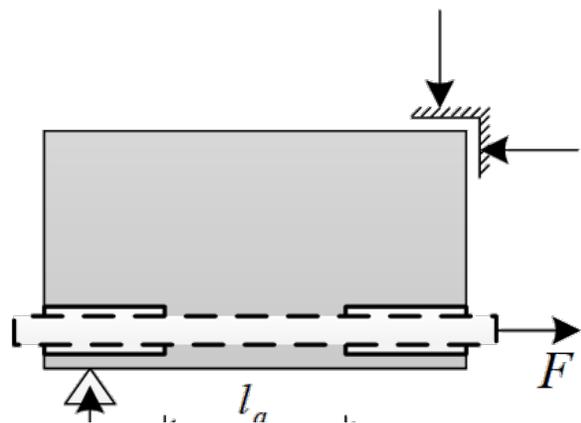
短锚试件



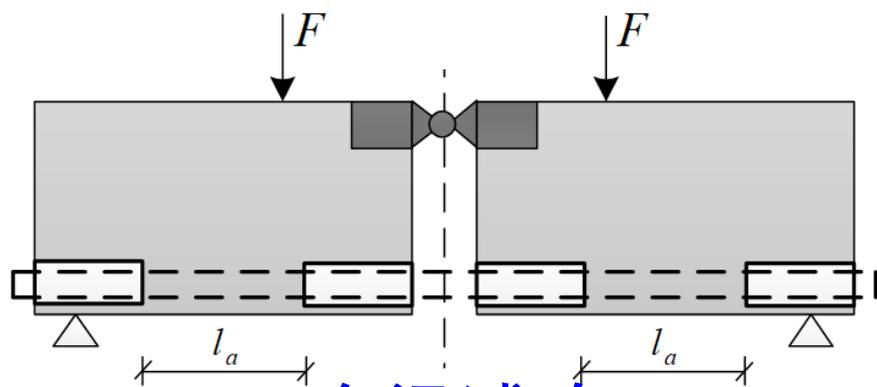
长锚试件

概述

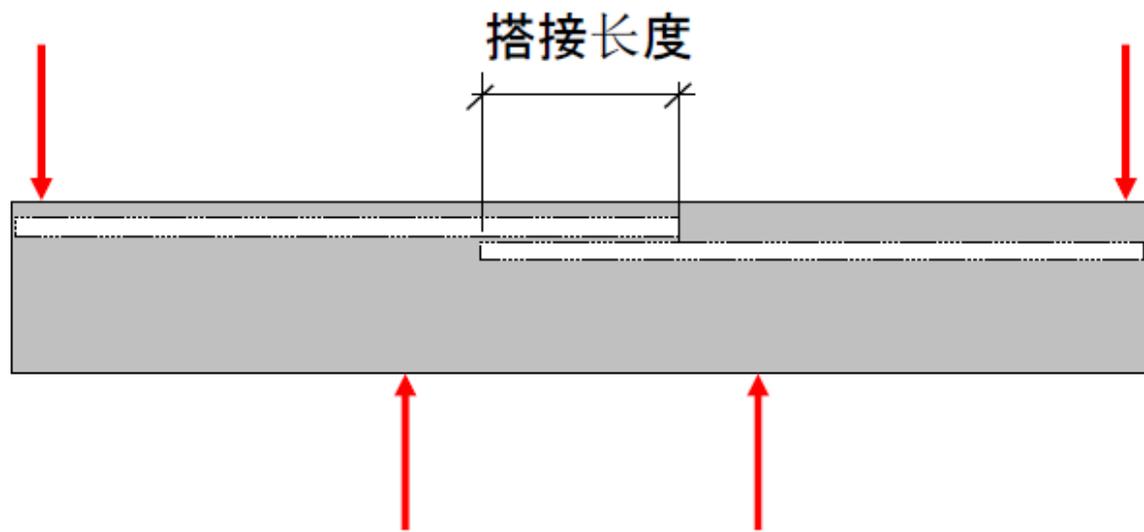
➤ 粘结实验



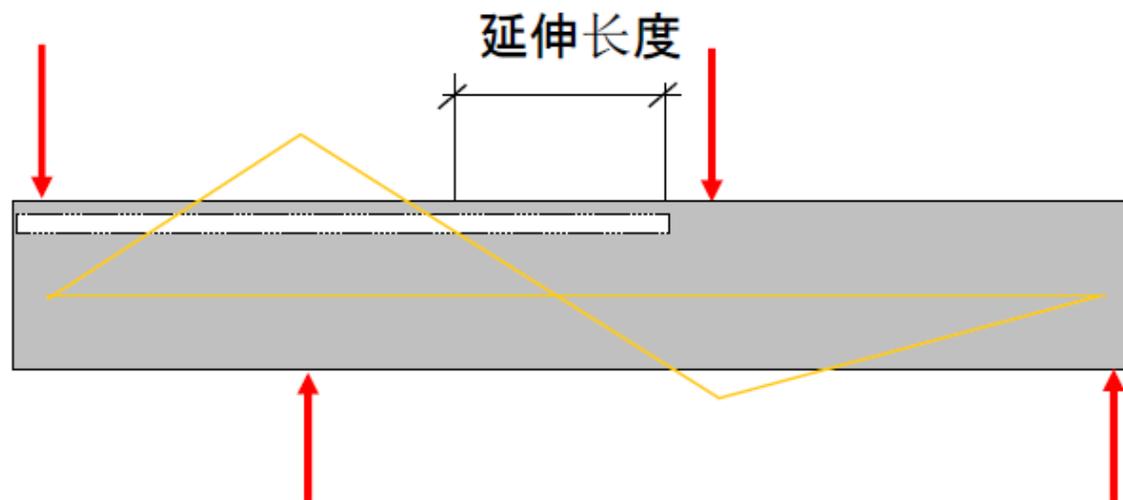
半梁试验



全梁试验



搭接长度试验



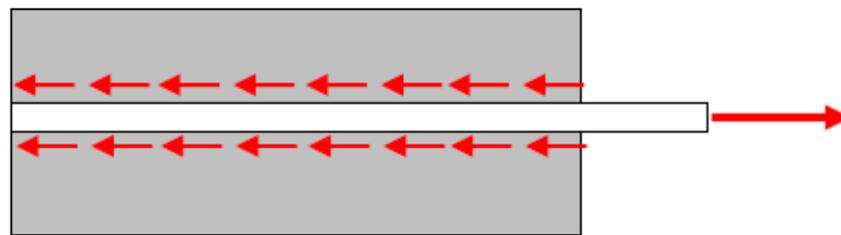
延伸长度试验

粘结应力特性

➤ 光圆钢筋的粘结力组成

- 钢筋与混凝土接触面上的化学吸附作用力（**化学胶结力**）。一般很小，仅在受力阶段的局部无滑移区域起作用，当接触面发生相对滑移时，该力即消失。
- 混凝土收缩握裹钢筋而产生的**摩擦力**(主要作用)。
- 钢筋表面凹凸不平与混凝土之间产生的**机械咬合力**。对于光圆钢筋，这种咬合力来自于表面的粗糙不平。

光圆钢筋的破坏形式为剪切(拔出)破坏，粘结强度较低，滑移较大。

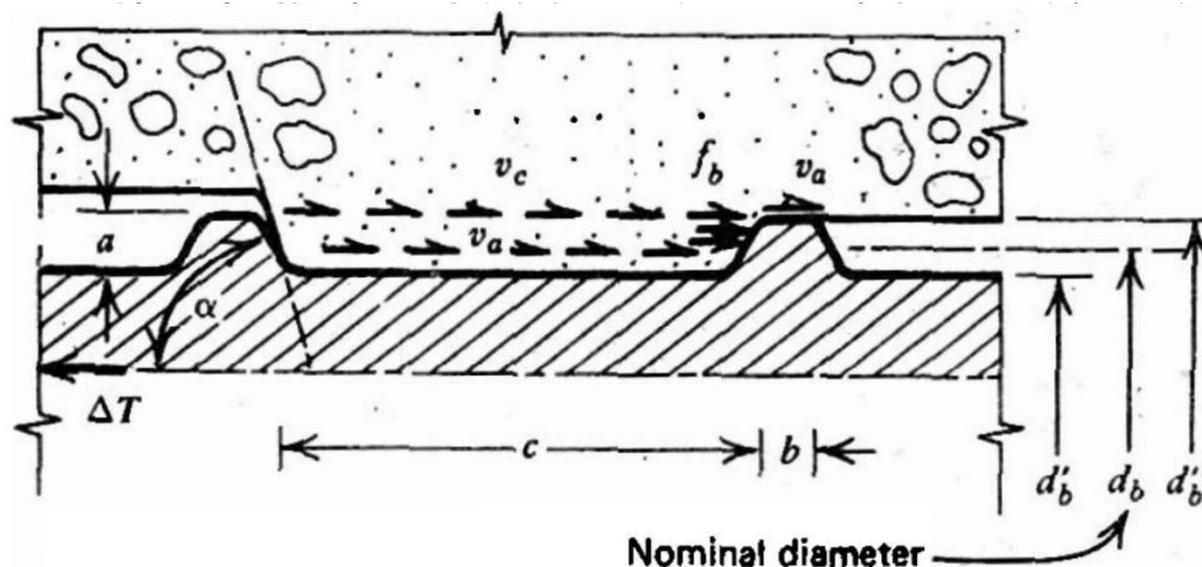


粘结应力特性

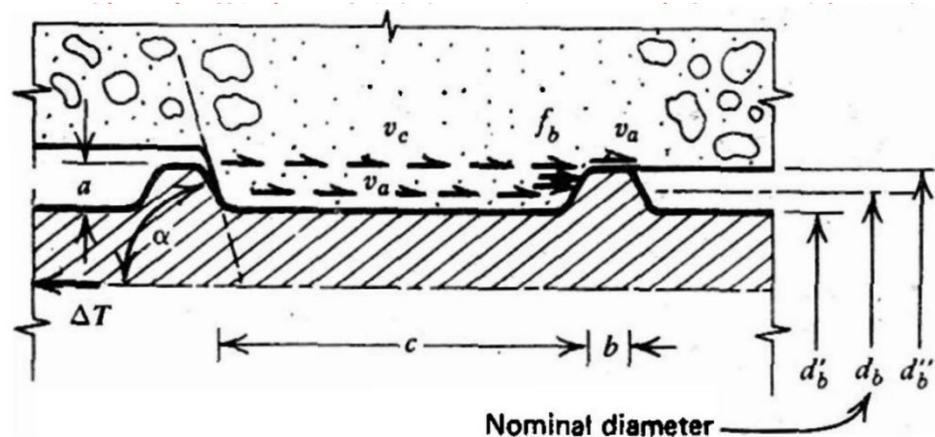
➤ 变形钢筋的粘结作用

- 变形钢筋与混凝土之间的粘结力主要来源于**机械咬合力**。
- 钢筋两个肋条之间发挥出的粘结强度与以下应力有关：

- ① 钢筋表面附着应力而产生的剪应力
- ② 肋条侧面的压应力
- ③ 作用在两个肋条之间混凝土圆柱面上的剪应力。



粘结应力特性



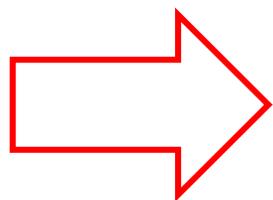
➤ 变形钢筋的粘结作用

在两个肋条中点之间的一小段钢筋长度范围内，上述应力与作用在钢筋上的轴力变化量之间的关系可以根据简单的平衡条件得出：

$$\Delta T_1 = \pi d'_b (b + c) v_a + \pi \frac{d_b''^2 - d_b'^2}{4} f_b \quad \Delta T_2 = \pi d_b'' c \cdot v_c$$

考虑： $\approx \pi \frac{d_b''^2 - d_b'^2}{4} f_b = \pi d_b a f_b$

临界状态： $\Delta T_1 = \Delta T_2$



$$\frac{v_c}{f_b} = \frac{a}{c}$$

粘结应力特性

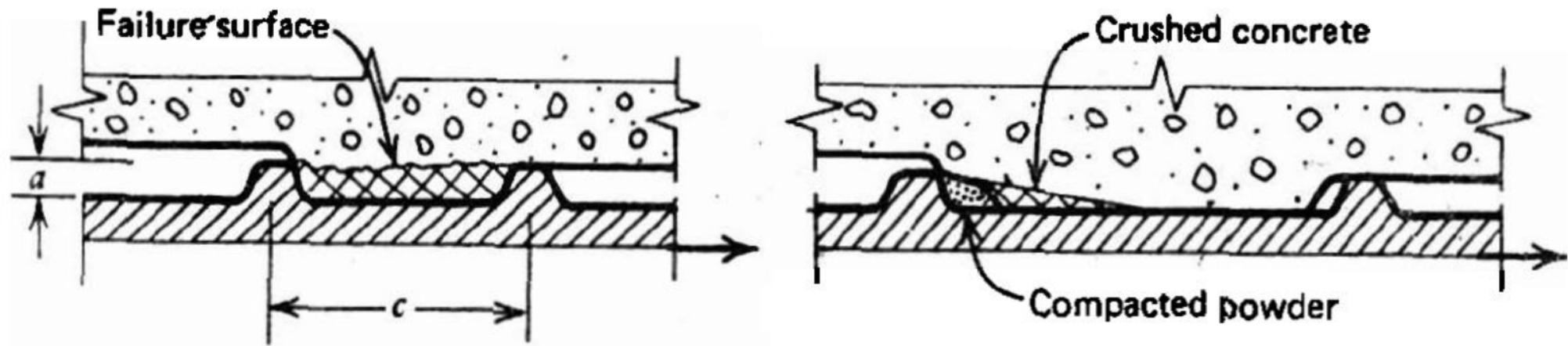
➤ 变形钢筋的粘结作用

根据德国斯图加特大学瑞姆（Rehm）的实验及分析研究：

- 当 $a/c=0.065$ 左右时，埋入混凝土中的钢筋在一小段长度 c 上表现出最令人满意的性能；
- 当肋过高和相距过近时，剪应力就会控制粘结性能，而钢筋将被拔出；
- 当肋的间距约大于10倍肋高时，局部压碎的混凝土就可能在肋前形成一个楔块，因而破坏便通常是由周围混凝土的劈裂所引起的。

粘结应力特性

➤ 变形钢筋的粘结作用



$a/c > 0.15$

刮犁式破坏

$a/c < 0.10$

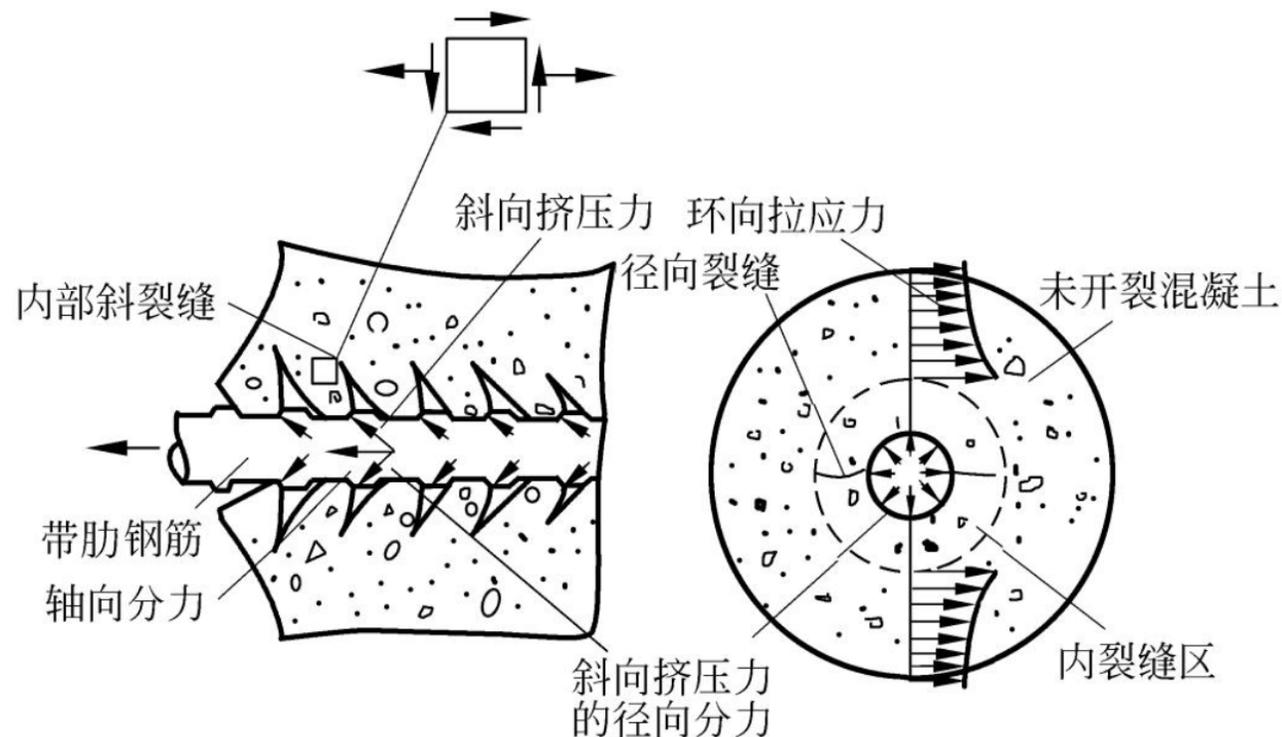
承压式破坏

通过合理设计变形钢筋的几何形状，避免上述两类破坏形态。

粘结应力特性

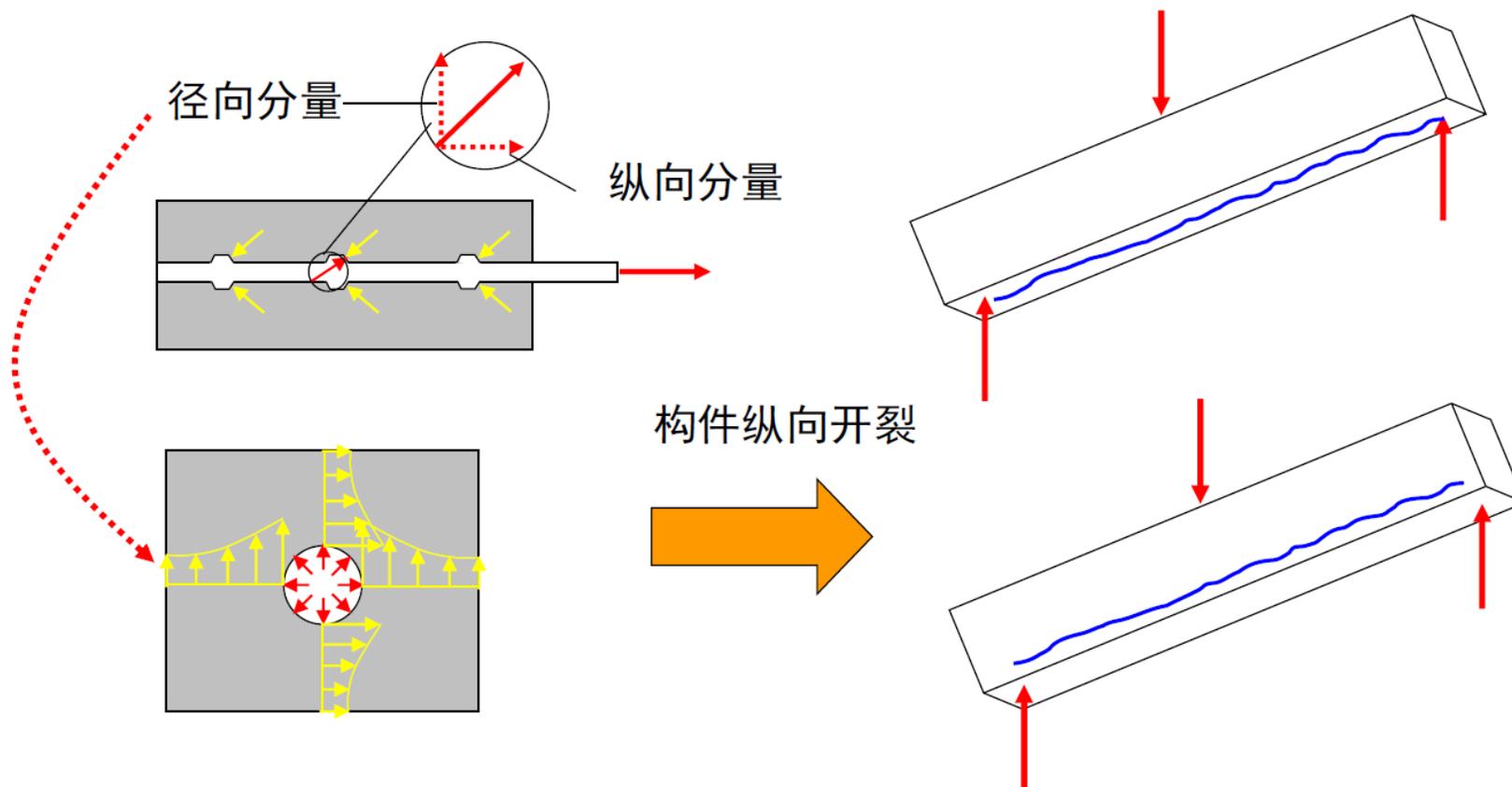
➤ 变形钢筋的粘结作用：劈裂破坏

- 变形钢筋受力后，其凸出的肋对混凝土产生**斜向挤压力**；
- 其水平分力使钢筋周围的混凝土轴向受拉、受剪，径向分力使混凝土产生**环向拉力**；
- 轴向拉力和剪力使混凝土产生**内部斜向锥形裂缝**；
- 环向拉力使混凝土产生内部**径向裂缝**。



粘结应力特性

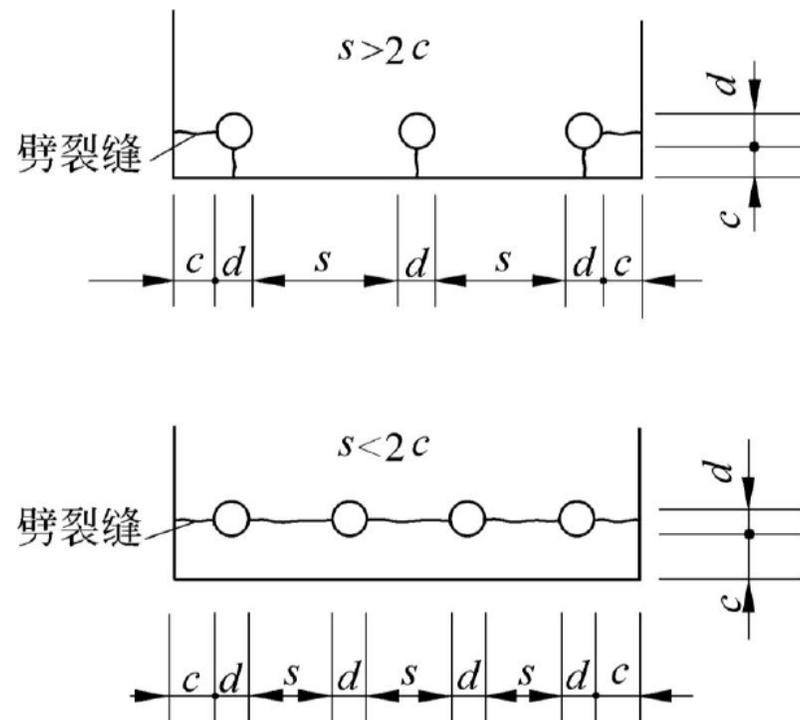
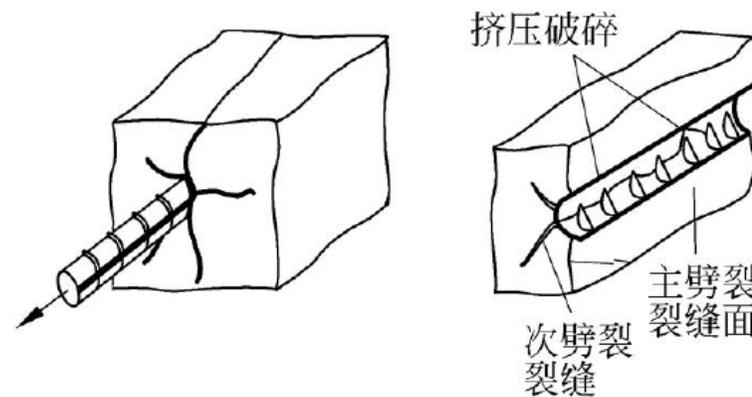
变形钢筋的粘结作用：劈裂破坏



粘结应力特性

➤ 变形钢筋的粘结作用：劈裂破坏

- 当混凝土保护层和钢筋间距较小时，径向裂缝可发展达到构件表面，产生劈裂裂缝，机械咬合作用将很快丧失，产生“劈裂式”粘结破坏。
- 在钢筋周围配置横向钢筋（箍筋或螺旋钢筋）或增加混凝土的保护层厚度（ c/d ），可提高粘结强度。



影响粘结强度的主要因素

➤ 经过研究粘结强度主要与以下因素有关：

1. 混凝土强度
2. 钢筋表面和外形特征
3. 浇筑位置
4. 横向配筋
5. 保护层厚度和钢筋净间距
6. 周围混凝土的受力情况
7. 锚固长度

影响粘结强度的主要因素

➤ 混凝土强度

- 提高混凝土的强度时，化学胶结力和机械咬合力增加，但对摩擦力的影响不大。
- 光圆钢筋和变形钢筋的粘结强度均随混凝土强度的提高而增加，但并不与立方体强度 f_{cu} 成正比，而与抗拉强度 f_t 成正比。

影响粘结强度的主要因素

➤ 钢筋表面和外形特征

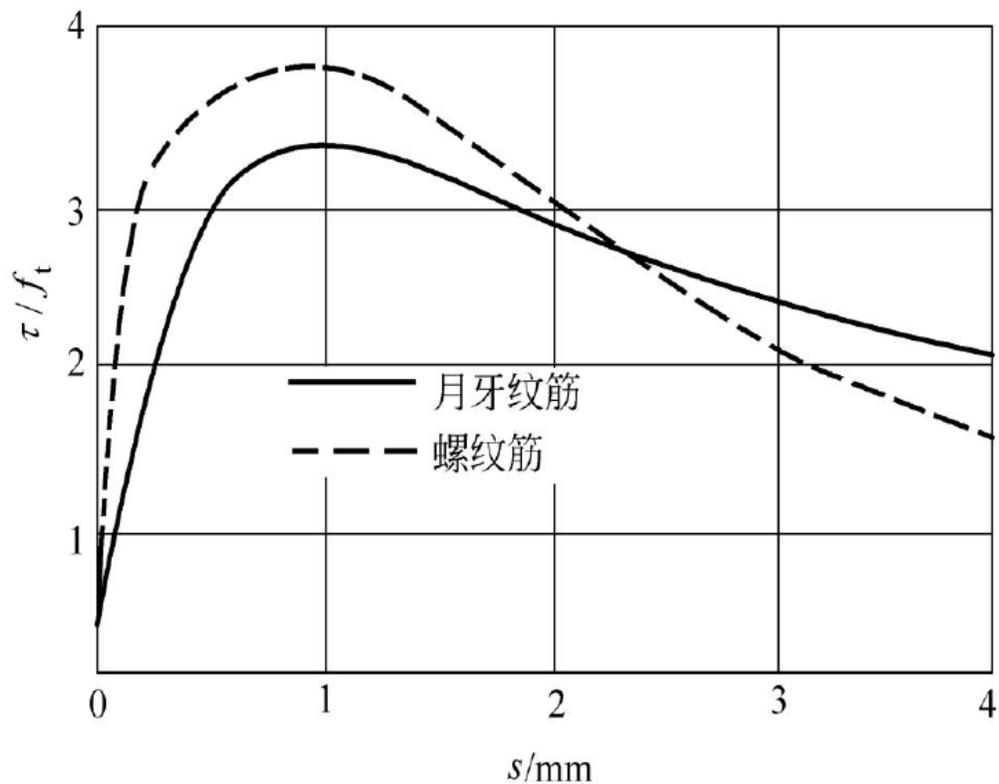
- 变形钢筋比光圆钢筋的粘结强度高，大致可高出2~3倍。
- 只要肋条侧面与钢筋轴线的夹角大于 70° ，角度的改变就不会影响粘结强度。

➤ 钢筋锈蚀的影响

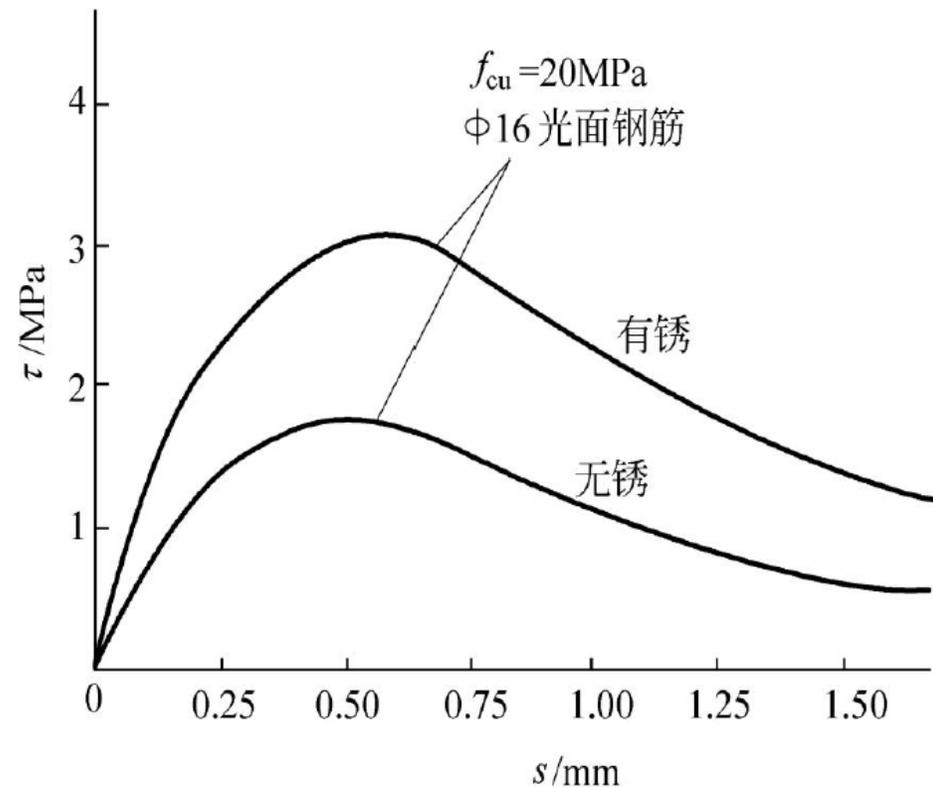
- 轻度锈蚀的钢筋，其粘结强度比无锈钢筋高。
- 锈蚀较严重时，粘结强度降低：
 - 锈蚀产物是一层疏松的氧化物，改变了钢筋与混凝土的接触面；
 - 锈蚀产物体积更大，会产生径向膨胀力；
 - 变形肋退化。

影响粘结强度的主要因素

➤ 钢筋表面和外形特征



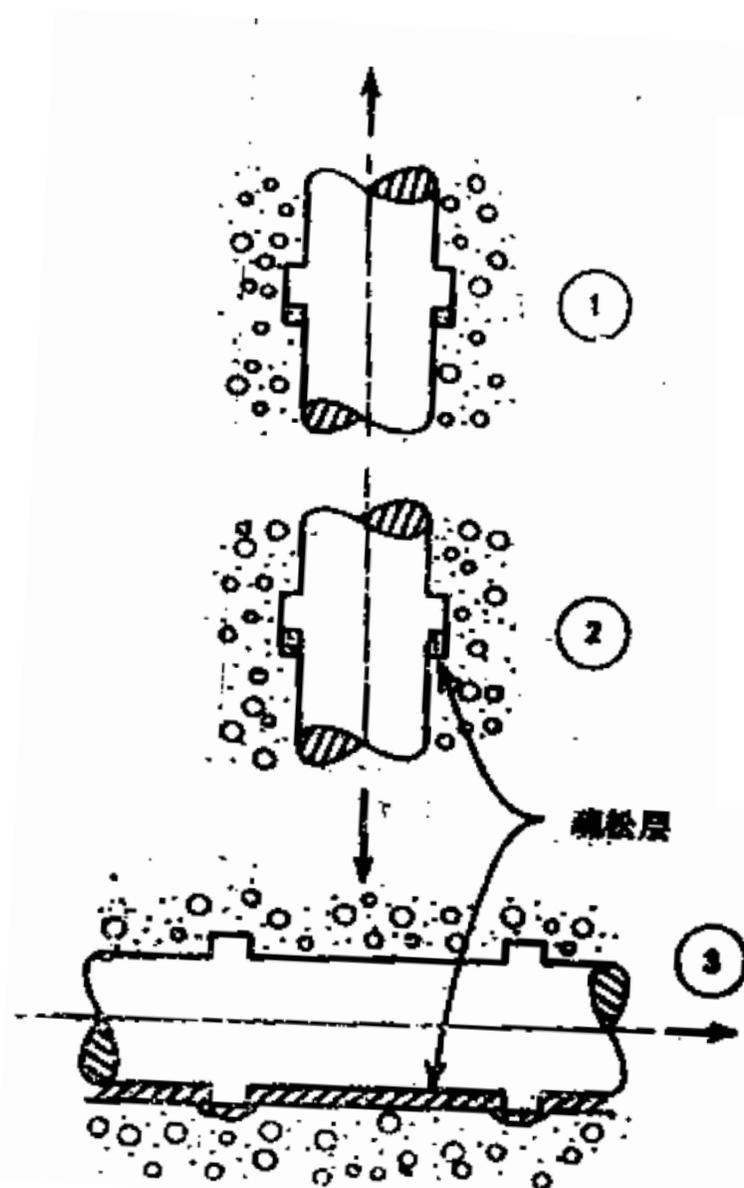
➤ 钢筋锈蚀的影响



影响粘结强度的主要因素

➤ 浇筑位置

- 粘结性能直接受肋条前面的混凝土的性能的影响。
- 钢筋在试件中的位置。
- 混凝土浇筑的方向。
- 浇筑位置对光圆钢筋的影响更大。
- ACI规范：对浇筑在顶部的变形钢筋，要求锚固长度增加40%。



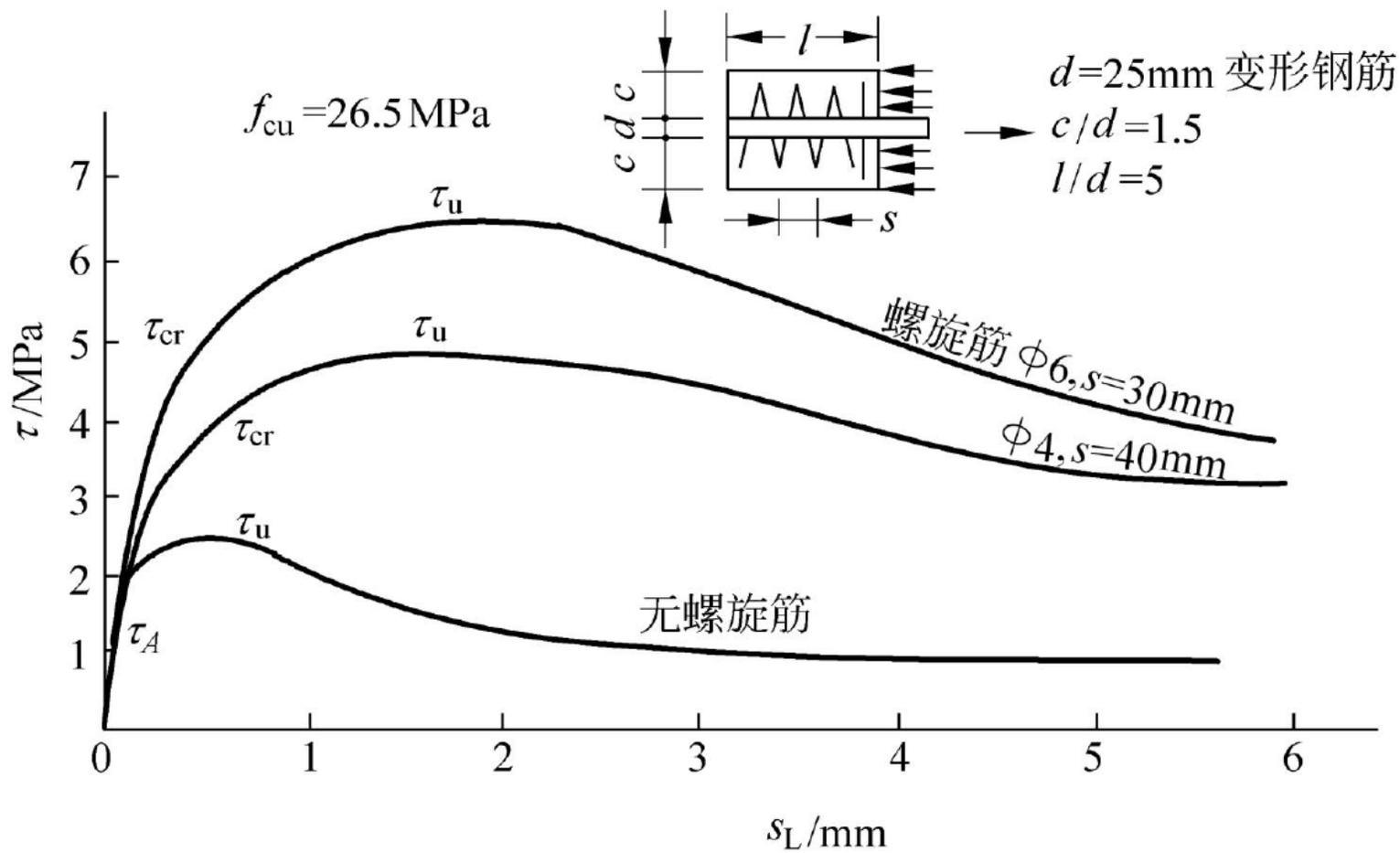
影响粘结强度的主要因素

➤ 横向配筋

- 横向钢筋的存在限制了径向裂缝的发展，并可限制到达构件表面的劈裂裂缝的宽度，使粘结强度得到提高。
- 由于劈裂裂缝是顺钢筋方向产生的，其对钢筋锈蚀的影响比受弯产生的垂直裂缝更大，将严重降低构件的耐久性。
- 对于直径较大钢筋的锚固区和搭接长度范围，均应增加横向钢筋。
- 当一排并列钢筋的数量较多时，也应考虑增加横向钢筋来控制劈裂裂缝的发生。

影响粘结强度的主要因素

➤ 横向配筋



影响粘结强度的主要因素

➤ 保护层厚度和钢筋净距

- 对于变形钢筋，当混凝土保护层太薄时，径向裂缝可能发展至构件表面出现纵向**劈裂裂缝**。
- 保护层厚度 c 与钢筋直径 d 的比值 c/d 越大，混凝土抵抗劈裂破坏的能力也越大，粘结强度越高。
- 钢筋的净距太小时，其外围混凝土将发生沿钢筋水平处贯穿整个梁宽的**水平劈裂裂缝**，整个混凝土保护层崩落。
- 钢筋净距 s 与钢筋直径 d 的比值 s/d 越大，粘结强度也越高。

影响粘结强度的主要因素

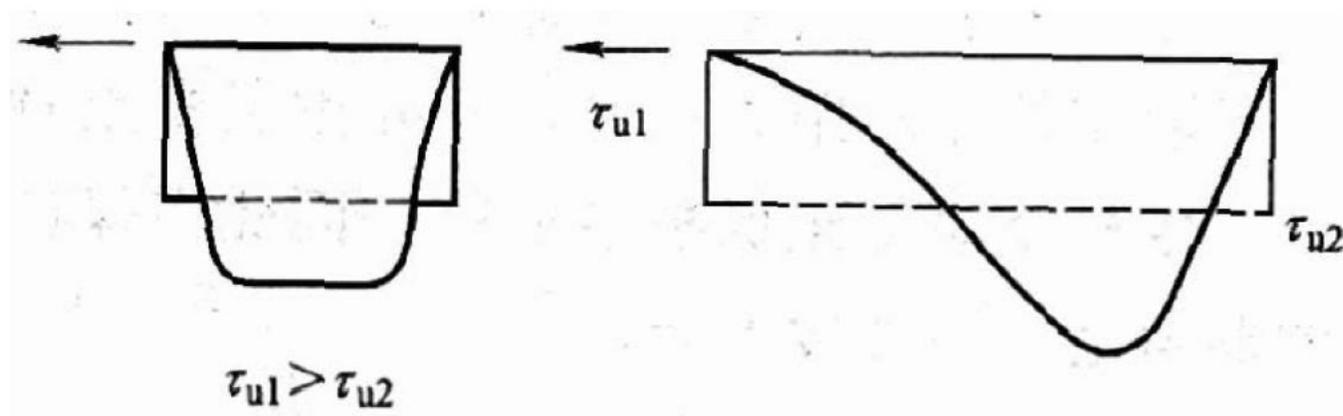
➤ 周围混凝土受力情况

- 在锚固范围内存在侧压力时，**压应力**制约了混凝土的横向变形，使钢筋与混凝土之间抵抗滑动的摩擦力增大，粘结强度提高。
- 在直接支承的支座处(如梁的简支端)，可适当减少钢筋在支座处的锚固长度。
- 侧向压力过大或有**侧向拉力**时，粘结强度降低。
- **剪力产生**的斜裂缝则会使锚固钢筋受到销栓作用而降低粘结强度。
- **受压钢筋**由于直径增大会增加对混凝土的挤压，从而使摩擦作用增加，粘结强度增加。
- 受反复荷载作用的钢筋，肋前后的混凝土均会被挤碎，导致咬合作用降低，粘结强度降低。

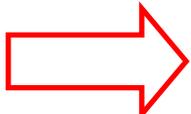
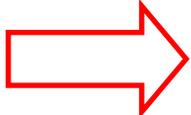
影响粘结强度的主要因素

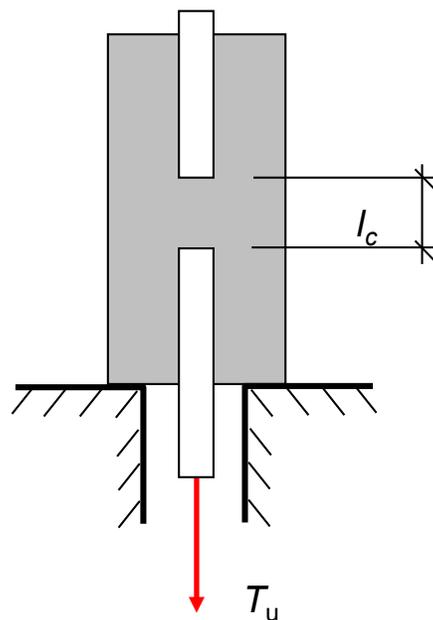
➤ 锚固长度

- 钢筋的锚固长度越长，粘结应力的分布就越不均匀，试件破坏时的平均粘结强度与实际最大粘结强度的比值越小。
- 当钢筋的锚固长度大于钢筋直径的5倍时，平均粘结强度值的折减已较小。
- 锚固长度很长的试件，钢筋加载端达到屈服时也不会被从混凝土中拔出。



锚固长度计算

- 原则  钢筋屈服时正好发生锚固破坏
- 对象  以直径为 $2c$ 的混凝土试件内配直径为 d 的变形钢筋为例
- 假定  纵裂发生在刮出式破坏以前



$$\tau_u = \frac{T_u}{\mu_s l_c}$$

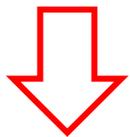
拔出拉力 

钢筋周长  埋置长度 

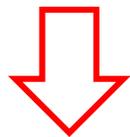
短锚试件

锚固长度计算

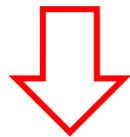
$$\tau_u = \frac{T_u}{\mu_s l_a} = \frac{\pi d^2 f_y / 4}{\pi d l_a} = \frac{d f_y}{4 l_a}$$



$$\tau_u = p_u$$

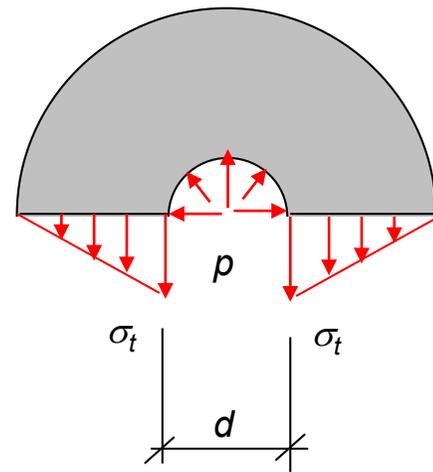
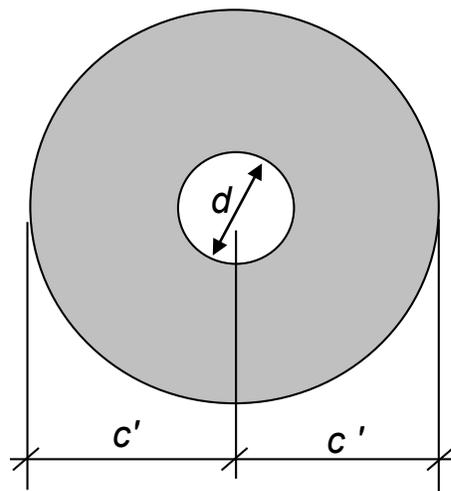
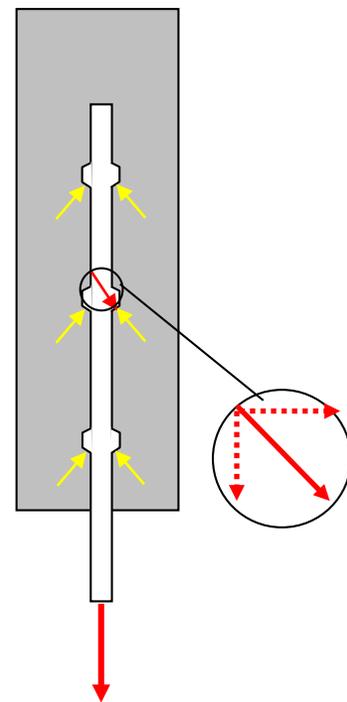
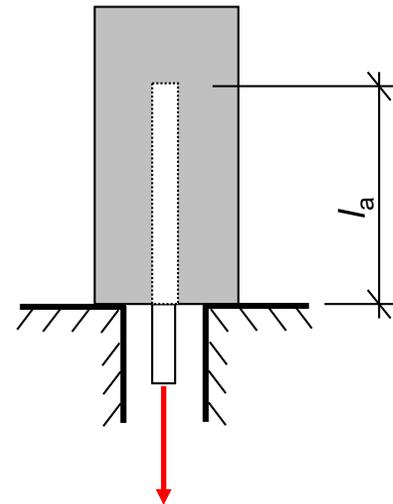


$$\frac{l_a}{d} = \frac{f_y}{\left(\frac{4c'}{d} - 2\right) f_t}$$



$$\text{令 } c' = 2d$$

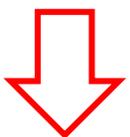
$$l_a = \frac{f_y}{6 f_t} d$$



$$l_a \cdot p \cdot d = (2c' - d) \frac{\sigma_t}{2} l_a$$



$$p = \left(\frac{c'}{d} - \frac{1}{2}\right) \sigma_t$$



$$p_u = \left(\frac{c'}{d} - \frac{1}{2}\right) f_t$$

影响粘结强度的主要因素

➤ 锚固长度——中国规范公式

$$l_{ab} = \alpha_v \frac{f_y}{f_t} d$$

基本锚固长度

锚固钢筋外形系数

钢筋类型	光圆钢筋	带肋钢筋	螺旋肋钢丝	三股钢绞线	七股钢绞线
α	0.16	0.14	0.13	0.16	0.17

注：光圆钢筋末端应做 180°弯钩，弯后平直段长度不应小于 3d，但作受压钢筋时可不做弯钩。

$$l_a = \zeta_b l_{ab}$$

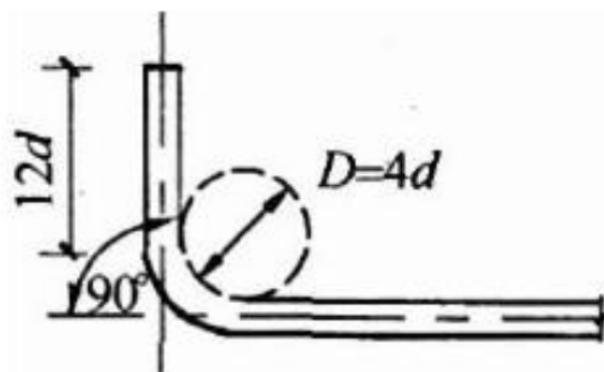
锚固长度修正系数

$$l_l = \zeta_l l_{ab}$$

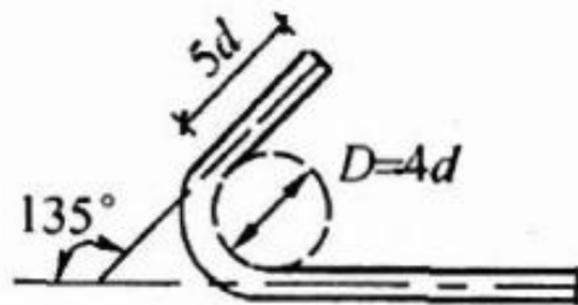
搭接长度修正系数

影响粘结强度的主要因素

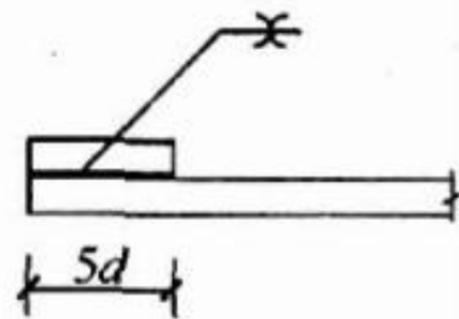
➤ 锚固长度



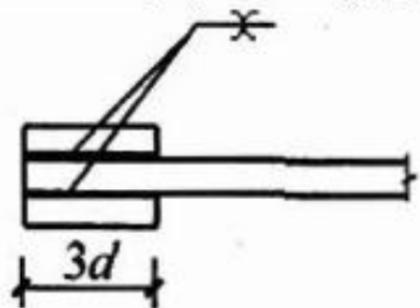
(a) 90° 弯钩



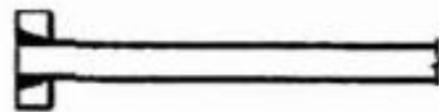
(b) 135° 弯钩



(c) 一侧贴焊锚筋



(d) 两侧贴焊锚筋



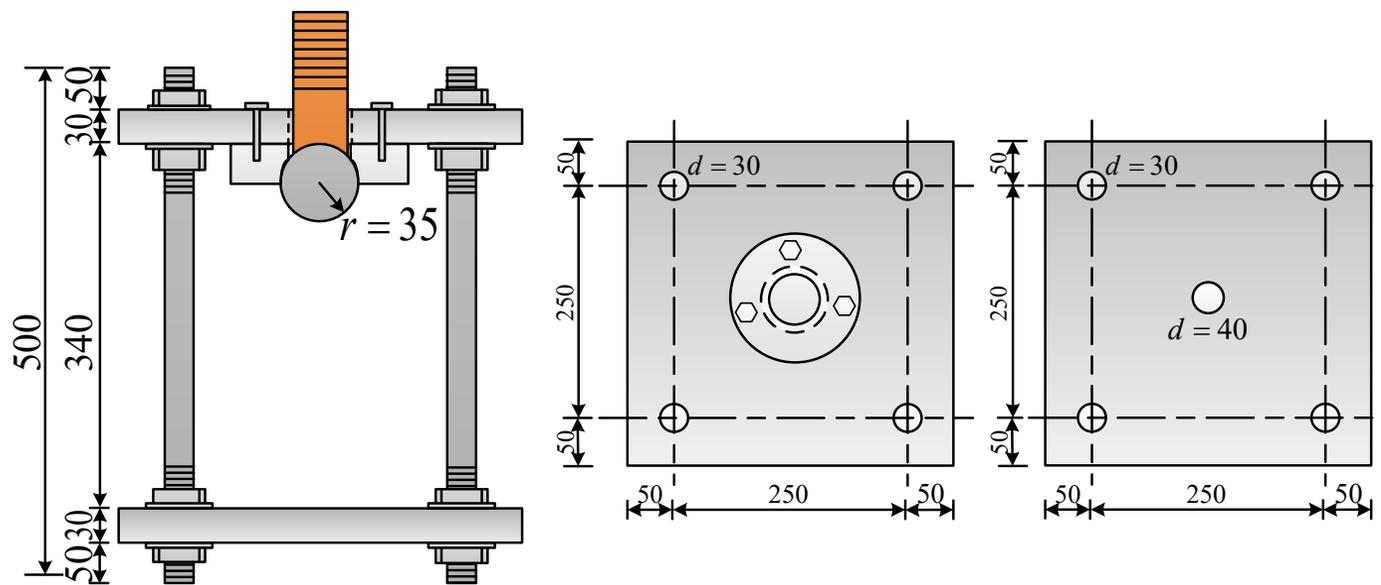
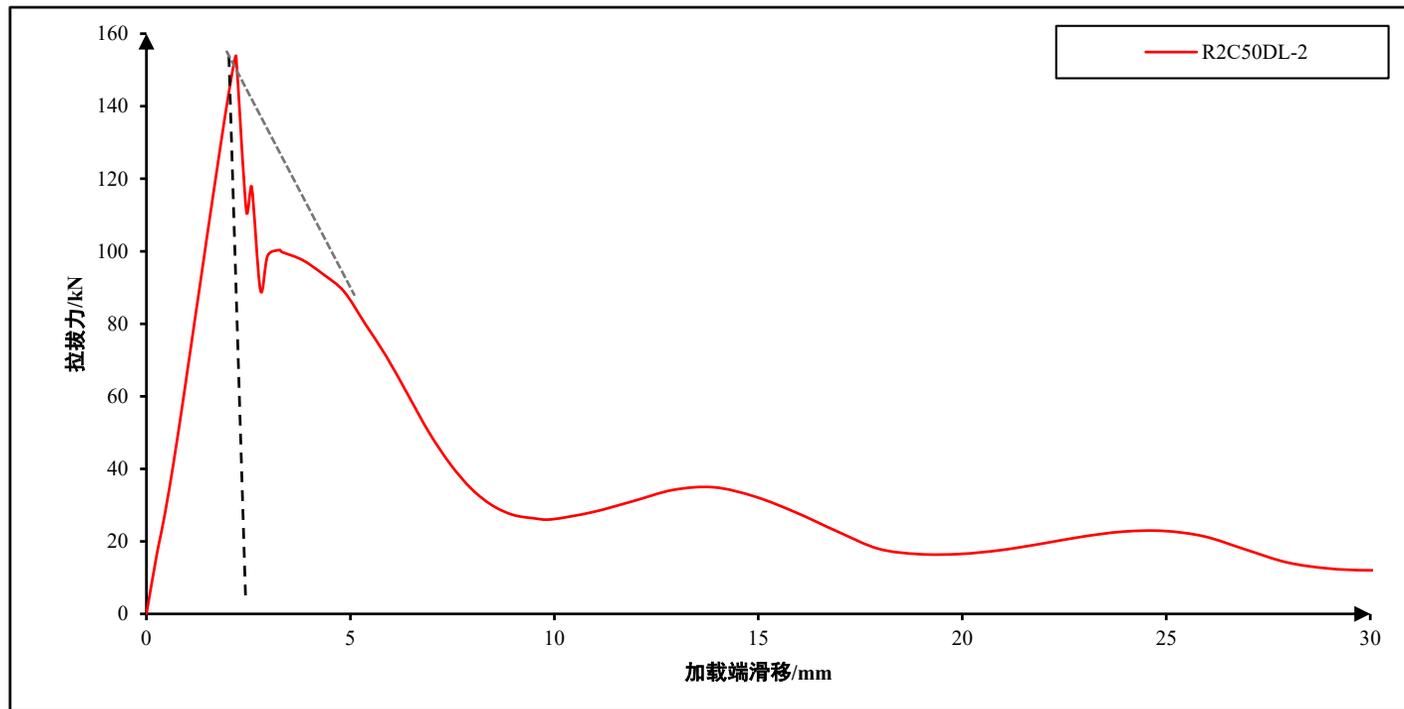
(e) 穿孔塞焊锚板



(f) 螺栓锚头

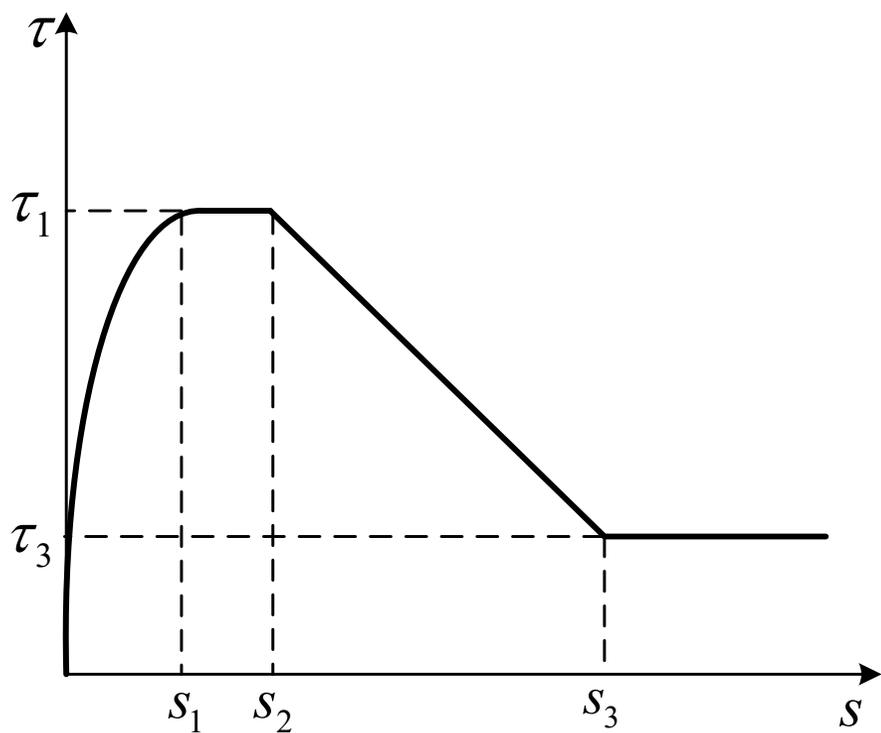
粘结本构关系

➤ 实验研究

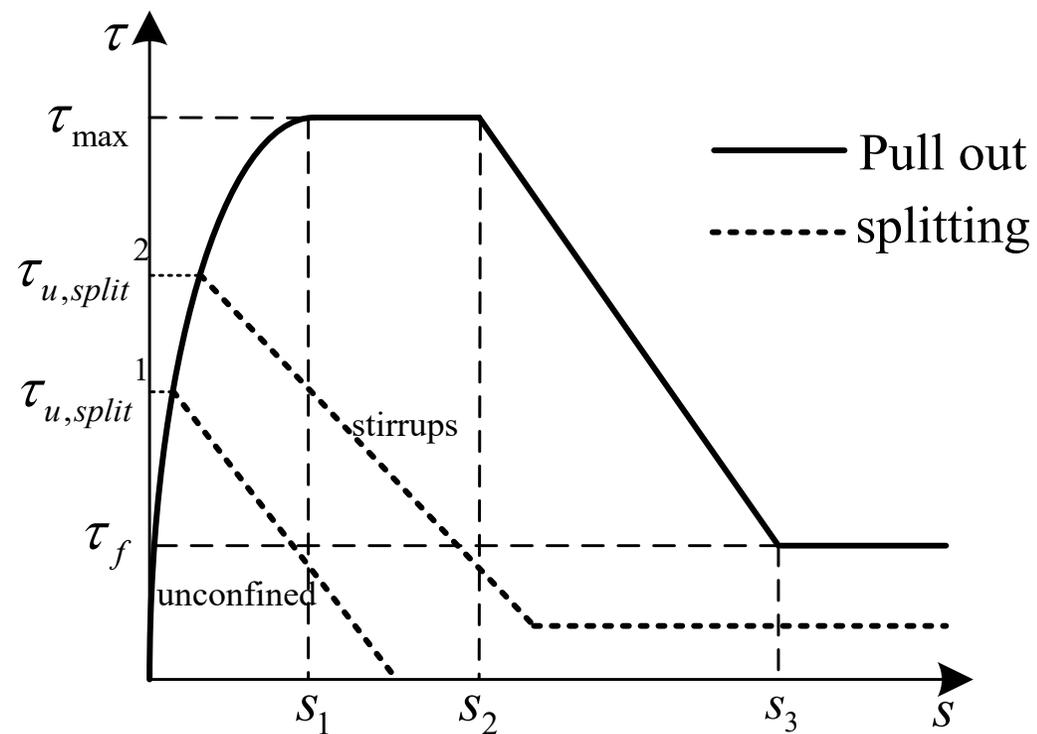


粘结本构关系

经验模型



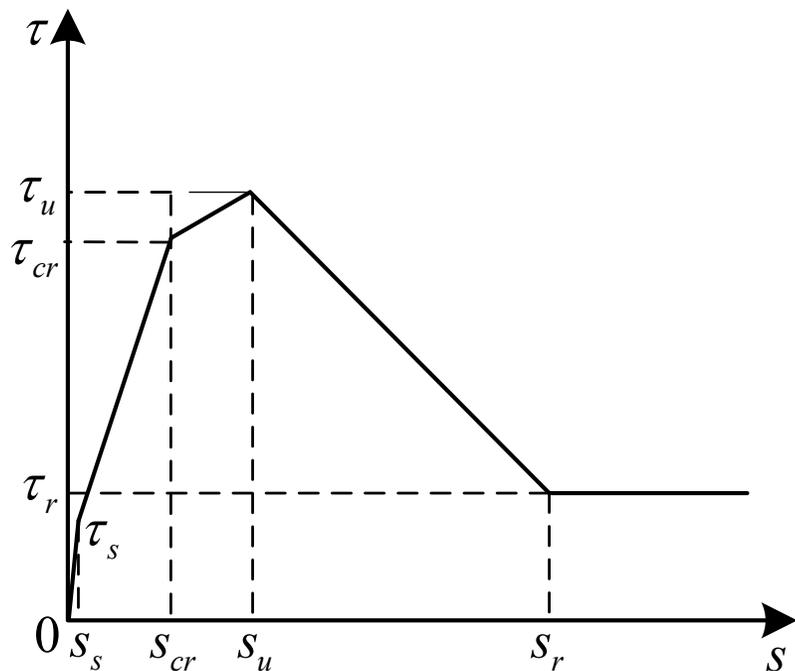
Eligehausen模型



CEB-FIP模型

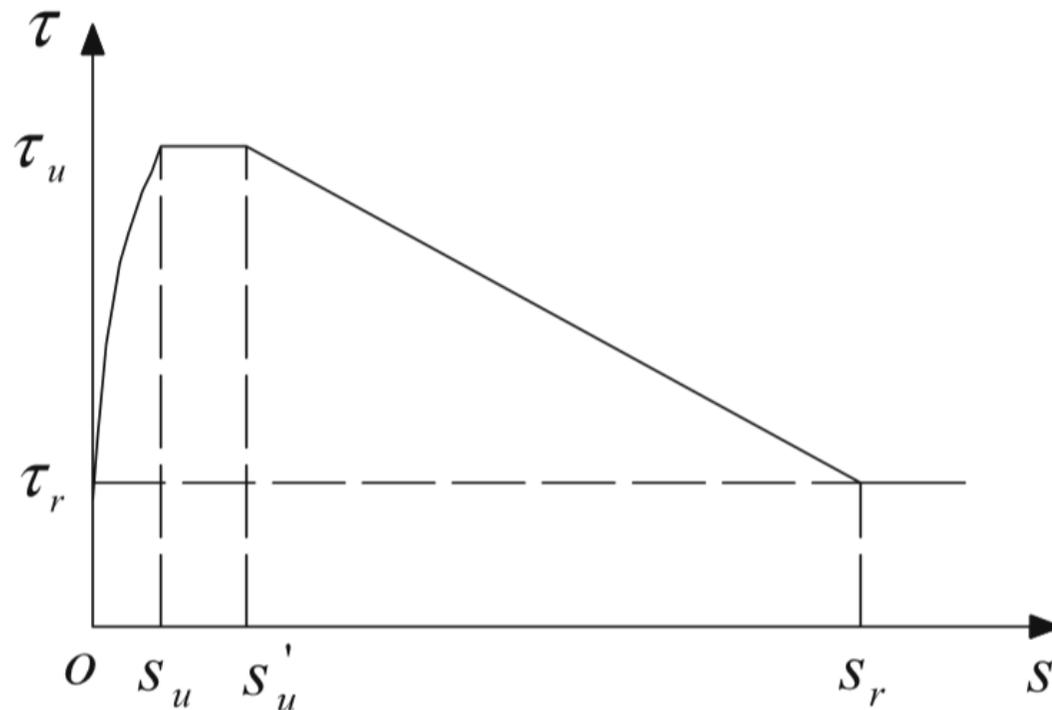
粘结本构关系

经验模型



徐有邻模型

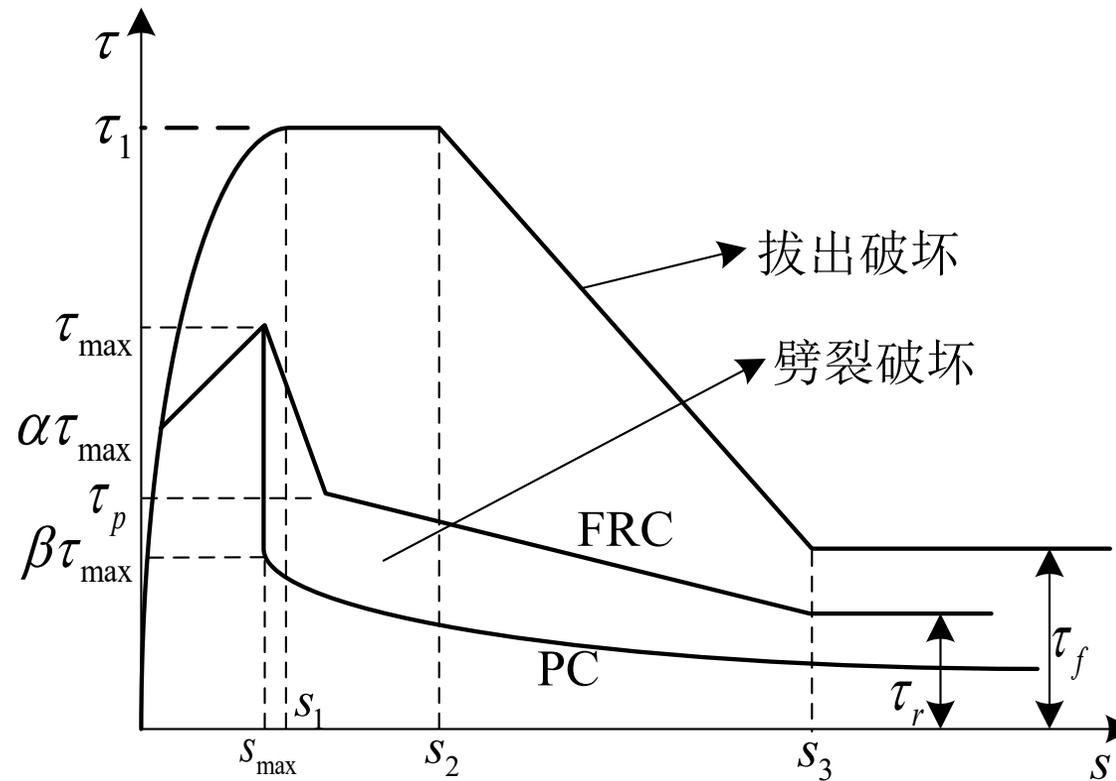
$$\begin{cases} \tau = \tau_{\max} (s / s_1)^{0.3} & (0 \leq s \leq s_1) \\ \tau = \tau_2 + [(15 - s)(\tau_{\max} - \tau_2) / (15 - s_1)] & (s_1 \leq s \leq 15) \end{cases}$$



高向玲模型

粘结本构关系

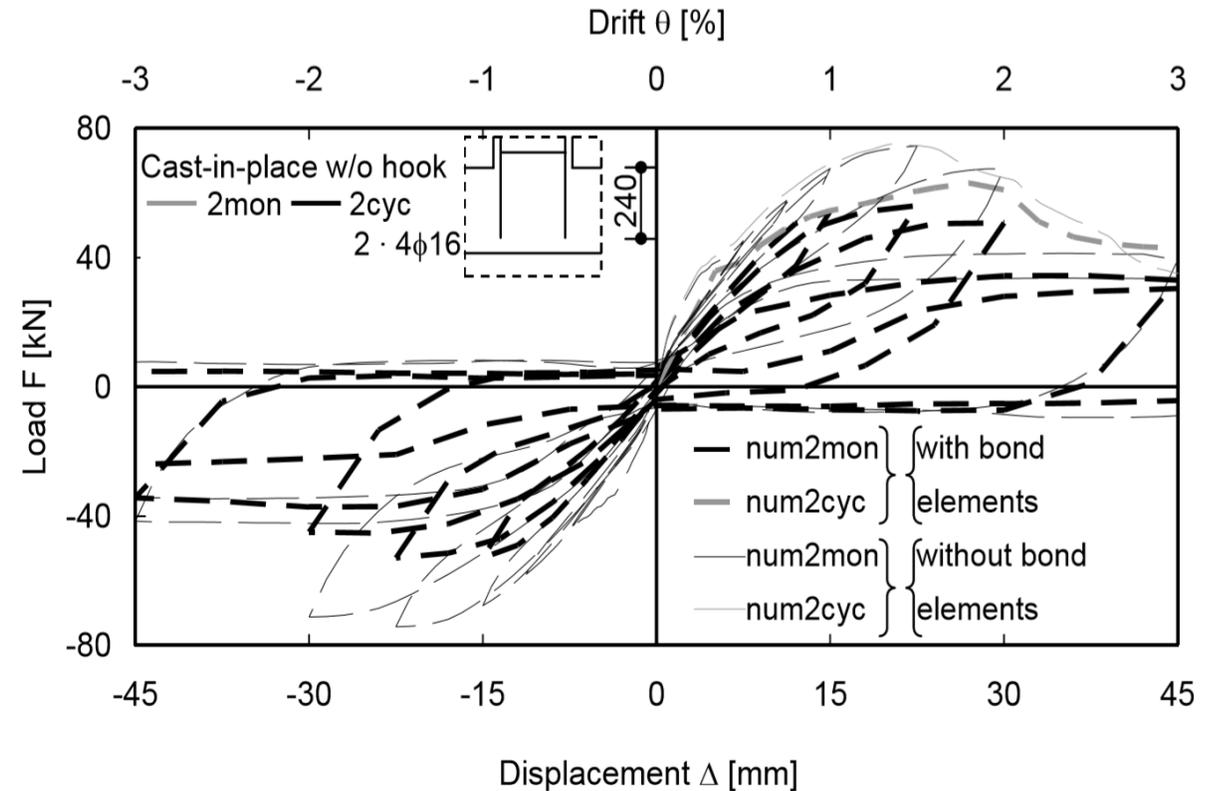
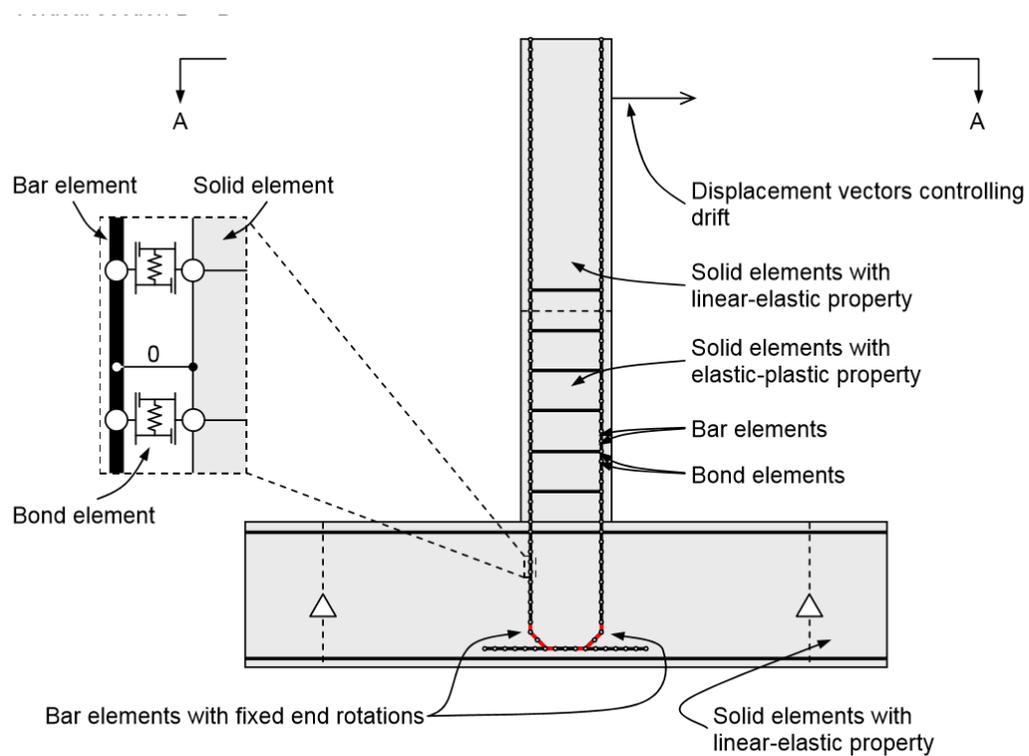
经验模型



Harajli模型：考虑了不同破坏形式的较大差异

粘结本构关系

数值模拟研究





**On poets, nerds, and
reinforced concrete of course.**