

# 第12章 约束混凝土

# 配筋的两种基本方式

- 混凝土构造中配设的受力钢筋有两种基本方式。
- 沿构件的轴力或主应力方向设置**纵向钢筋**，以确保抗拉承载力或增强抗压承载力，钢筋的应力与轴力方向一致，属直接配筋(第十一章)。
- 假如在轴压力或最大主压应力的垂直方向(即横向)配置箍筋，以约束其内部混凝土的横向膨胀变形，从而提升轴向抗压承载力，这种方式称**横向配筋**或间接配筋。

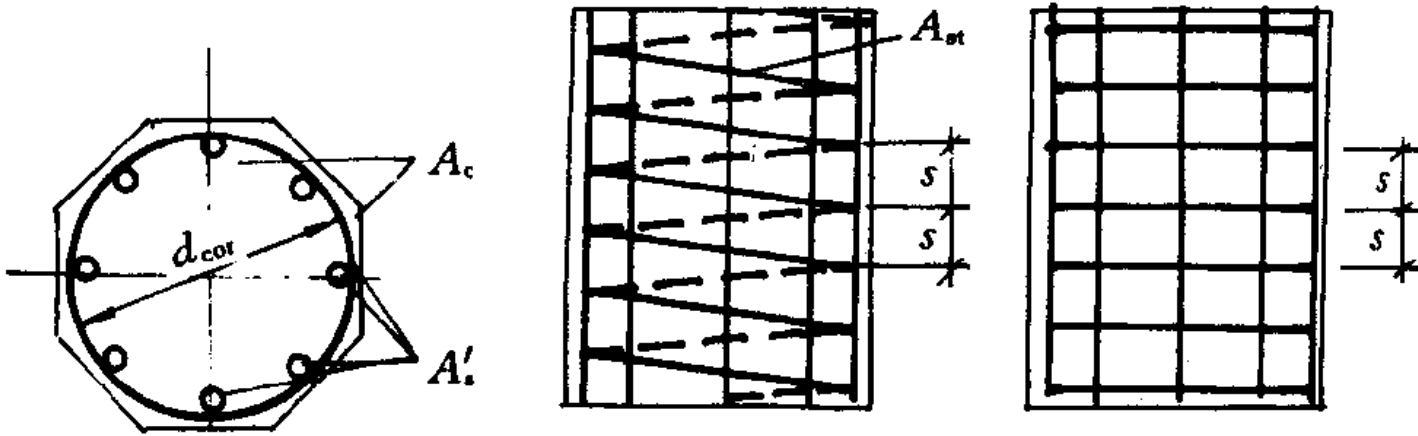
# 橫向配筋的作用

- 有多种橫向配筋的构造：如螺旋(圆形)箍筋、矩形箍筋、钢管、焊接网片等。
- 橫向配筋的主要作用是约束其内部混凝土的橫向变形。另外，混凝土构造承受局部作用的集中力，荷载面积下的混凝土也受到周围混凝土的约束。
- 约束混凝土处于三轴受压应力状态，提升了混凝土的强度和变形能力，成为工程中改善受压构件或构造中受压部分的力学性能的主要措施。

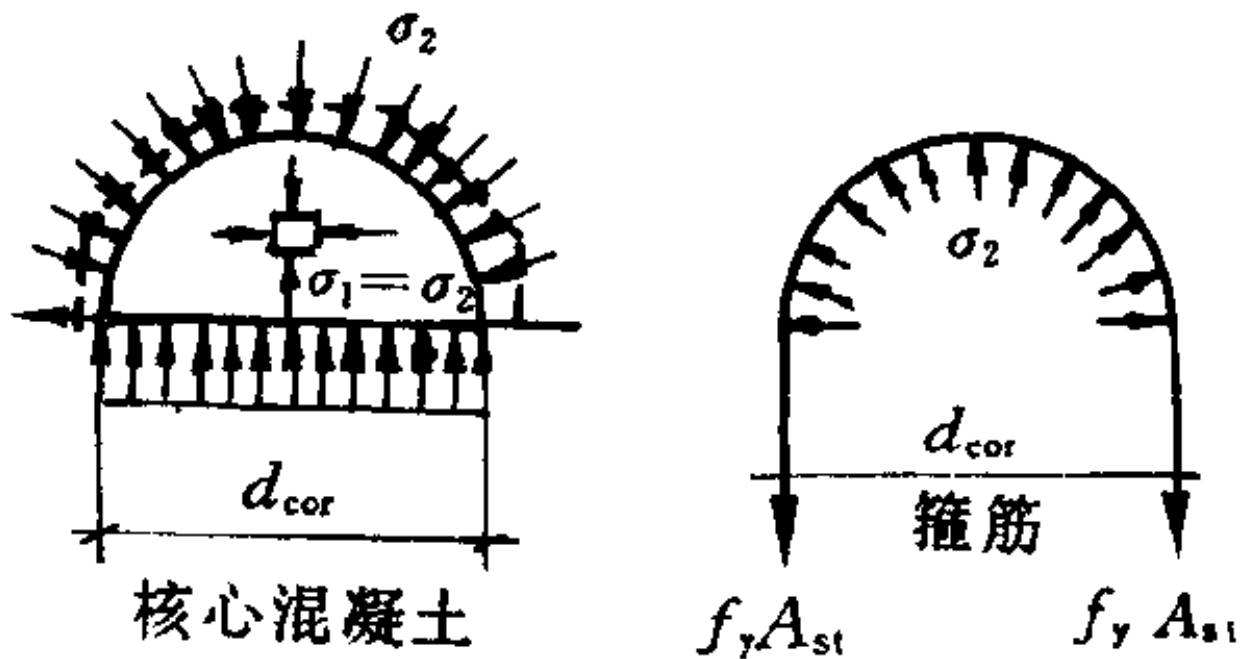
# 螺旋箍筋柱的构造和约束应力

- 受压柱内配设连续的螺旋形箍筋或者单独的焊接圆形箍筋，且箍筋沿柱轴线的间距较小 ( $s < 80\text{mm}$  和  $< d_{\text{cor}}/5$ )，对其包围的核芯混凝土 (面积为  $A_{\text{cor}}$ ，直径为  $d_{\text{cor}}$ ) 构成有效的约束，使其受力性能有较大的改善和提升。
- 螺旋箍筋柱的构造和约束应力见下面的图。

# 螺旋箍筋柱的构造



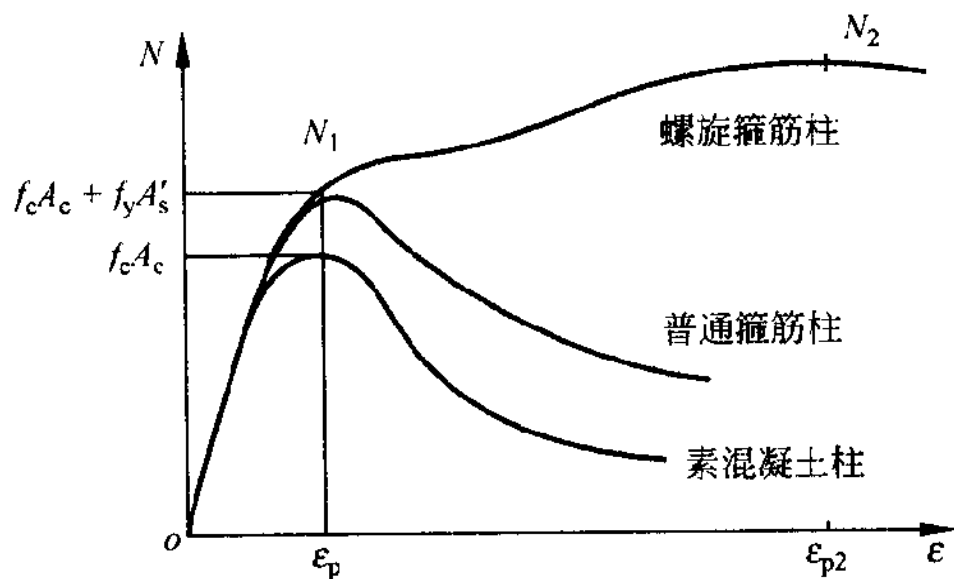
# 螺旋箍筋对混凝土的约束应力



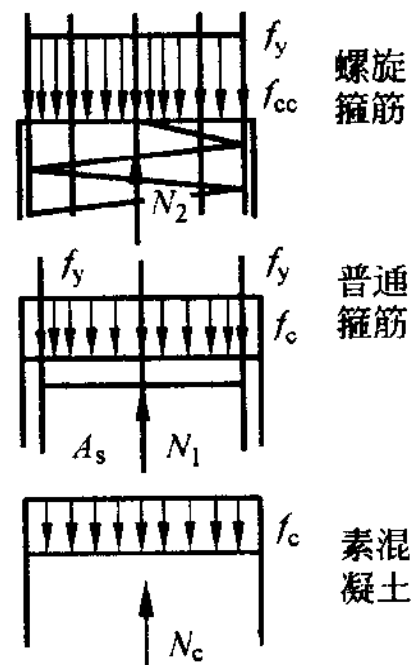
# 三种柱的性能对比

- 经过素混凝土柱、一般钢筋混凝土柱和螺旋箍筋柱等三种柱的性能对比，来阐明螺旋箍筋柱的受力机理和破坏过程。
- 素混凝土柱和一般钢筋混凝土柱(第11章 $\varepsilon_y < \varepsilon_p$ 的情况)受轴压力后的轴力-应变曲线和截面应力状态已如前述。
- 柱内的纵向钢筋( $A_s$ )虽能增强柱的抗压承载力，但对峰值应变和下降段曲线的影响很小(图12-2)。

# 三种柱的性能对比——续



(a)



(b)

图 12-2 三种柱的性能对比

(a)  $N-\epsilon$  曲线 (b) 应力状态



### 三种柱的性能对比——续

- 螺旋箍筋柱的受压轴力-应变曲线如图12-2。
- 当柱子应变低于素混凝土的峰值应变 ( $\varepsilon < \varepsilon_p$ ) 时，混凝土的横向膨胀变形(或泊松比 $\nu$ ，见第2章)很小，箍筋沿圆周的拉应力不大，对核芯混凝土的约束作用不明显，故轴力-应变曲线与一般箍筋柱的曲线接近。
- 当  $\varepsilon = \varepsilon_p$  时，螺旋箍筋柱的轴力 ( $N_1$ ) 仍与一般箍筋柱的极限轴力(式11-13)接近。

### 三种柱的性能对比——续

- 当柱的应变 $\varepsilon > \varepsilon_p$ 后，箍筋外围的混凝土(面积为 $A_c - A_{cor}$ )进入应力下降段，开始形成纵向裂缝，并逐渐扩展，发生表层剥落，这部分混凝土的承载力势必降低。
- 在此同步，核芯混凝土因泊松比增大而向外膨胀，对箍筋施加径向压应力( $\sigma_2$ ，图12-1(b))。箍筋对核芯混凝土的反作用应力使其处于三轴受压应力状态( $\sigma_1 = \sigma_2$ )，提升其纵向抗压强度( $\sigma_{3f} > f_c$ 第6章)。
- 所以，核芯混凝土和外围混凝土的总承载力在柱子应变增大后仍能缓缓上升。

## 三种柱的性能对比——续

- 继续加大柱子应变 $\varepsilon$ ，核芯混凝土的横向膨胀和箍筋应力不断增大。当箍筋应力到达其屈服强度时，它对混凝土的约束应力也到达最大值。此时，核芯混凝土的纵向应力还未达三轴抗压强度( $\sigma_3 < \sigma_{3f}$ )，柱的承载力还能增长。

### 三种柱的性能对比——续

- 今后，再增大柱子应变，箍筋应力 $f_{yt}$ 保持不变，核芯混凝土在定值约束应力下继续横向膨胀，直至纵向应力到达混凝土的三轴抗压强度，或称**约束混凝土抗压强度** ( $f_{cc} = \sigma_{3f}$ ) 时，柱子达极限承载力 $N_2$ 。
- 此时，柱的纵向应变已经很大，可达 $\varepsilon_{p2} = 10 \times 10^{-3}$ ，外围混凝土虽然未全部剥落，所剩压应力也极小了。

### 三种柱的性能对比——续

- 最终，核芯混凝土在三轴受压应力状态下发生挤压流动(第6章)，纵向应变加大，柱子明显缩短，横向膨胀使柱子的局部成为鼓形外凸，箍筋外露并被拉断，在  $N-\varepsilon$  曲线上形成下降段。
- 螺旋箍筋混凝土柱的承载力提升，尤其是变形性能的很大改善是其主要受力特点，工程中可加充分利用。

# 螺旋箍筋柱的极限承载力

- 从螺旋箍筋柱的受力过程 ( $N-\varepsilon$ 曲线) 中看到, 其极限承载力有两个控制值:
  - ① 纵筋受压屈服, 全截面混凝土达棱柱体抗压强度  $f_c$  ( $N_1$ )。此时混凝土的横向应变尚小, 可忽视箍筋的约束作用, 建立的计算式同式(11-13):

$$N_1 = f_c A_c + f_y A_s \quad (12-1)$$

式中:  $A_c$  为柱的全截面积。

## 螺旋箍筋柱的极限承载力——续

②箍筋屈服后，核芯混凝土达三轴抗压强度 $f_{cc}$  ( $N_2$ )。此时柱的应变很大，外围混凝土已退出工作，纵向钢筋仍维持屈服强度不变(图12-2(b))：

$$N_2 = f_{cc}A_{cor} + f_yA_s \quad (12-2)$$

式中： $f_{cc}$ 为约束混凝土抗压强度，也即核芯混凝土的三轴抗压强度( $\sigma_{3f}$ ,  $\sigma_1=\sigma_2$ )。 $A_{cor}$ 为核芯混凝土的截面积，取箍筋内皮直径 $d_{cor}$ 计算。

# 横向箍筋的体积率和配箍特征值

- 横向箍筋的体积率取为：

$$\mu_t = \frac{\pi d_{cor} A_{st}}{\frac{\pi}{4} d_{cor}^2 s} = \frac{4 A_{st}}{d_{cor} s} \quad (12-3)$$

- 乘以箍筋和混凝土的强度比值后，命定约束指标，称配箍特征值为：

$$\lambda_t = \mu_t \frac{f_{yt}}{f_c} = \frac{4 f_{yt} A_{st}}{f_c d_{cor} s} \quad (12-4)$$

- 式中： $A_{st}$ 为箍筋的截面积； $f_{yt}$ 为箍筋屈服强度； $d_{cor}$ 为螺旋箍筋的内皮直径； $s$ 为纵向间距。



# 核芯混凝土的最大约束压应力

- 根据图12-1(b)的平衡条件，当箍筋屈服时，核芯混凝土的最大约束压应力为：

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{2f_{yt}A_{st}}{f_c d_{cor}s} = \frac{1}{2}\lambda_t f_c \quad (12-5)$$

- 若核芯混凝土的三轴抗压强度按Richart公式(图6-7(a))近似取用，则得：

$$f_{cc} = f_c + 4\sigma_2 = (1 + 2\lambda_t)f_c \quad (12-6)$$

# 螺旋箍筋柱的极限承载力

- 将式(12-6)代入式(12-2)，并作变换后可建立：

$$\begin{aligned} N_2 &= (1 + 2\lambda_t) f_c A_{cor} + f_y A_s \\ &= f_c A_{cor} + 2f_{yt} \mu_t A_{cor} + f_y A_s \end{aligned} \quad (12-7)$$

- 上式右边的第2项显然是横向螺旋箍筋对柱子极限承载力的贡献。
- $\mu_t A_{cor}$  代表箍筋的折算面积。第2项中系数2表白，在一样的钢材体积(截面积 $\times$ s)和强度情况下，箍筋比纵筋的承载效率高出一倍。根据试验成果的分析，此系数的实测值为1.7~2.9，平均值约为2.0。

# 螺旋箍筋约束指标 $\lambda_t$ 的取值范围

- 螺旋箍筋柱的两个特征承载力的差值( $N_2-N_1$ )取决于约束指标 $\lambda_t$ 。若配箍量过少,出现 $N_2 < N_1$ 的情况,表明箍筋的约束作用不明显,与一般箍筋柱没有差别。故在设计螺旋箍筋柱时,要求 $N_2 \geq N_1$ ,以式(12-1)和(12-7)代入后得:

$$(1+2\lambda_t)f_c A_{cor} + f_y A_s \geq f_c A_c + f_y A_s$$
$$\lambda_t \geq \frac{A_c - A_{cor}}{2A_{cor}} \quad (12-8)$$

螺旋箍筋约束指标 $\lambda_t$ 的取值范围——续

- 另一方面，若 $(N_2-N_1)$ 差值过大，按 $N_2$ 设计的柱子在使用荷载作用下，外围混凝土已经接近或超出其应力峰值，可能发生纵向裂缝，甚至剥落，不符合使用要求。设计时一般限制 $N_2 \leq 1.5N_1$ ，故

$$\lambda_t \leq \frac{f_c(3A_c - 2A_{cor}) + f_{yt}A_s}{4f_cA_{cor}} \quad (12-9)$$

- 式(12-9)和(12-8)给出了螺旋箍筋柱约束指标上下限的理论值。

# 设计规范中对约束指标 $\lambda_t$ 的要求

- 在各国的设计规范中，对约束指标 $\lambda_t$ 的详细要求又有所不同，如下限取为：

- 中国《混凝土结构设计规范 GBJ10-89》：

$$\mu_t A_{cor} \geq 0.25 A_s \quad (12-10a)$$

- 美国 ACI 318M-89(1992):

$$\lambda_t \geq 0.45 \left( \frac{A_c}{A_{cor}} - 1 \right) \frac{f_c}{f_y} \quad (12-10b)$$

# 极限承载力 $N_2$ 公式的合用范围

- 需要阐明，螺旋箍筋提升了柱的极限承载力 $N_2$ ，只适合于轴心受压的短柱 ( $H/d \leq 12$ ， $H$ 为柱高， $d$ 为柱外径)。
- 对于长柱，因压屈失稳而破坏，主要取决于柱的弹性模量或变形。偏心受压柱截面上压应力不均匀分布，甚至为受拉区控制柱的破坏。在这些情况下，箍筋约束混凝土强度的提升于事无大补，式(12-7)不合用。

# 矩形箍筋柱

- 螺旋箍筋不太适合于工程中最常用的矩形截面和矩形组合截面，如T形、工字形截面，且螺旋箍筋加工成型费事，因而使用范围受到限制。
- 矩形截面构件内的箍筋大多沿截面周围平行布置，矩形组合截面也采用多种矩形箍筋构成平行于周围的横向筋。故**矩形箍筋**是最普遍的横向筋形式。

# 柱中箍筋的主要作用

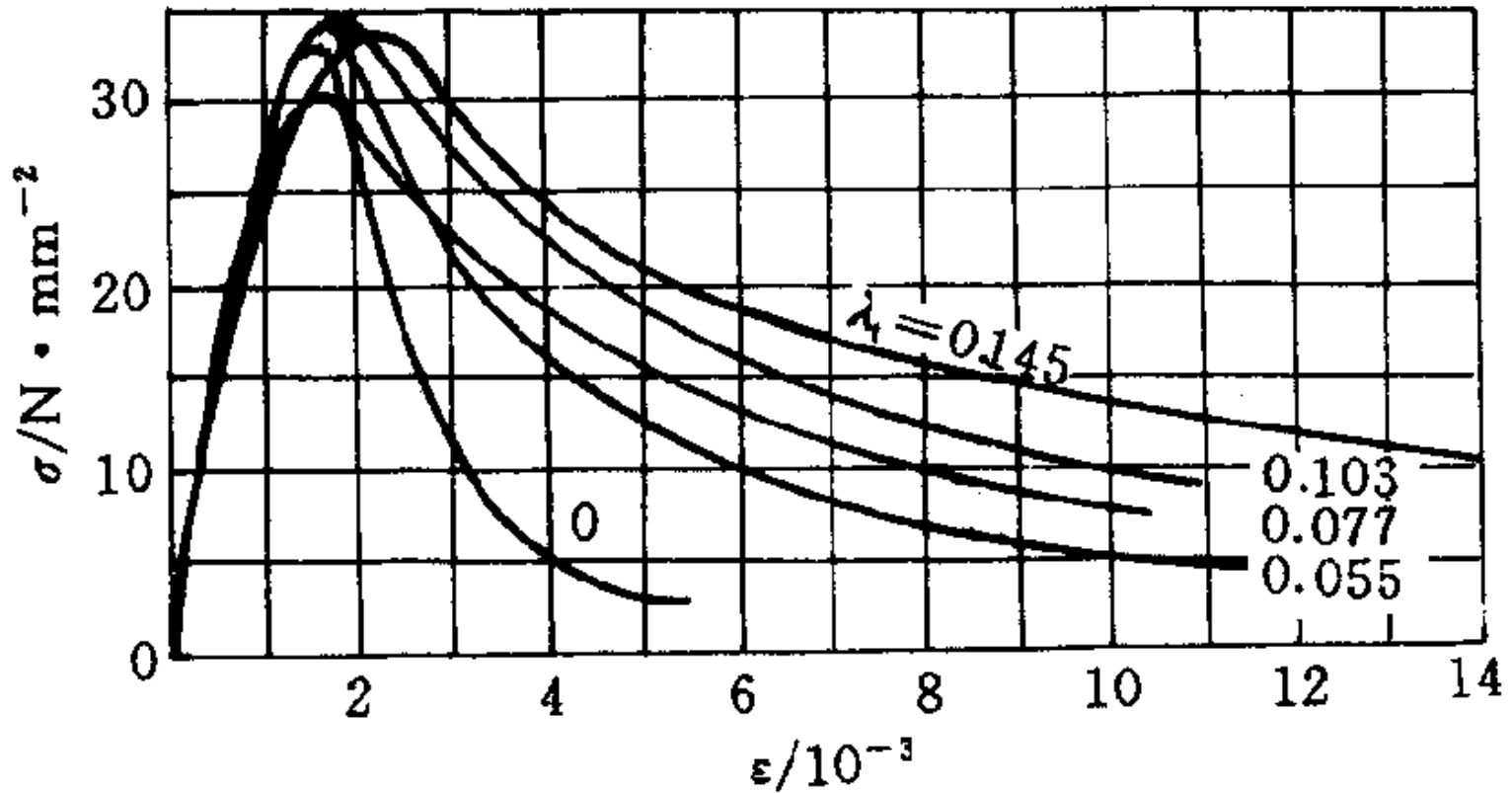
- 在柱等主要承受轴压力的构件中，箍筋的主要作用有：
  - ①箍筋与纵筋构成骨架(笼)，保持钢筋的形状和位置。
  - ②长久使用阶段，它可承受因混凝土收缩和环境温湿度变化等产生的横向应力，以预防或减小纵向裂缝。
  - ③在构件的承载力极限阶段，它减小了纵筋压屈的自由长度，使之充分发挥抗压强度等。
  - ④设置较多数量的箍筋，可提升构件的延性，有利于构造的抗震性能。



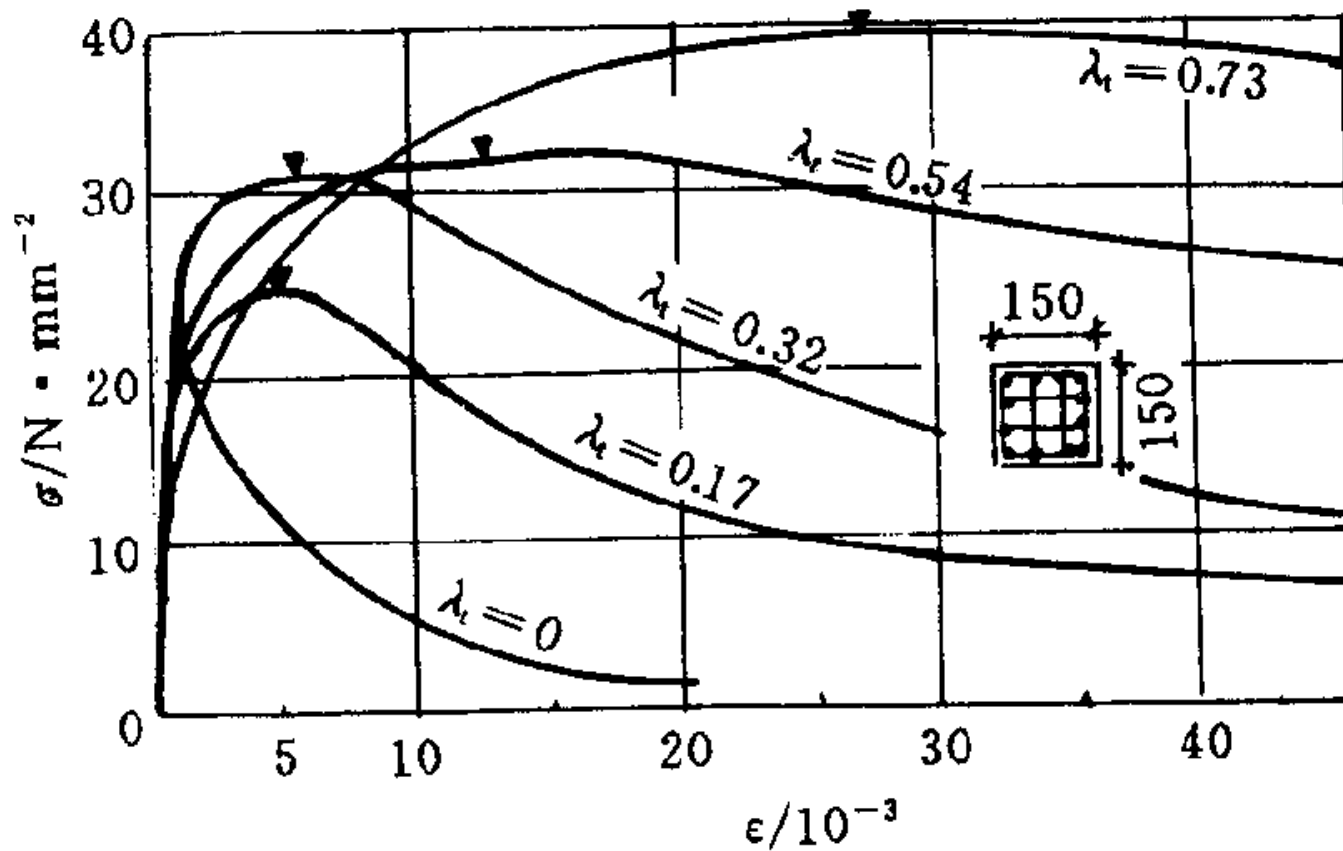
# 矩形箍筋约束混凝土的受力性能

- 矩形箍筋约束混凝土的受力性能已经有许多试验的和理论的研究，其受压应力-应变全曲线随主要影响原因(即约束指标 $\lambda_t$ )的增大而有很大的变化，由明显的陡峰曲线向平缓、丰满、且在极限强度附近有巨大变形平台的曲线过渡。
- 经典曲线如下面的图。

# 一般矩形箍筋约束混凝土的受压



# 矩形复合箍筋约束混凝土的受压



# 矩形箍筋的约束指标

- 矩形箍筋的约束指标一样是：

$$\lambda_t = \mu_t \frac{f_{yt}}{f_c} \quad (12-4)$$

- 式中： $\mu_t$ 为横向箍筋的体积配筋率，即箍筋包围的约束混凝土每单位体积中的箍筋体积。 $f_{yt}$ 为箍筋的抗拉(屈服)强度。 $f_c$ 为混凝土的(单轴)抗压强度。

# 约束混凝土应力-应变曲线的特征点

- 约束混凝土的配箍量不大( $\lambda_t \leq 0.3$ )时, 应力—应变曲线有明显的尖峰, 曲线上的特征点(图12-4)反应了不同的受力阶段。

# 约束混凝土的应力-应变曲线

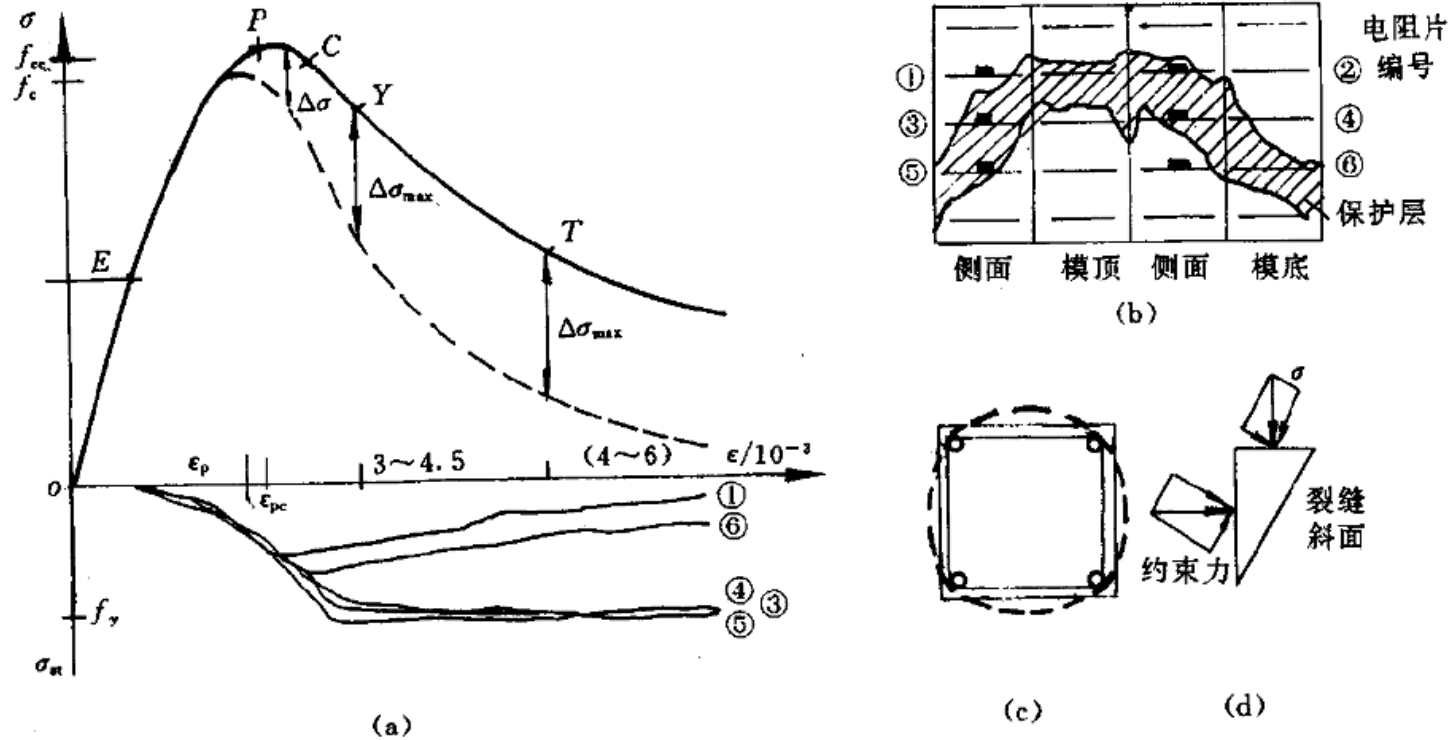


图 12-4 约束混凝土应力-应变曲线的特征点

(a) 试件应力和箍筋应力 (b) 表面展开图 (c) 箍筋外鼓 (d) 纵向力的平衡

# 约束混凝土受压破坏过程

- 试件开始受力后，应变与应力约成正比增长。应力增至E点 ( $\geq 0.4f_{cc}$ ) 后，混凝土出现塑性变形，曲线微凸。
- 当应力接近素混凝土的抗压强度 ( $f_c$ ,  $\varepsilon_p \approx (1500 \sim 1700) \times 10^{-6}$ ) 时，箍筋应变为  $\varepsilon_{st} \approx (400 \sim 600) \times 10^{-6}$ ，约束作用还不大，故约束混凝土和素混凝土的上升段曲线相近。
- 应力增长不多，即到达约束混凝土的峰点P，箍筋的应变为  $\varepsilon_{st} = (900 \sim 1200) \times 10^{-6}$ ，虽有较大增长，但仍未屈服。箍筋的约束作用增大，混凝土强度有所增长 ( $> f_c$ )

## 约束混凝土受压破坏过程——续

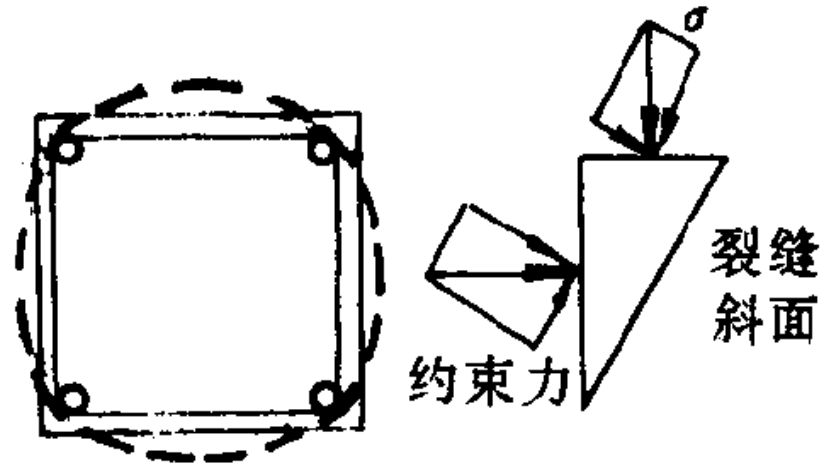
- 当应力-应变曲线进入下降段前后 ( $\varepsilon = (0.85 \sim 1.11) \varepsilon_{pc}$ )，试件出现第一条可见裂缝(C点)，裂缝为竖向，大致沿纵筋外缘。
- 之后，纵向裂缝扩展，新裂缝又出现，保护层混凝土的残余强度下降。同步，混凝土的横向应变 ( $\varepsilon'$ ) 和箍筋应变 ( $\varepsilon_{st}$ ) 加紧增长，一部分跨越裂缝的箍筋到达屈服强度(Y点)，不与裂缝相交的箍筋应力开始下降。此时试件的纵向应变约为  $\varepsilon = (3.0 \sim 4.5) \times 10^{-3}$ 。
- 箍筋屈服后来，对核芯混凝土的约束作用到达最大，约束混凝土超出素混凝土的应力值也达最大值 ( $\Delta\sigma_{max}$ ，图12-4)。



## 约束混凝土受压破坏过程——续

- 当应变达  $\varepsilon = (4\sim 6) \times 10^{-3}$  时，纵向短裂缝贯穿，形成临界斜裂缝(T点)。跨过斜裂缝的各个箍筋依次屈服，应力保持常值 ( $f_{yt}$ )，但应变增长。核芯混凝土往外鼓胀，挤压箍筋，使箍筋在水平方向弯曲、外鼓，外围混凝土开始剥落，纵筋和箍筋外露。
- 试件纵向力  $\sigma$  沿斜裂缝的滑动分力，由箍筋约束力的分力和裂缝面上残余的抗剪力所抵抗(图12-4(d))，仍保持一定残余强度。

# 箍筋外鼓及纵向力平衡



## 约束混凝土受压破坏过程——续

- 试件最终破坏时，箍筋已在核芯混凝土的挤压下逐一地、且沿箍筋全长屈服，甚至被拉断，断口有颈缩；外围混凝土严重开裂和成片剥落，核芯混凝土内部则密布纵向裂缝，沿斜裂缝有碾碎的砂浆碴片，但粗骨料一般不会破碎。

## 配箍量大 ( $\lambda_t=0.36\sim0.85$ ) 的情况

- 配箍量大 ( $\lambda_t=0.36\sim0.85$ ) 的约束混凝土，应力-应变曲线的形状 (图12-3 (b)) 和受力特点与上述试件有所不同。上升段曲线的斜率 (即弹性模量) 可能反而不大于低配箍柱的，原因是密布箍筋影响了外围混凝土的浇捣质量，且减弱了内外混凝土的结合。横向箍筋的增多加强了对核芯混凝土的约束作用，其三轴抗压强度可提升一倍，峰值应变 ( $\epsilon_{pc}$ ) 可提升十倍以上，形成上升段平缓、峰部有平台的应力-应变曲线。

## 配箍量大的情况——续

- 试件上第一条可见裂缝(C点)和箍筋屈服(T点)时的纵向应变值与前述试件( $\lambda_t \leq 0.3$ )的相近,但都不大于峰值应变,即发生在曲线的上升段( $\varepsilon < \varepsilon_{pc}$ )。试件破坏前没有明显的贯穿斜裂缝,纵向应变很大( $> (20 \sim 30) \times 10^{-3}$ ),横向变形急剧增大,箍筋外凸成近似圆形,保护层几乎全部剥落,纵筋压屈,箍筋外露,个别被拉断,核芯混凝土有很大的挤压流动和形变,出现局部鼓凸,与螺旋箍约束混凝土的破坏形态相同。

# 箍筋作用机理

- 矩形箍筋柱在轴压力的作用下，核芯混凝土的横向膨胀变形使箍筋的直线段产生水平弯曲(图12-5(a))。箍筋的抗弯刚度极小，它对核芯混凝土的反作用力(即约束力)很小。
- 另一方面，箍筋的转角部刚度大，变形小，两个垂直方向的拉力合成对核芯混凝土对角线( $45^\circ$ )方向的强力约束。故核芯混凝土承受的约束力是沿对角线的集中挤压力和沿箍筋分布的很小横向力。

# 非线性有限元法分析成果

- 用非线性有限元法分析矩形箍筋约束混凝土，试件临破坏时的截面应力分布如图12-5(c)。图上以箭头表达混凝土应力的方向( $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ )和大小。对角线单元①⑤⑨上 $\sigma_x = \sigma_y$ ，接近箍筋转角处因面积小而约束应力偏大；另两个内部单元②④上 $\sigma_x \neq \sigma_y$ ，但其数值与对角线单元的接近；接近表面的单元主要承受顺箍筋方向的约束应力，即单元③⑥的 $\sigma_y$ 和单元⑦⑧的 $\sigma_x$ ，另一方向的应力(即箍筋直线段的横向约束应力)很小。
- 此应力分布与前述箍筋约束作用的分析完全一致。

# 矩形箍筋受力分析

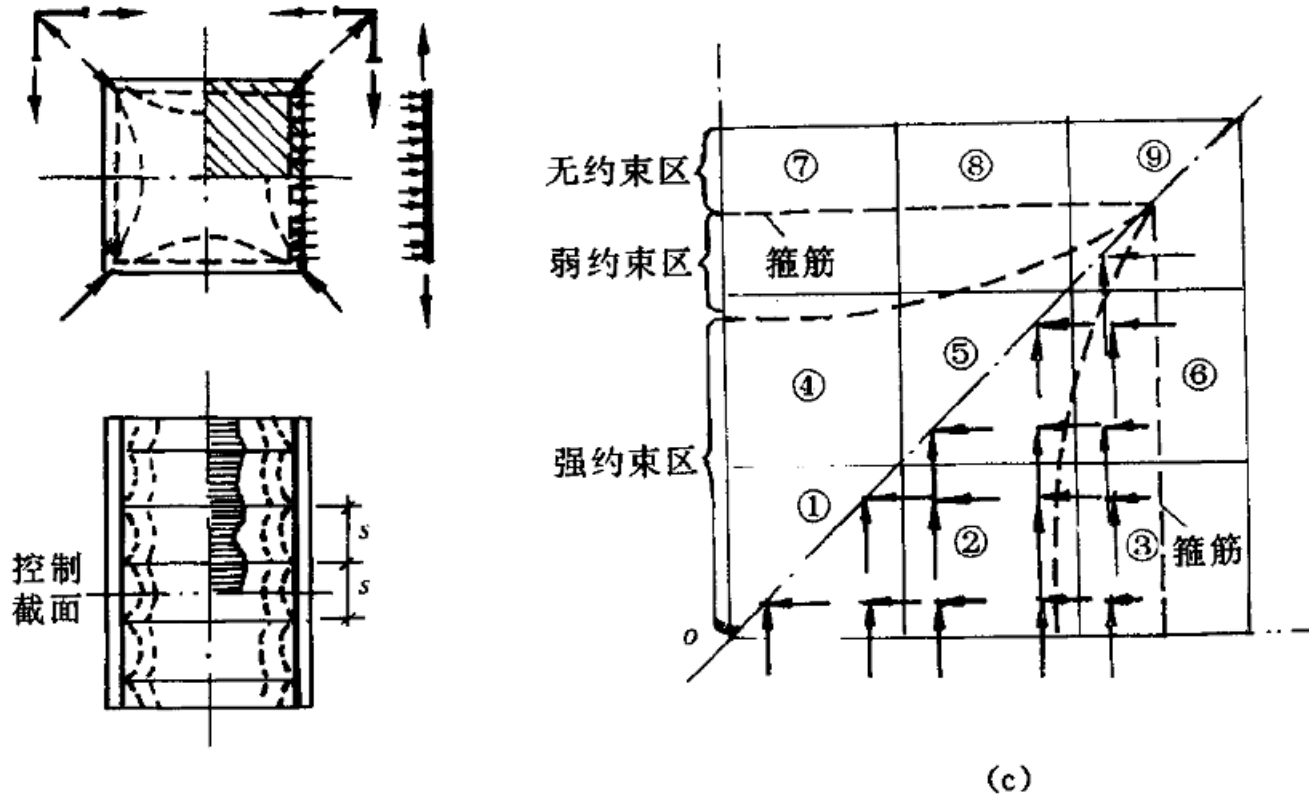


图 12-5 矩形箍筋受力分析

(a) 横向 (b) 纵向 (c) 水平约束应力分布<sup>[12-8]</sup>



# 柱截面的三个约束区

- 柱的截面按照箍筋约束作用的程度分作三个受力区：

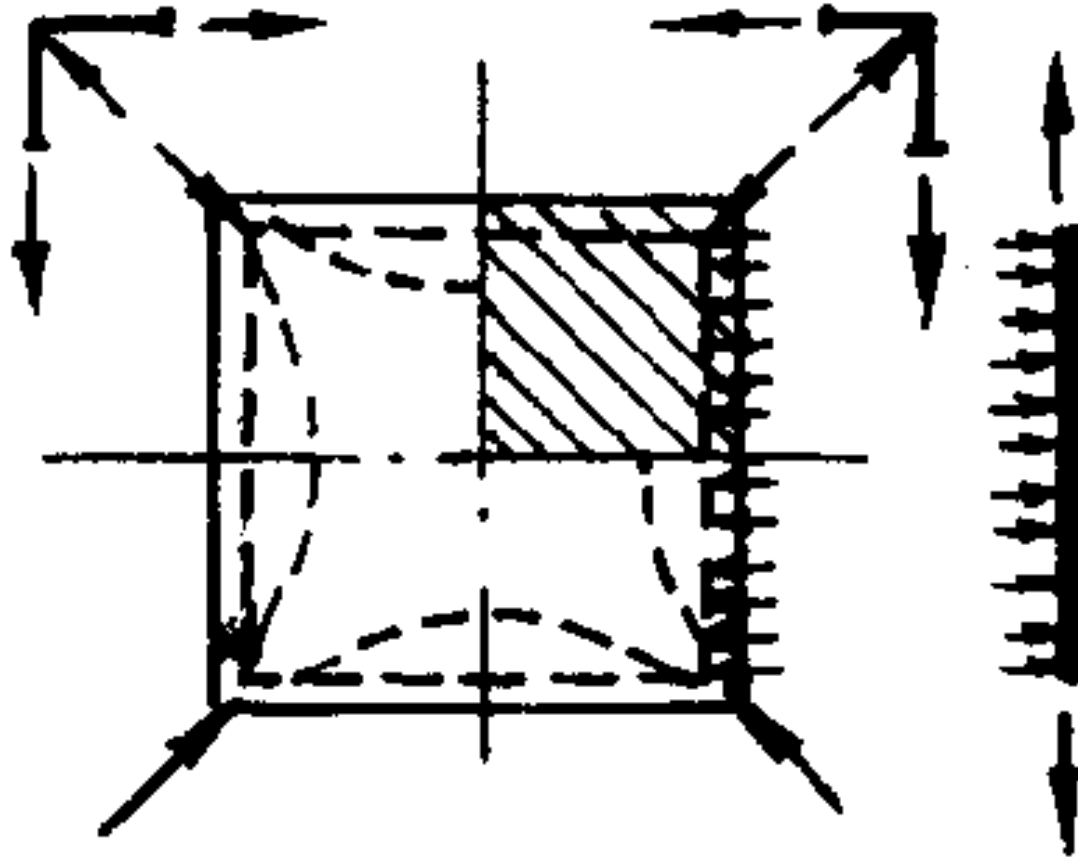
①**无约束区**：箍筋外围混凝土(即保护层)。

②**强约束区**：截面中央部分和指向四角的延伸带。该区域内的混凝土处于三轴受压应力状态( $\sigma_x \approx \sigma_y$ )，是约束混凝土强度和变形性能提升的主要原因。

## 柱截面的三个约束区——续

- ③**弱约束区**：处于以上二区之间的、沿箍筋直线段内侧分布区。此区内的混凝土基本上处于二轴受压应力状态，强度虽比单轴抗压强度高，但提升的幅度有限。
- 三个约束区面积的划分，首先取决于配箍数量( $\lambda_t$ )和构造，还随轴力和变形的增大而逐渐变化，即强约束区缩减，弱约束区增大。

# 柱截面的三个约束区图示



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/595203044323011330>