



# ANSYS Solid65 单元分析钢筋混凝土

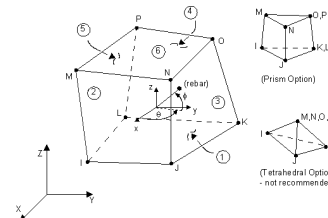
陆新征  
清华大学土木工程系  
2004

## 讲解内容

- ANSYS中Solid 65单元的理论背景及应用技巧，整体式钢筋模型
- MARC中混凝土模型的理论背景、组合式钢筋模型
- MARC的二次开发功能
  - ZERO, YIEL, ASSOC, WKSLP
  - UCRACK, TENSOF, USHRET
  - REBAR
  - HYPELA

## Solid65单元

- ANSYS里面专门建立了面向混凝土，岩石材料的单元——Solid65单元
- 在三维8节点等参元Solid45的基础上，增加了针对于混凝土的材性参数和整体式钢筋模型



## 常用FEA软件中的混凝土模型

- ANSYS: 弹塑性断裂模型+压碎破坏
- MARC: 弹塑性断裂模型+压碎破坏
- ABAQUS: 弹塑性断裂模型，弹塑性断裂损伤模型
- ADINA: 非线性弹性模型

## Solid 65的单元性态

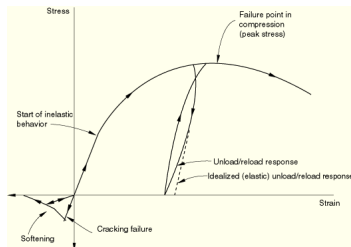
- 每个单元有 $2 \times 2 \times 2 = 8$ 个高斯积分点
- 使用分布固定裂缝模型，每个高斯积分点上最多可以有3条相互垂直的裂缝
- 可以使用整体式钢筋模型
- 破坏准则，弹塑性本构

## Solid 65的理论背景

- 《ANSYS Theory Reference》
  - Concrete
  - Element Library- Solid 65

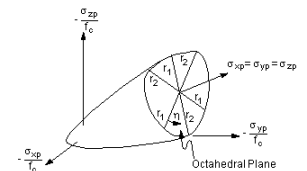
## 基本原理

- 用弹塑性本构关系描述混凝土的受压行为
- 用断裂软化本构关系描述混凝土的受拉软化行为
- 混凝土满足某一破坏准则，则认为被压碎



## Solid 65的理论基础

- Solid 65的破坏准则
  - Willam & Warnke 破坏曲面
- Solid 65的本构关系
  - 弹塑性+断裂本构关系



最大拉应力准则

## Solid 65的破坏准则

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0$$

- F: 应力组合
- S: 破坏曲面

## Solid 65的破坏曲面

### ■ Willam & Warnke 破坏曲面

Label	Description	Constant
$f_t$	Ultimate uniaxial tensile strength	3
$f_c$	Ultimate uniaxial compressive strength	4
$f_{cb}$	Ultimate biaxial compressive strength	5
$\sigma_h^a$	Ambient hydrostatic stress state	6
$f_1$	Ultimate compressive strength for a state of biaxial compression superimposed on hydrostatic stress state	7
$f_2$	Ultimate compressive strength for a state of uniaxial compression superimposed on hydrostatic stress state	8

## Solid 65破坏曲面缺省参数

$$\left. \begin{aligned} f_{bc} &= 1.2f_c \\ f_1 &= 1.45f_c \\ f_2 &= 1.725f_c \end{aligned} \right\} |\sigma_h^a| = \sqrt{3}f_c$$

WW破坏面的缺陷

高围压需要根据试验输入相应参数

## Solid 65破坏曲面分区

$$0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad \text{压-压-压}$$

$$\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad \text{拉-压-压}$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3 \quad \text{拉-拉-压}$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0 \quad \text{拉-拉-拉}$$

思考? 为什么要分区?

## Solid 65 压—压—压破坏分区

$$F = F_1 = \frac{1}{\sqrt{15}} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$S = S_1 = \frac{2r_2(r_2^2 - r_1^2) \cos \eta + r_2(2r_1 - r_2) [4(r_2^2 - r_1^2) \cos^2 \eta + 5r_1^2 - 4r_1r_2]^{\frac{1}{2}}}{4(r_2^2 - r_1^2) \cos^2 \eta + (r_2 - 2r_1)^2}$$

$$\cos \eta = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{2} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\underline{r_1 = a_0 + a_1 \xi + a_2 \xi^2} \quad \underline{r_2 = b_0 + b_1 \xi + b_2 \xi^2} \quad \xi = \frac{\sigma_h}{f_c}$$

## 参数标定(1)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = f_t, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = 0) \\ \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = 0, \sigma_2 = \sigma_3 = f_{bc}) \\ \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = -\sigma_h^a, \sigma_2 = \sigma_3 = -\sigma_h^a - f_t) \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_t & \xi_t^2 \\ 1 & \xi_{cb} & \xi_{cb}^2 \\ 1 & \xi_1 & \xi_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

$$\xi_t = \frac{f_t}{3f_c} \quad \xi_{cb} = -\frac{2f_{cb}}{3f_c} \quad \xi_1 = -\frac{\sigma_h^a}{f_c} - \frac{2f_t}{3f_c}$$

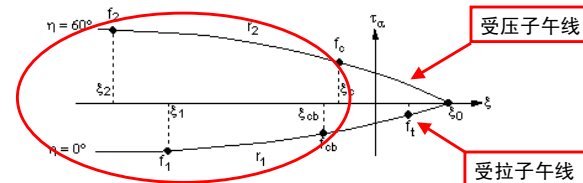
## 参数标定(2)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = 0, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = f_c) \\ \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = \sigma_2 = -\sigma_h^a, \sigma_3 = -\sigma_h^a - f_2) \\ \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0) \end{array} \right\} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_c & \xi_c^2 \\ 1 & \xi_2 & \xi_2^2 \\ 1 & \xi_0 & \xi_0^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$

$$\xi_c = -\frac{f_c}{3f_c} \quad \xi_2 = -\frac{\sigma_h^a}{f_c} - \frac{f_2}{3f_c}$$

$$\xi_0 = \frac{-a_1 + \sqrt{a_1^2 - 4a_0a_2}}{2a_0}$$

## Solid 65 压—压—压破坏分区



- 在该分区下混凝土将压碎 (Crush)
- $(\sigma_h^a)$  应该等于或大于结构可能受到的最大的静水压力

## Solid 65 拉—压—压破坏分区

- 基本还是沿用WW破坏准则曲面形状

$$F = F_2 = \frac{1}{\sqrt{15}} [(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$S = S_2 = \left(1 - \frac{\sigma_1}{f_t}\right) \frac{2p_2(p_2^2 - p_1^2)\cos\eta + p_2(2p_1 - p_2)[4(p_2^2 - p_1^2)\cos^2\eta + 5p_1^2 - 4p_1p_2]^{\frac{1}{2}}}{4(p_2^2 - p_1^2)\cos^2\eta + (p_2 - 2p_1)^2}$$

$$p_1 = a_0 + a_1\chi + a_2\chi^2 \quad p_2 = b_0 + b_1\chi + b_2\chi^2$$

$$\chi = \frac{1}{3}(\sigma_2 + \sigma_3) \quad \xi = \frac{\sigma_h}{f_c}$$

## Solid 65 拉—拉—拉破坏分区

- 极限抗拉强度为 $f_t$
- 在垂直拉应力方向可能分别出现一条裂缝

$$F = F_4 = \sigma_i, i=1,2,3$$

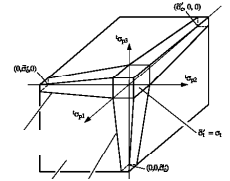
$$S = S_4 = \frac{f_t}{f_c}$$

## Solid 65 拉—拉—压破坏分区

- 不再使用WW破坏曲面
- 极限抗拉强度随 $\sigma_3$ 线性降低
- 在于垂直拉应力方向可能分别各出现一条裂缝

$$F = F_3 = \sigma_i, i=1,2$$

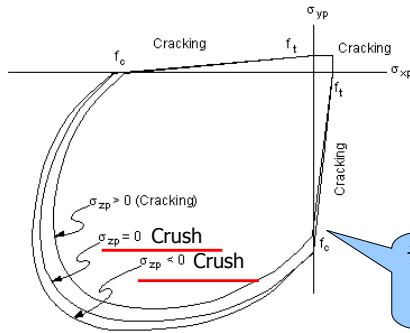
$$S = S_3 = \frac{f_t}{f_c} \left(1 + \frac{\sigma_3}{f_c}\right)$$



## 讨论

- 为什么ANSYS对WW破坏面进行改动?
- 解释
  - 混凝土材料本身是一种非常复杂的材料, 受压破坏和受拉破坏表现完全不同
  - WW破坏曲面中没有区分这两种破坏形式
  - 实际程序计算中却需要加以区分
  - 人为强制在压-压-拉分区和拉-拉-压分区中按开裂处理
- 体现了理论研究和实用计算程序编写之间的差异

## 破坏模式



该图ANSYS理论手册有错误

## Solid 65的初始刚度矩阵

$$[D] = \left( 1 - \sum_{i=1}^{N_r} V^R \right) [D^e] + \sum_{i=1}^{N_r} V^R [D^r]_i$$

$$[D^e] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & (1-\nu) & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & (1-\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{Bmatrix} = [D^e] \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{Bmatrix}$$

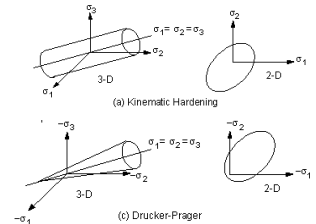
## 塑性行为

- 屈服面
- 流动法则
  - 关联流动
- 硬化法则
  - Von Mises
    - 等强硬化, 随动硬化
  - Druck-Prager
    - 理想弹塑性

简单的塑性模型

## Solid 65的本构关系

- 弹塑性行为
- 受拉弹性
- 受压可以选择一些塑性模型:
  - Von Mises屈服面
  - Drucker-Prager屈服面
    - 理想弹塑性

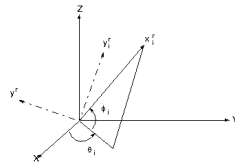


## 应力坐标变换

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \cos \theta_1 \cos \phi_1 \\ \sin \theta_1 \cos \phi_1 \\ \sin \theta_1 \end{Bmatrix} x_1' = \begin{Bmatrix} l_1' \\ l_2' \\ l_3' \end{Bmatrix} x_1'$$

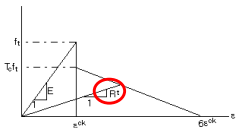
$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1' & l_2' & l_3' \\ m_1' & m_2' & m_3' \\ n_1' & n_2' & n_3' \end{bmatrix}$$

$$[T'] = \begin{bmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 & a_{13}^2 & a_{11}a_{12} & a_{12}a_{13} & a_{11}a_{13} \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 & a_{23}^2 & a_{21}a_{22} & a_{22}a_{23} & a_{21}a_{23} \\ a_{31}^2 & a_{32}^2 & a_{33}^2 & a_{31}a_{32} & a_{32}a_{33} & a_{31}a_{33} \\ 2a_{11}a_{21} & 2a_{12}a_{22} & 2a_{13}a_{23} & a_{11}a_{22} + a_{12}a_{21} & a_{12}a_{23} + a_{13}a_{22} & a_{11}a_{23} + a_{13}a_{21} \\ 2a_{21}a_{31} & 2a_{22}a_{32} & 2a_{23}a_{33} & a_{21}a_{32} + a_{22}a_{31} & a_{22}a_{33} + a_{23}a_{32} & a_{21}a_{33} + a_{23}a_{31} \\ 2a_{11}a_{31} & 2a_{12}a_{32} & 2a_{13}a_{33} & a_{11}a_{32} + a_{12}a_{31} & a_{12}a_{33} + a_{13}a_{32} & a_{11}a_{33} + a_{13}a_{31} \end{bmatrix}$$



## 一条裂缝的本构矩阵

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)} \begin{bmatrix} R^t(1+\nu) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E & \frac{1}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{1}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2} \end{bmatrix}$$



## 二条裂缝的本构矩阵

$$[D_c^{ck}] = E \begin{bmatrix} R^t/E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R^t/E & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_t}{2(1+\nu)} \end{bmatrix}$$

## 开裂后的混凝土本构矩阵

- 开裂后需要对应力进行坐标变换，将整体坐标系中的应力转变到裂缝局部坐标系下
- 此时混凝土的刚度矩阵变为

$$[D_c] = [T^{ck}]^T [D_c^{ck}] [T^{ck}]$$

## 三条裂缝的本构矩阵

$$[D_c^{ck}] = E \begin{bmatrix} R^1/E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R^1/E & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R^1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_1/(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_1/(2(1+\nu)) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_1/(2(1+\nu)) \end{bmatrix}$$

该矩阵ANSYS理论手册有错误

## 裂缝闭合后的混凝土本构矩阵

$$[D_c^{ck}] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} (1-\nu) & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_c \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix}$$

裂缝闭合判据：开裂应变 < 0

## 开裂应变的计算

$$e_c^{ck} = \begin{cases} e_1^{ck} - \frac{\nu}{1-\nu} (e_2^{ck} + e_3^{ck}) & \text{只有一条裂缝} \\ e_1^{ck} + \nu e_2^{ck} & \text{有两条裂缝} \\ e_1^{ck} & \text{有三条裂缝} \end{cases}$$

$$\{e_c^{ck}\} = [T^{ck}]\{e_n^e\} \quad \{e_n^e\} = \{e_{n-1}^{el}\} + \{\Delta e_n\} - \{\Delta e_n^{th}\} - \{\Delta e_n^{pl}\}$$

- n = substep number
- $\{e_{n-1}^{el}\}$  = elastic strain from previous substep
- $\{\Delta e_n\}$  = total strain increment (based on  $\{\Delta u_n\}$ , the displacement increment over the substep)
- $\{\Delta e_n^{th}\}$  = thermal strain increment
- $\{\Delta e_n^{pl}\}$  = plastic strain increment

## Solid 65实际应用





## Solid65分析的核心问题

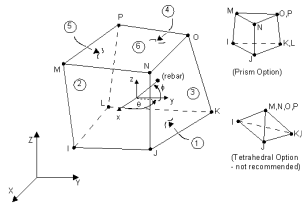
正确设定参数!  
确保计算收敛!



## Solid65单元的实参数

- 材料号 × 3: 定义钢筋材料编号
- 体积配筋率 × 3
- 配筋角度THI
- 配筋角度PHI

Figure 65.1. SOLID65 3-D Reinforced Concrete Solid

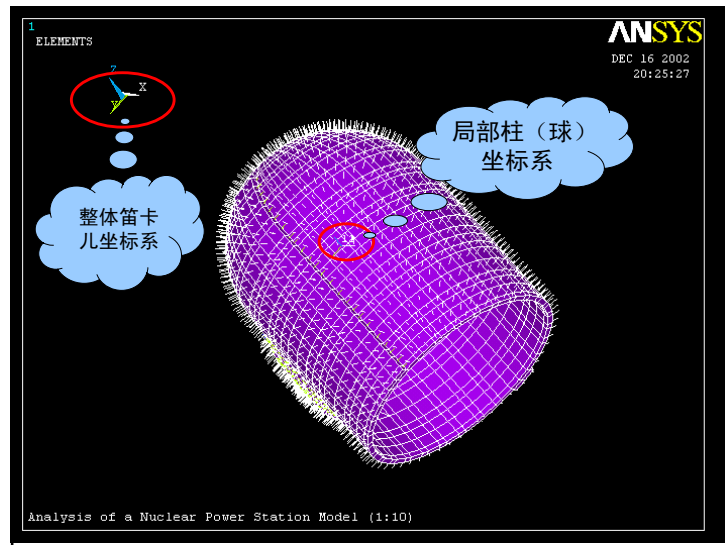


## 整体钢筋模型下的本构矩阵

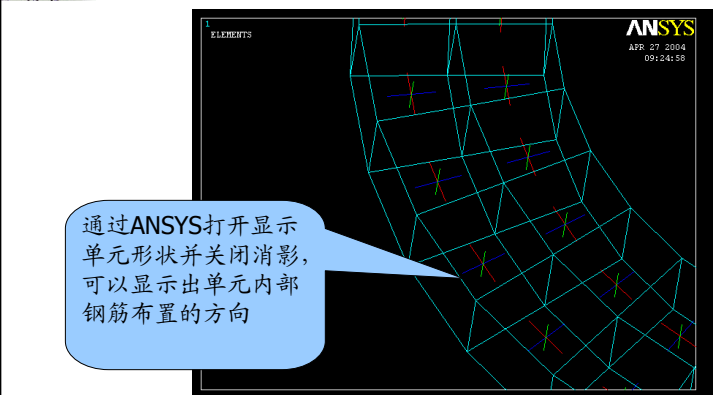
$$D_{RC} = D_C + D_{Rebar} = D_C + E_s \begin{bmatrix} \rho_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## Solid65的单元坐标

- 在未指定单元坐标的情况下，单元坐标系的坐标轴和整体坐标系的坐标轴平行
- 如果需要调整单元坐标系，应建立相应的局部坐标系并将其赋予Solid65单元



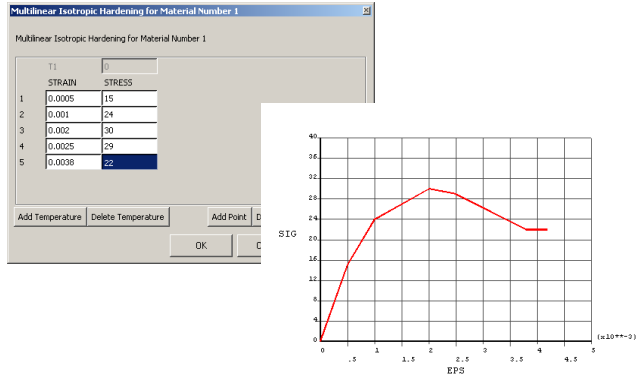
## 配筋方向



## Solid65单元的本构关系

- 可以使用以下本构关系：
  - 等强硬化模型 (Multilinear Isotropic Hardening)
  - 随动硬化模型 (Multilinear Kinematic Hardening)
  - Drucker-Prager模型 (DP模型)
    - DP模型在混凝土中为理想弹塑性模型

## 输入参数

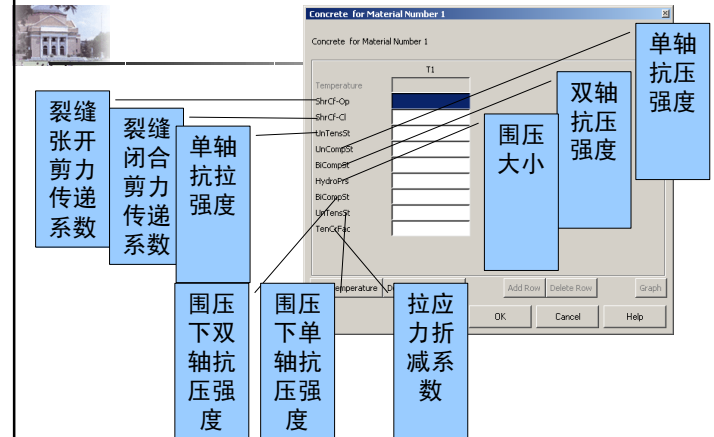


## Solid65单元的本构模型 (2)

- 关于下降段的问题
  - 在实际混凝土中都有下降段，但是在计算的时候要特别小心下降段的问题。
  - 下降段很容易导致计算不收敛，有时为了计算的收敛要避免设置下降段，采用rush模型。
  - 利用最大压应变准则来判断混凝土是否破坏

## Solid65单元中的破坏准则

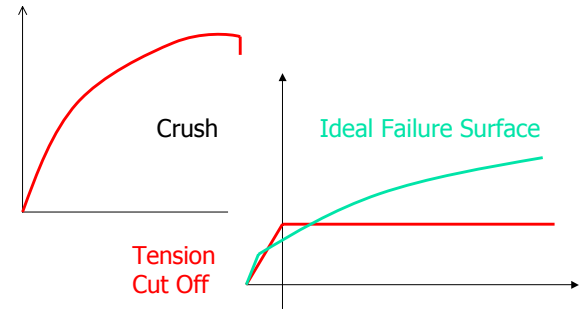
- 采用Willam&Warnke五参数破坏准则
- 需要参数:
- 单轴抗拉强度，单轴，双轴抗压强度
- 围压压力，在围压作用下的双轴，单轴抗压强度



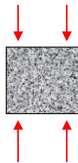
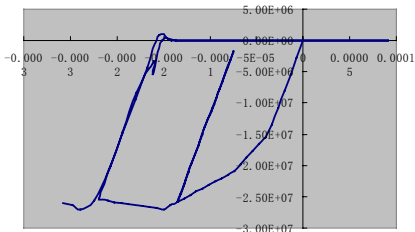
## 破坏准则vs.本构关系

- Solid65本构关系的判断在破坏准则之前
- 在一般情况下，不推荐使用压碎判据（Crush），而使用塑性或塑性下降段
  - 在Concrete Data Table里面，设定单轴抗压强度 = -1，后面围压等4个参数不要设定
  - 此时相当于是带有“拉力截断”(Tension Cut Off)的Von Mises模型，尽管与标准的混凝土本构模型有一定差异，但是在围压不是很大的情况下仍然可以取得较好结果

## Crush & Tension Cut Off



## 混凝土立方体模拟试验

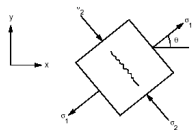


## Solid65中的裂缝模型

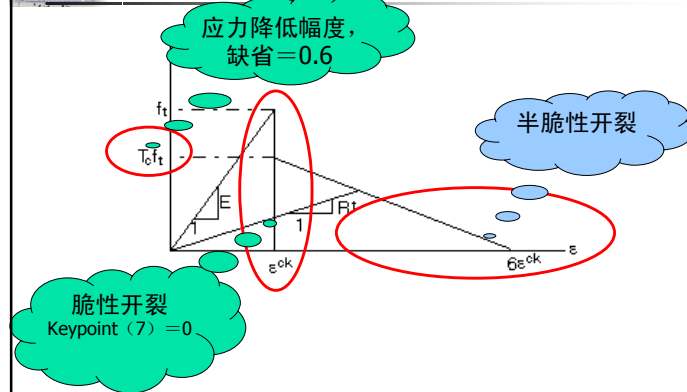
- 弥散固定裂缝模型(Smeared Fixed Crack Model)
- 采用Rankine最大拉应力准则，达到最大拉力就开裂，裂缝方向不随主应变方向变化
- 正交裂缝模型，一个高斯点上可以有3条正交裂缝

## 裂缝模型

- 第一条裂缝和第一主应力方向垂直
- 后续分析需将应力转到裂缝方向
- 裂缝方向正应力由等效单向应力应变曲线得到
- 裂缝方向剪应力  $\gamma = \beta \tau G$



## 脆性开裂vs.半脆性开裂

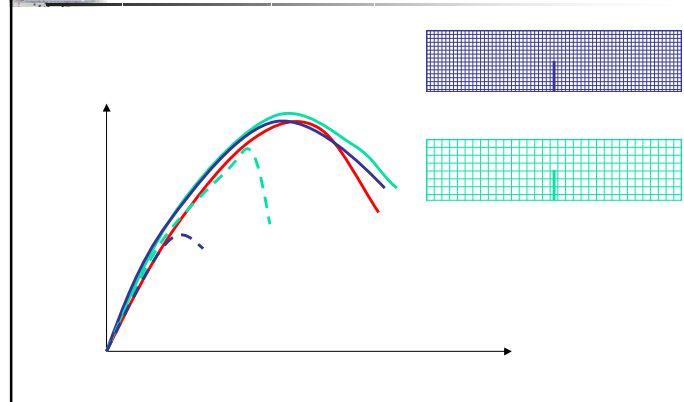


## 脆性开裂vs.半脆性开裂

- 推荐使用半脆性开裂模型
- 收敛性好
- 对网格依赖性小
- 从混凝土断裂能估计  $T_c$

$$T_c = \frac{G_f - f_t \epsilon_{cr}}{5 f_t \epsilon_{cr}}$$

## 脆性模型—半脆性模型比较



## 裂面剪力传递系数

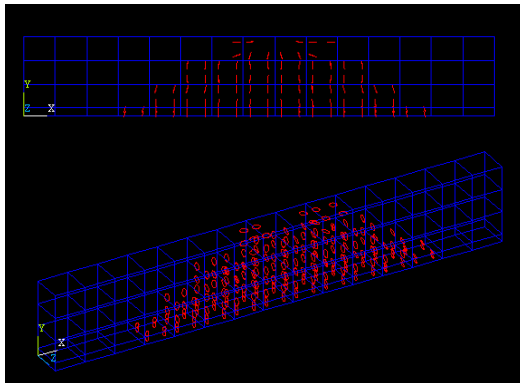
$$G' = \beta G$$

- $\beta_{op}$  对最终计算结果影响重大
- $\beta_{op}$  取值
  - 对于一般梁: 0.5
  - 对于深梁: 0.25
  - 对于剪力墙: 0.125
- $\beta_d = 0.9 \sim 1.0$

## ANSYS裂缝模型的说明

- ANSYS的裂缝模型相对比较粗糙, 使用时应加以慎重考虑
- 受拉软化给的是基于固定极限应变的软化模型, 比较适用于配筋合适的钢筋混凝土构件, 对素混凝土构件有很强的网格依赖性, 效果一般不好
- ANSYS的裂面受剪模型为恒定的裂面剪力传递系数模型, 在模拟受剪破坏时, 剪力传递系数选择不当往往会高估构件受剪承载力

## ANSYS中裂缝的绘制



## 混凝土与其他材料的组合

- 钢筋
- 型钢
- 纤维布

## 混凝土与钢筋的组合

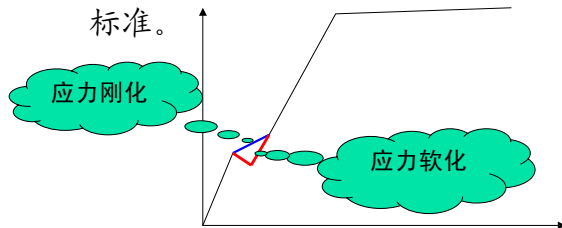
- 整体式模型
  - 直接利用Solid65提供的实参数建立钢筋模型
- 分离式模型，位移协调
  - 使用杆件单元模拟钢筋，混凝土和钢筋共用节点
- 分离式模型，界面单元
  - 在杆件单元和混凝土单元之间加入界面单元进行模拟

## 混凝土与钢筋组合模型的选取

- 在条件允许的情况下，优先使用整体式模型
- 滑移影响可以通过折减钢筋弹模加以模拟
- 在类似节点受往复荷载作用的问题，由于滑移严重，必须使用界面单元。
- 预应力考虑预应力损失，必须使用界面单元。

## 应力软化和应力刚化的问题

- 整体模型，应力刚化
- 分离模型，应力软化
- 如有应力软化问题，推荐使用位移收敛标准。

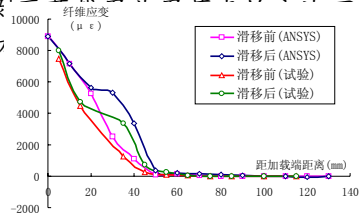


## 混凝土与型钢组合

- 位移协调，共用节点
  - 一般用于钢骨混凝土结构，会过高估计刚度
- 使用弹簧单元
  - 对于叠合梁，使用combine39单元，可以算得很准
- 使用接触单元
  - 推荐使用点对点接触单元，对于钢管混凝土比较重要。
  - 钢管混凝土在高轴压比下很难算准

## 混凝土和FRP布的组合

- 推荐使用共用节点的方法分析
- 原因
  - FRP布剥离全过程分析在ANSYS中比较困难
  - FRP布初始记录其应变可以比较准确地



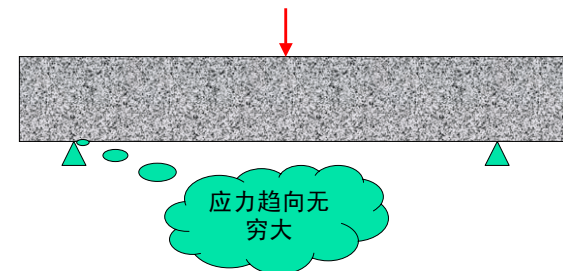
## ANSYS建模中需要注意的问题

- 单元尺寸大小
  - 基于最大开裂应力准则，单元越细，应力集中越严重，开裂出现越早
- 解决方法
  - 使用半脆性裂缝模型，减小单元尺寸影响
  - 控制网格大小，单元尺寸不宜小于5cm
  - 控制网格划分，在容易出现应力集中的部位要避免过小的单元出现

## ANSYS建模中需要注意的问题

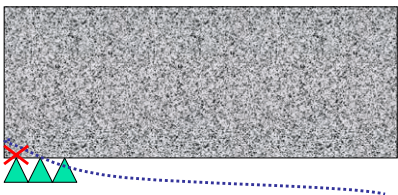
- 施加支座
  - 支座是个非常严重的应力集中部位，尽量避免把约束直接施加在支座上
- 解决方法
  - 加弹性垫块，利用圣维南原理减小应力集中
  - 加大支座部位单元尺寸，减小应力集中

## 常见支座错误(1)

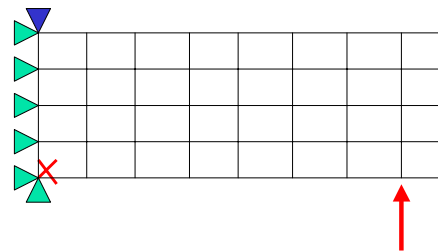




## 常见支座错误(2)



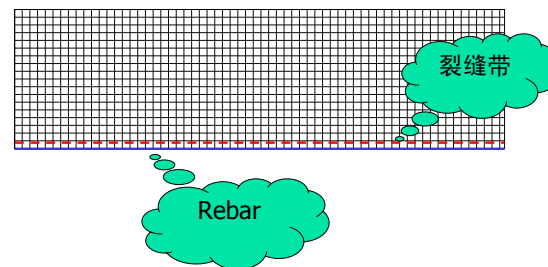
## 常见支座错误(3)



## ANSYS建模中需要注意的问题

- 单元网格控制
  - 尽量使用六面体单元，尽量减少四面体单元的出现
- 钢筋选择
  - 尽量使用整体式钢筋模型，在使用分离钢筋模型的时候，注意单元尺寸大小

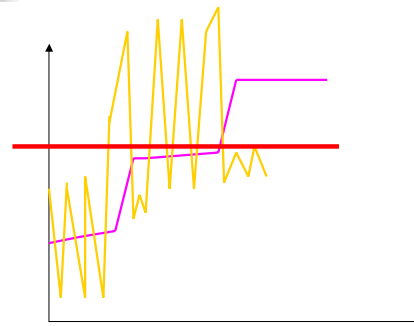
## 分离钢筋模型的问题



## ANSYS建模中需要注意的问题

- 正确选择收敛准则
  - 位移收敛准则用无穷范数，力收敛准则用2范数
  - 推荐使用位移收敛准则，特别是在出现应力软化或需要计算下降段的时候
  - 误差控制一般可以在2~3%之间，在开裂前后应适当放宽收敛准则，破坏前后更需要放宽

## 位移收敛准则



## 小结：ANSYS混凝土本构特点

- 简单的塑性模型，单向双向应力状态可以，不适用于高围压。
- 简单的基于应变的受拉软化模型，适用于配筋合适的混凝土单元，不很适用于素混凝土或少筋混凝土
- 简单的固定裂面剪力传递系数，适用于简单的裂面受剪，不适用于复杂裂面受剪
- 简单的往复荷载模型，效果一般

## 关于ANSYS分析效果

- 受弯——强度一般都比较准，刚度要差一些
- 受剪——精度依赖于裂面剪力传递系数，要调整。
- 受轴压——高轴压比，高围压，很难算准
- 往复荷载——效果一般都不是理想，除非很精细地调整参数