Introduction to RADIOSS for Impact

第五章:　　材料

材料本构关系

失效模式

本节介绍

- Law 2 – Johnson-Cook模型
- Law 27 – 弹塑性脆性材料
- Law 36 – 弹塑性列表
- Law 42 – Ogden（超弹性材料）
- Law 70 – 泡沫材料

MATERIAL LAWS:各向同性弹性

Description	Model Name	Keyword /MAT	Law #
线弹性	Elastic (Hooke)	/ELAST	1
超弹性	Tabulated Hyperelastic	n/a	69
	Ogden	n/a	82

MATERIAL LAWS: 弹塑性各向同性

Description	Model Name	Keyword /MAT	Law #
von Mises hardening *without* damage (von Mises无损伤硬化)	Johnson-Cook	/PLAS_JOHNS	2
	Zerilli-Armstrong	/PLAS_ZERIL	2
	Drücker-Prager for rock or concrete by polynomial	/DPRAG1	10
	Rigid material	/RIGID	13
	Drücker-Prager with cap	n/a	81
	Drücker-Prager for rock or concrete by function	/DPRAG	21
	Tabulated piecewise linear	/PLAS_TAB	36
	Cowper-Symonds	/COWPER	44
	Zhao	/ZHAO	48
	Connection material	/CONNECT	59
	Advanced connection material	n/a	83

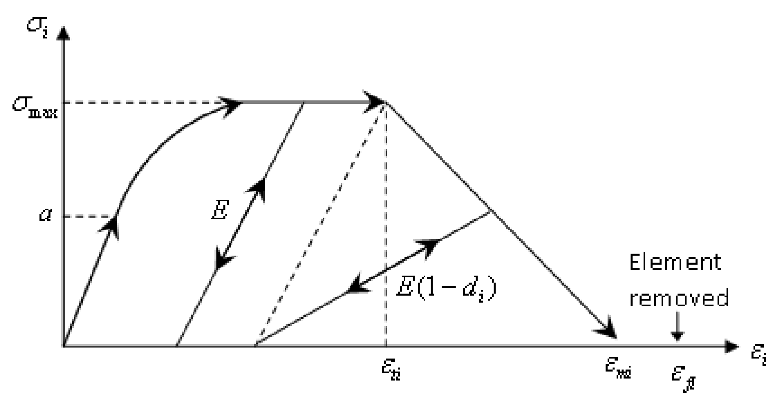
Altair

MATERIAL LAWS: 弹塑性各向同性 (CONT'D)

Description	Model Name	Keyword /MAT	Law #
von Mises hardening *without* damage	Tabulated quadratic in strain rate	/PLAS_T3	60
	Hansel model	/HANSEL	63
	Ugine and Alz	/UGINE_ALZ	64
	Elastomer	/ELASTOMER	65
	Visco-Elastic	n/a	66
	Yoshida-Uemori	n/a	78
	High strength steel	n/a	80
von Mises hardening *with* brittle damage (von Mises 脆性损伤硬化)	Reinforced concrete	/CONC	24
	Aluminum, glass, etc.	/PLAS_BRIT	27
	Predit rivets	/PREDIT	54
	Brittle materials	/JOHN_HOLM	79

MATERIAL LAWS: 弹塑性各向同性 (CONT'D)

Description	Model Name	Keyword /MAT	Law #
von Mises hardening *with* damage (von Mises 韧性损伤硬化)	Ductile damage for solids and shells	/DAMA	22
	Ductile damage for solids	/PLAS_DAMA	23
von Mises *with* visco-plastic flow (von Mises黏塑性流动)	Ductile damage for porous materials, Gurson	/GURSON	52



MATERIAL LAWS:复合材料&正交各向异性

Description	Model Name	Keyword /MAT	Law #
Linear elastic orthotropic shells 线弹性正交异性壳单元	Fabric	/FABRI	19
Nonlinear elastic for anisotropic shells 非线性弹性各向异性的壳单元	Fabric	/FABRI_A	58
near pseudo-plastic orthotropic solids *without* strain rate 非线性假塑性正交异性实体（无应变率）	Honeycomb	/HONEYCOMB	28
	Cosserat Medium	/COSSER	68
	Thermal Hill Orthotropic	n/a	73
	Thermal Hill Ortho 3D	n/a	74
Nonlinear pseudo-plastic orthotropic solids *with* strain rate 非线性假塑性正交异性实体（有应变率）	Crushable foam	/VISC_HONEY	50
Elastic-plastic orthotropic shells 弹塑性正交异性壳	Hill	/HILL	32
	Hill Tabulated	/HILL_TAB	43
	Three-Parameter Barlat	/BARLAT3	57
	Anisotropic Hill	/HILL_MMC	72

MATERIAL LAWS:正交弹塑性复合材料

Description	Model Name	Keyword /MAT	Law #
Elasto-plastic orthotropic composites 正交弹塑性复合材料	Tsai-Wu Formula for solids	/3D_COMP	12
	Composite solid	/COMPSO	14
	Composite Shell Chang-Chang	/CHANG	15
	Composite shell	/COMPSH	25
	Foam model	/TSAI_TAB	53

MATERIAL LAWS: 黏性

Description	Model Name	Keyword /MAT	Law #
Visco-elastic 粘弹性	Boltzmann	/BOLTZMANN	34
	Generalized Kelvin-Voigt	/FOAM_VISC	35
	Visco-Elastic Foam Tabulated	/VISC_TAB	38
	Generalized Maxwell-Kelvin	/KELVINMAX	40
	Hyper visco-elastic	/OGDEN	42
	Hyper visco-elastic	/VISC_HYP	62
	Tabulated hyper visco-elastic	/FOAM_TAB	70
	Tabulated visco-elastic foam	n/a	77
	Isotropic visco-elastic	/VISC/PRONY	n/a
Visco-plastic 粘塑性	Closed cell, elasto-plastic foam	/FOAM_PLAS	33

MATERIAL LAWS: 流体动力材料

Description	Model Name	Keyword /MAT	Law #
Strain rate and temperature dependence on yield stress 与应变率和温度相关的屈服应力	Hydrodynamic Johnson-Cook	/HYD_JCOOK	4
Turbulent viscous flow 粘滞紊流	Hydrodynamic viscous fluid	/HYDRO	6
Elastio-plastic hydrodynamic 粘弹性流体动力学	von Mises isotropic hardening with polynomial pressure	/HYDPLA	3
	Semi-analytical elasto-plastic	/SAMP	76
Multiphase Gray EOS + Johnson shear law	Gray model	/GRAY	16
Hydrodynamics 流体动力学	Lee-Tarver material	/LEE-TARVER	41
Elastio-plastic hydrodynamic with thermal softening 粘塑性热软化流体动力材料	Steinberg-Guinan Material	/STEINB	49
Hydrodynamic material with P-α porous material model 流体材料带P-α多孔材料模型	Porous material	/POROUS	75

MATERIAL LAWS: 炸药材料模型

Description	Model Name	Keyword /MAT	Law #
Detonation driven by time 由时间控制的爆炸材料模型	Jones Wilkins Lee	/JWL	5
Hydrodynamics 流体动力材料模型	Lee-Tarver	/LEE-TARVER	41
Multi-materials 多种材料模型	Solid, liquid, gas and explosives	/MULTIMAT	51

RADIOSS中材料失效模型

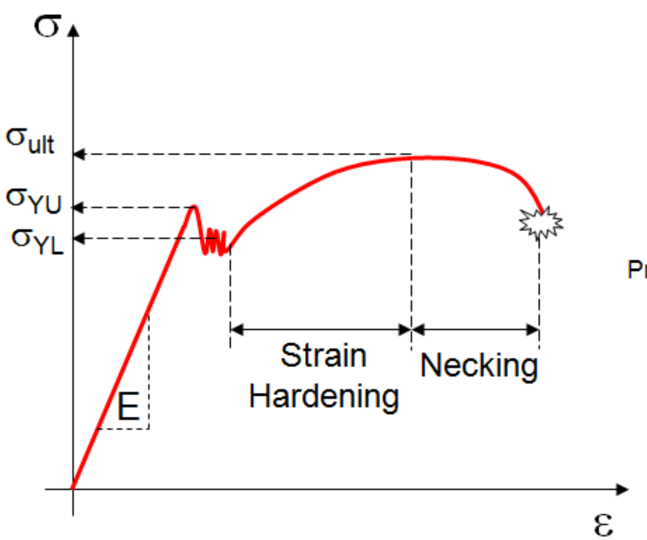
Type	Description	Keyword /FAIL
Chang-Chang	Failure criteria for composites 复合材料的失效准则	/CHANG
Failure	Normal & Tangential for connectors 连接器的法向 & 切向	/CONNECT
Extended Mohr Coulomb	Dpendent on effective plastic strain 有效塑性应变失效	/EMC
Energy isotrop	Specific energy 比内能	/ENERGY
FLD	Forming Limit Diagram 成形极限图	/FLD
Hashin	Composite model 复合模型	/HASHIN
Johnson-Cook	Ductile failure 塑性失效	/JOHNSON
Ladeveze delamination	Composite delamination 复合材料分层	/LAD_DAMA
NXT	Similar to FLD, but based on stresses 类似于FLD, 但基于应力	/NXT
Puck	Composite model 复合材料模型	/PUCK

RADIOSS中材料失效模型

Type	Description	Keyword /FAIL
Failure	Failure criteria for plastic strain 连接关系的失效模型	/SNCONNECT
Spalling & Johnson-Cook	Ductile and spalling 韧性和层裂	/SPALLING
Strain failure	Damage accumulation with user funct 使用用户函数积累合同规定失效模型	/TAB1
Tuler-Butcher	Failure due to fatigue 疲劳失效	/TBUTCHER
Traction	Strain failure 应变失效	/TENSSTRAIN
User failure model	--	/USERi
Ductile material	Bao-Xue-Wierzbicki model Wierzbicki失效模型	/WIERZBICKI
Ductile failure model	Wilkins model Wilkins失效模型	/WILKINS

REVIEW: 弹塑性材料应力应变曲线

Low / Medium Carbon Steels

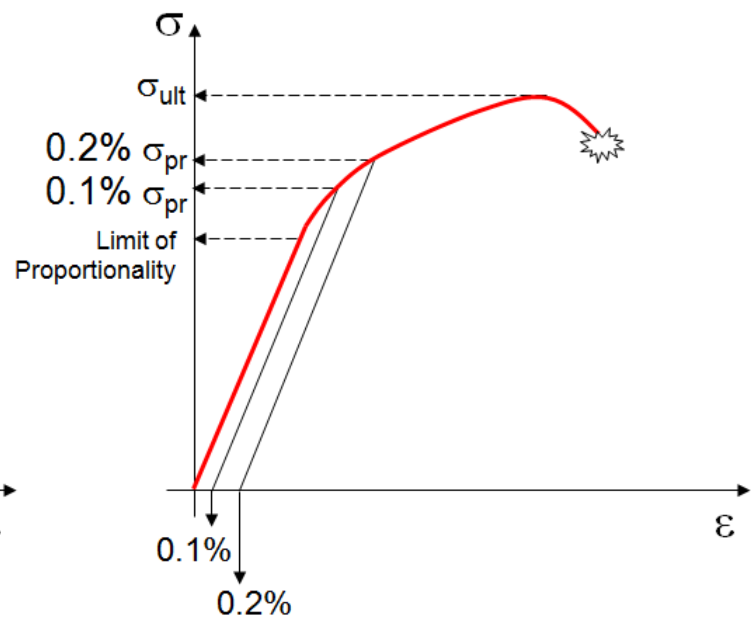


σ_{ult} = Ultimate Strength

σ_{YU} = Upper yield point

σ_{YL} = Lower yield point

Aluminium Alloys and Alloy Steels



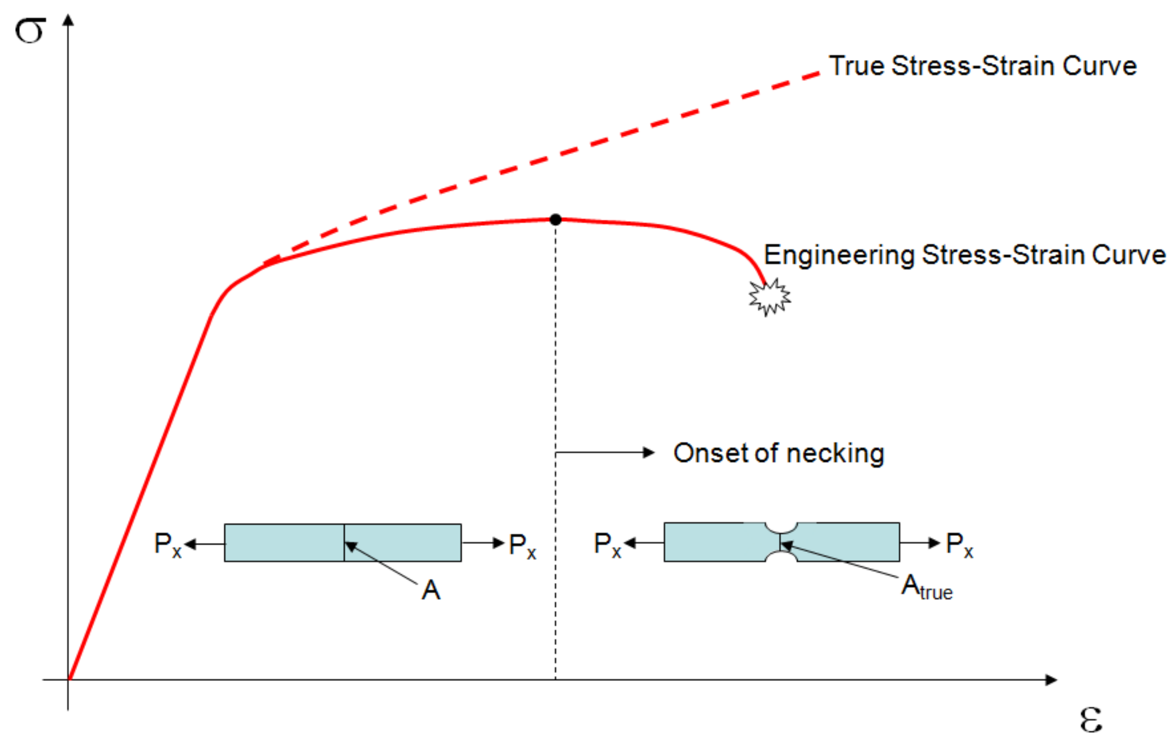
σ_{pr} = Offset yield point (proof stress)

真实应力应变曲线

- **True Stress:** a stress defined with respect to the current or true cross-sectional area, A_{true} as

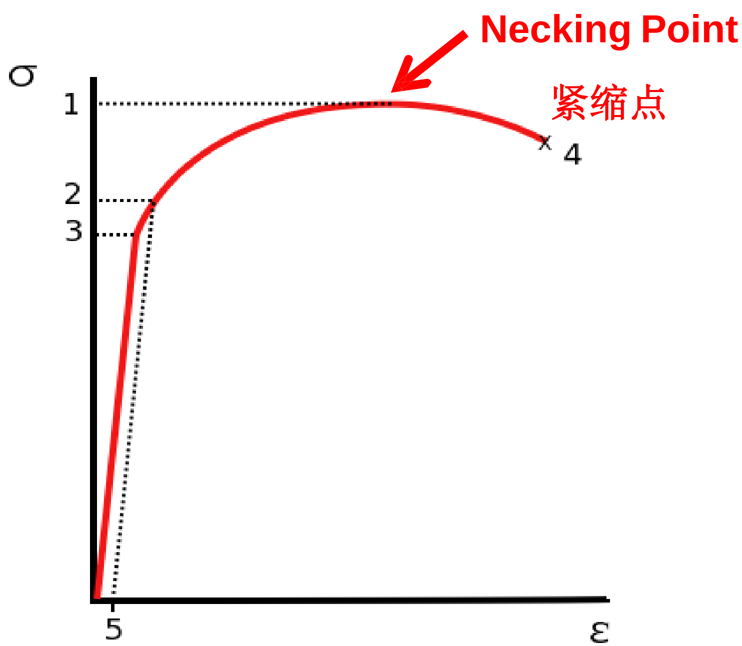
$$\sigma_{true} = \frac{P_x}{A_{true}}$$

- In the plastic range, plastic deformation or permanent reduction in cross-sectional area is significant
- A continuous use of nominal or engineering stress is no longer accurate



非线性材料曲线

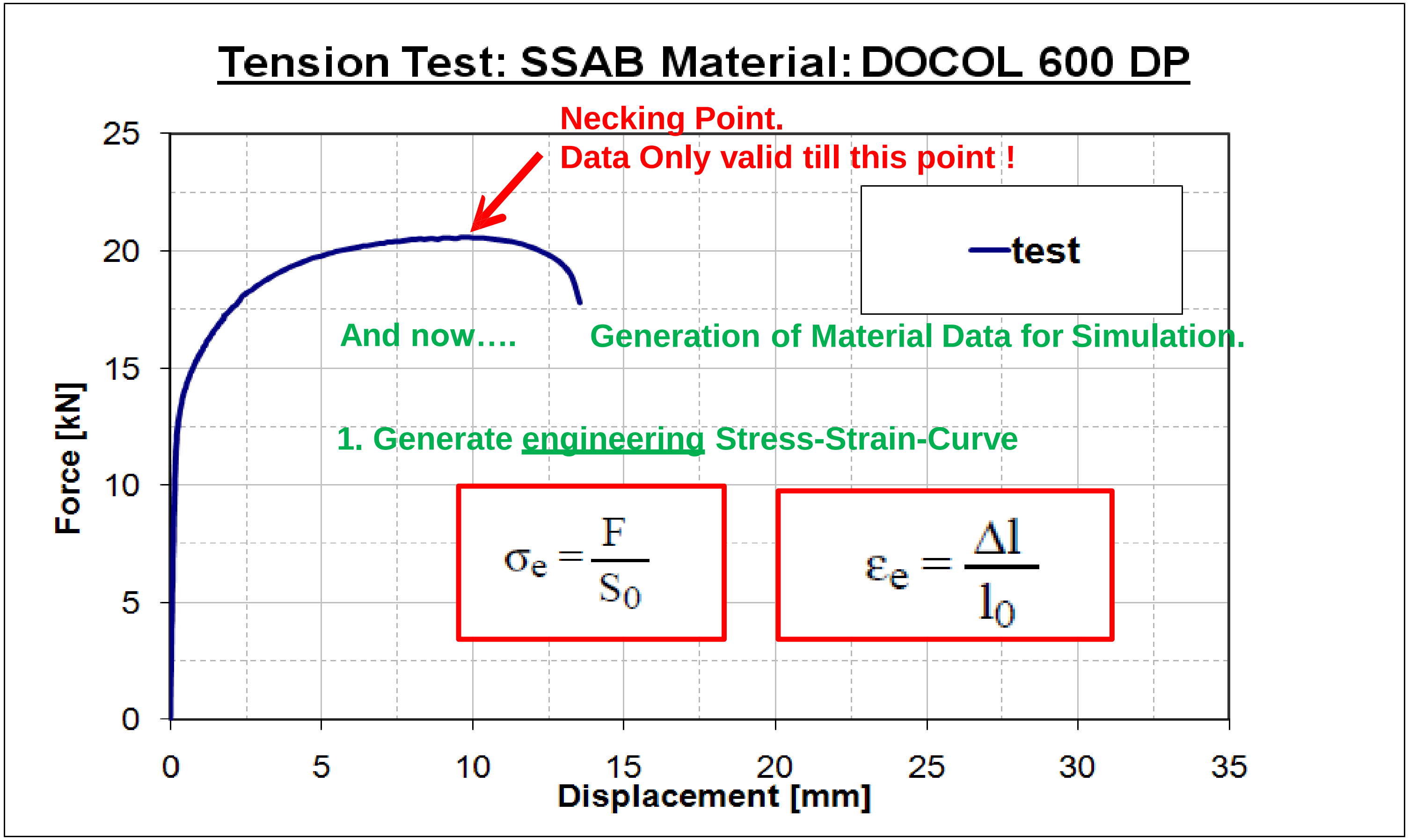
To account for material necking true stress and true strain is used in most material models where all outputs are noted in true stress and true strain



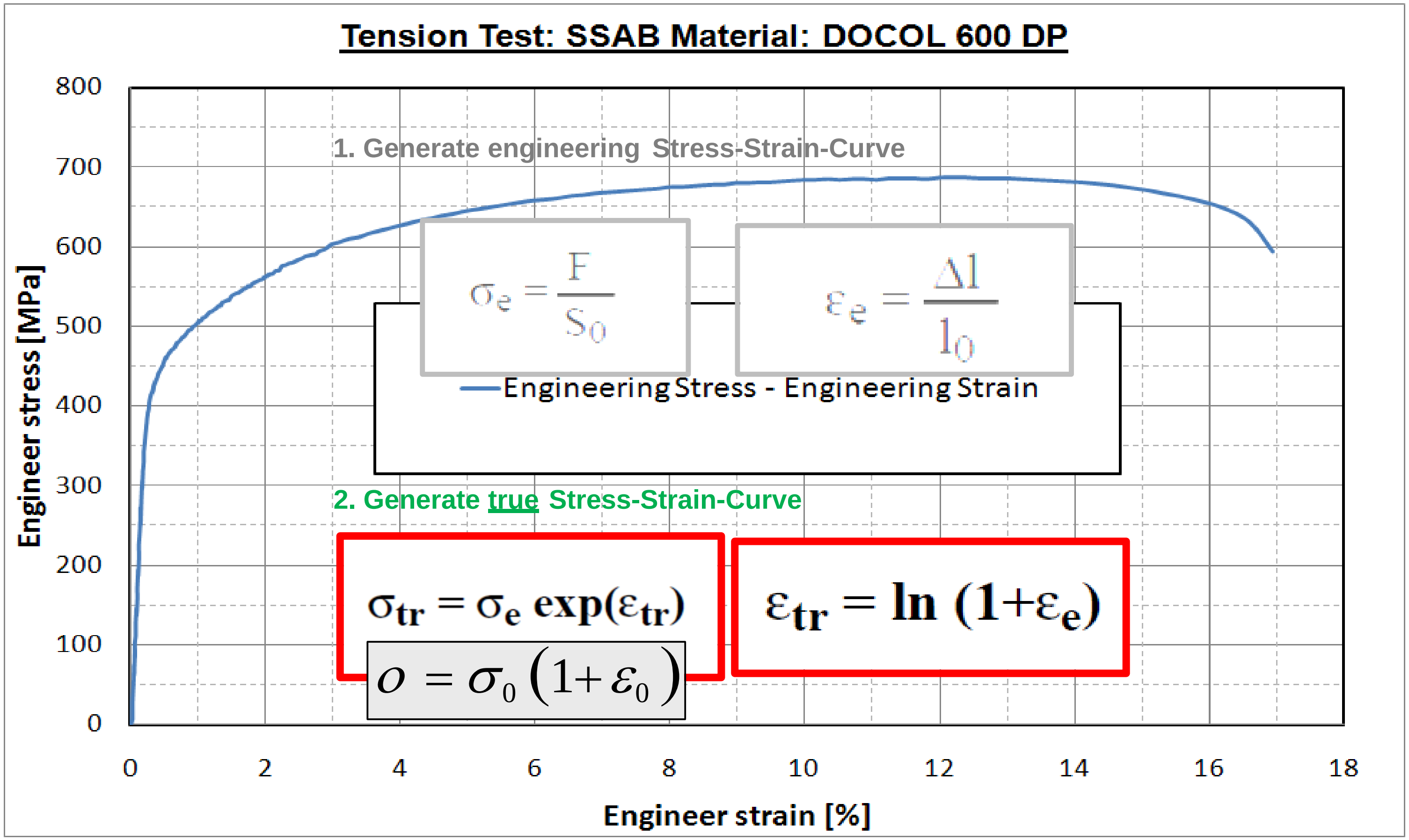
Engineering (Nominal) Stress vs. Strain

1. Ultimate strength
2. Yield strength
3. Proportional Limit Stress
4. Rupture
5. Offset strain (typically 0.002).

例子：材料实验结果

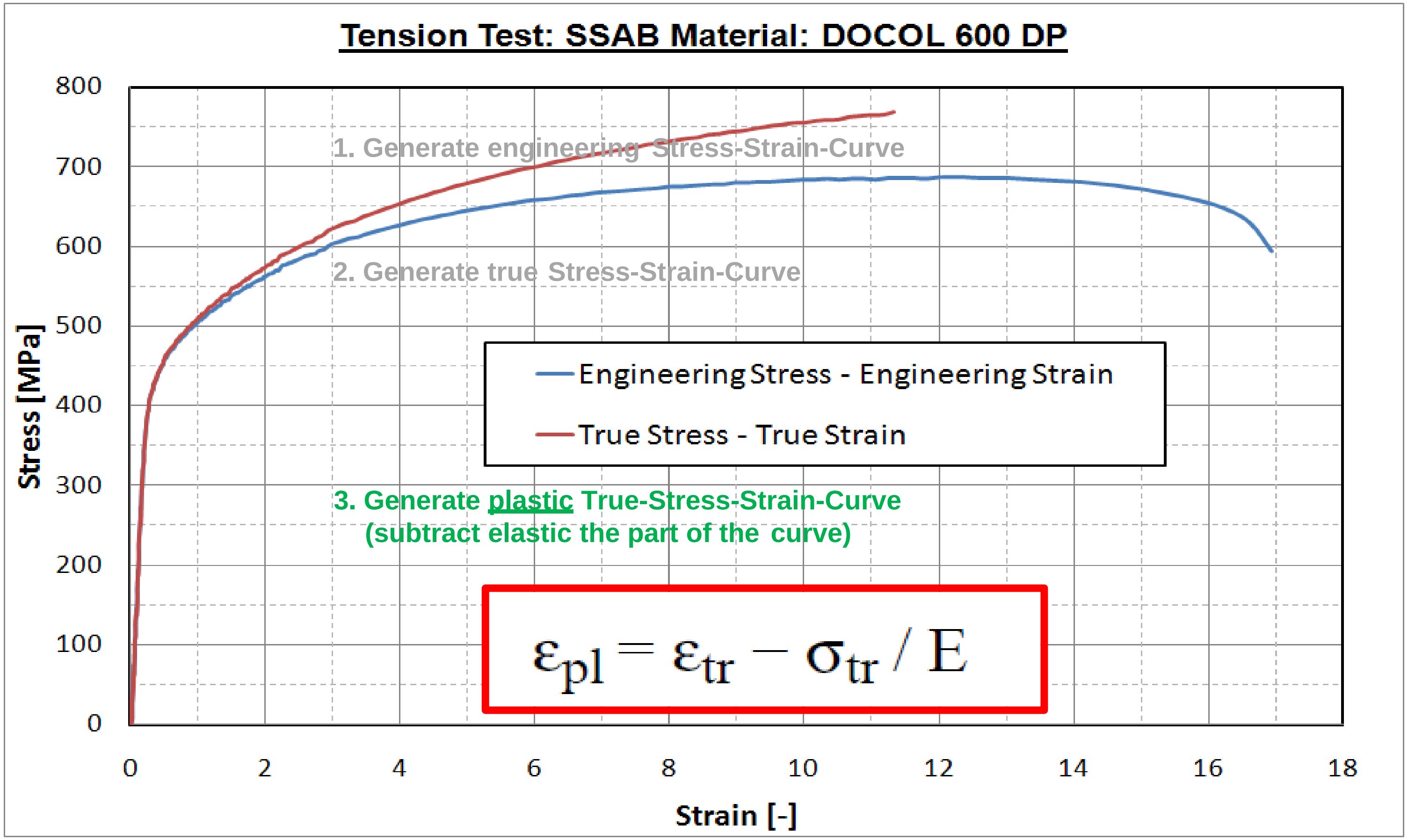

Tension Test: SSAB Material: DOCOL 600 DP
Necking Point.
Data Only valid till this point !
test
And now….
Generation of Material Data for Simulation.
1. Generate engineering Stress-Strain-Curve
$\sigma_e = \frac{F}{S_0}$
$\varepsilon_e = \frac{\Delta l}{l_0}$
Force [kN]
Displacement [mm]
25
20
15
10
5
0
0
5
10
15
20
25
30
35

例子：材料实验结果

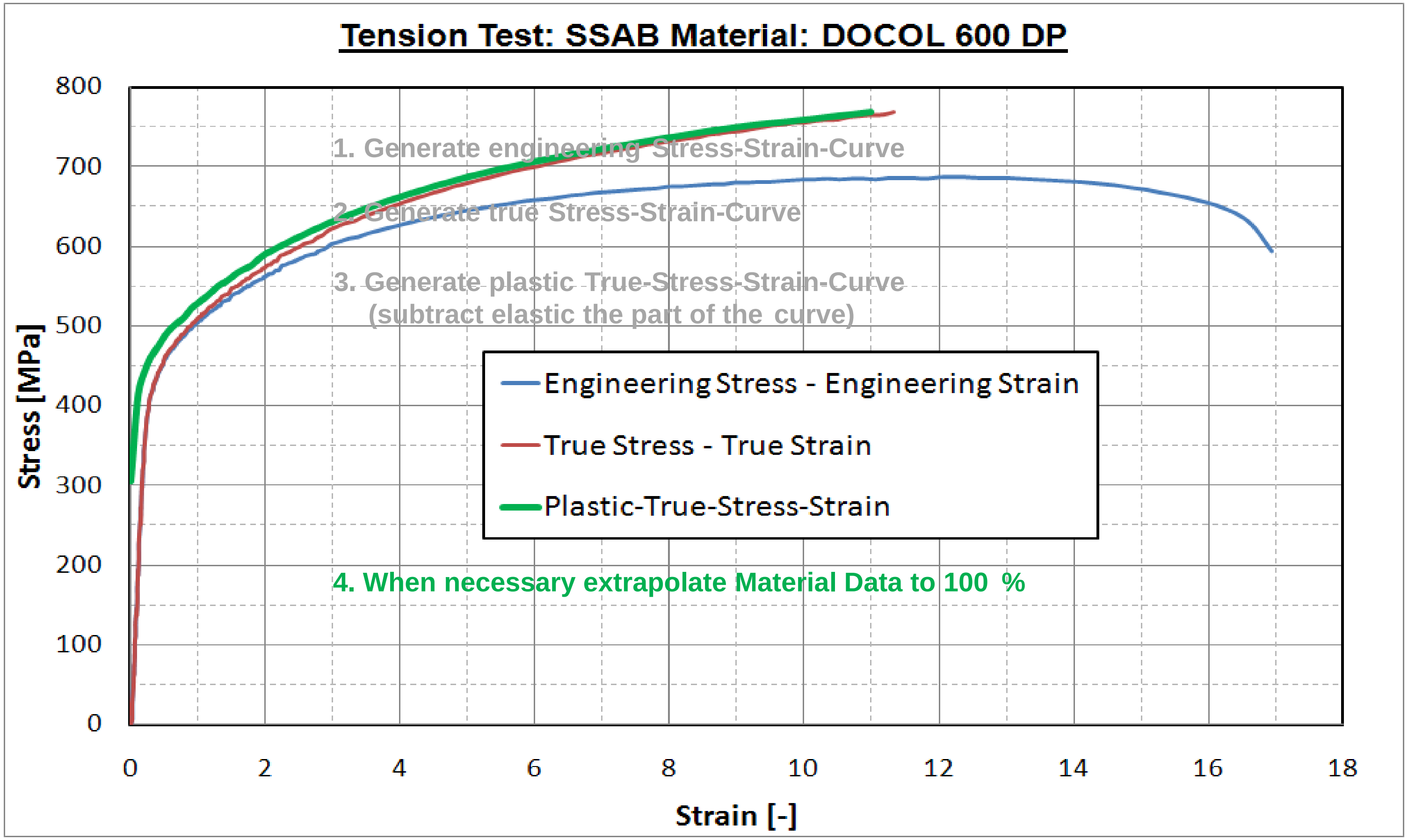

Tension Test: SSAB Material: DOCOL 600 DP
1. Generate engineering Stress-Strain-Curve
$\sigma_e = \frac{F}{S_0}$
$\varepsilon_e = \frac{\Delta l}{l_0}$
Engineering Stress - Engineering Strain
2. Generate true Stress-Strain-Curve
$\sigma_{tr} = \sigma_e \exp(\varepsilon_{tr})$
$o = \sigma_0 (1 + \varepsilon_0)$
$\varepsilon_{tr} = \ln (1+\varepsilon_e)$
Engineer stress [MPa]
Engineer strain [%]
0
100
200
300
400
500
600
700
800
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18

Altair

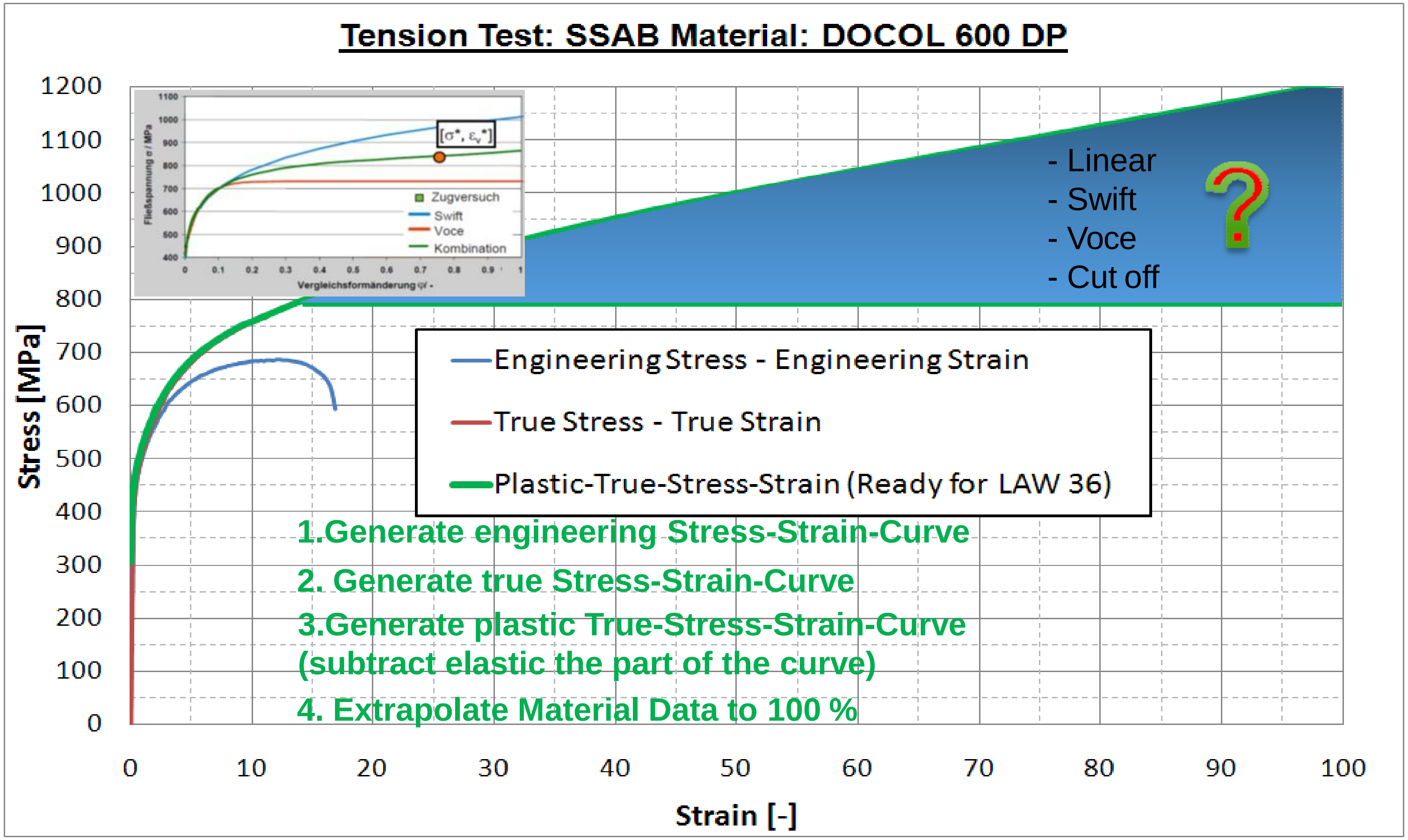
例子：材料实验结果



例子：材料实验结果


Tension Test: SSAB Material: DOCOL 600 DP
1. Generate engineering Stress-Strain-Curve
2. Generate true Stress-Strain-Curve
3. Generate plastic True-Stress-Strain-Curve
(subtract elastic the part of the curve)
Engineering Stress - Engineering Strain
True Stress - True Strain
Plastic-True-Stress-Strain
4. When necessary extrapolate Material Data to 100 %
Stress [MPa]
Strain [-]
0
100
200
300
400
500
600
700
800
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18

例子：材料实验结果


Tension Test: SSAB Material: DOCOL 600 DP
Stress [MPa]
Strain [-]
- Linear
- Swift
- Voce
- Cut off
Zugversuch
Swift
Voce
Kombination
Vergleichsformänderung
Engineering Stress - Engineering Strain
True Stress - True Strain
Plastic-True-Stress-Strain (Ready for LAW 36)
1.Generate engineering Stress-Strain-Curve
2. Generate true Stress-Strain-Curve
3.Generate plastic True-Stress-Strain-Curve (subtract elastic the part of the curve)
4. Extrapolate Material Data to 100 %

Question?

Q: 工程应力应变和真实应力应变间的差异？

A: 真实应力需要考虑拉伸实验件的瞬时面积。真实应变在拉伸试验中，对无穷小变化的所有比值相加得的。

$$\sigma = s\,(1+e) \qquad \varepsilon = \ln\,(1+e)$$

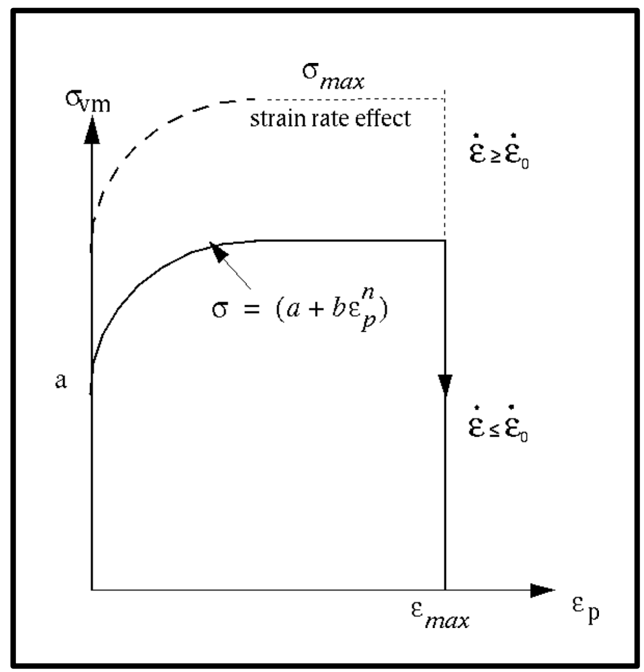
/MAT/LAW2 或/MAT/JOHNS: 弹塑性

使用Johnson-Cook模型的各向同性弹塑性材料, 表达了材料应力是应变、应变率和温度的函数，内置最大塑性应变的失效准则

$$\sigma = (\underbrace{a + b\varepsilon_p^n}_{\text{塑性应变效应}})(\underbrace{1 + c\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}}_{\text{应变率效应}})(\underbrace{1 - T^{*m}}_{\text{温度效应}})$$

- σ = 应力
- ε_p = 塑性应变
- a = 屈服应力
- b = 硬化模量

- n = 硬化指数
- c = 应变率系数
- $\dot{\varepsilon}$ = 应变率
- $\dot{\varepsilon}_0$= 参考应变率



Altair

/MAT/LAW2 OR /MAT/PLAS_JOHNS: 如何得到相关的材料参数?

如果应力与应变曲线数据不可用会怎样?如果没有温度或应变率敏感：

$$\sigma = (a + b\varepsilon_p^n)$$

- 使用 $I_{flag} = 1$, 输入以下数据:
  - Yield Stress, σ_y
  - Engineering Ultimate Tensile Stress (UTS), σ_u
  - Engineering Strain @ UTS, ε_{UTS}
  - Johnson Cook材料参数 b 和 n, 会自动在模型初始化文件中自动计算出

$$a = \sigma_y \qquad b = \frac{\sigma_u}{n\,\varepsilon_u^{(n-1)}} \qquad n = \frac{\sigma_u \varepsilon_u}{\sigma_u - \sigma_y}$$

/MAT/LAW2 或 /MAT/JOHNS: 低碳钢示例

Altair

低碳钢材料本构

```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/PLAS_JOHNS/1
Material_A
#              RHO_I
               7.8E-9                   0
#                  E                   Nu
               210000                  .3
#                  a                    b                   n                 EPS_max             SIG_max0
                 400                  550                  .5                      .4                   0
#                  c           EPS_DOT_0         ICC  Fsmooth                   F_cut
                   0                    0           0        0                       0
#                  m               T_melt               rhoC_p                    T_r
                   0                    0                    0                       0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

a = Yield

b = Hardening Modulus

n = Hardening Exponent

/MAT/LAW2或/MAT/JOHNS: 低碳钢示例

Altair

带有失效的低碳钢材料本构

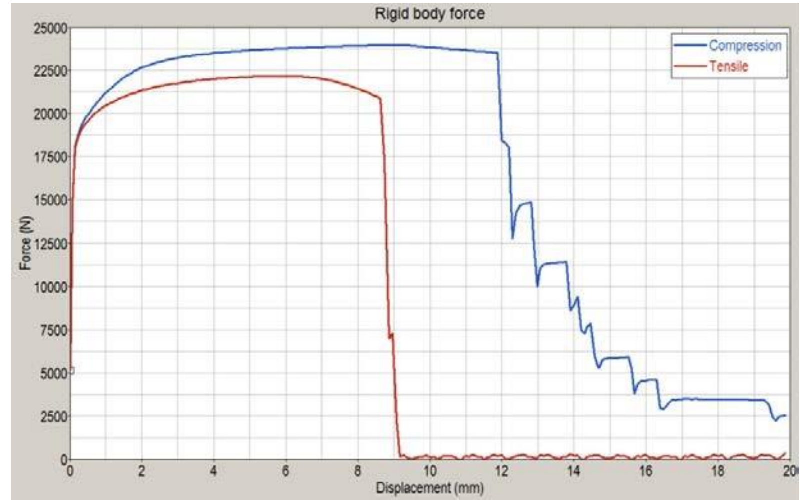
当一个积分点达到ε_p^{max}最大塑性应变时，单元发生失效

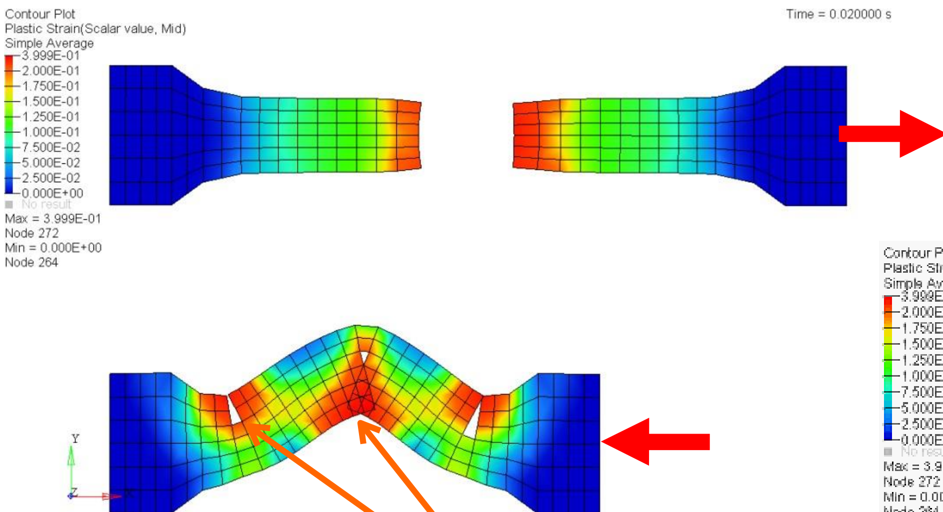
```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/PLAS_JOHNS/1
Material_A
#              RHO_I
              7.8E-9                   0
#                  E                  Nu
              210000                  .3
#                  a                   b                   n             EPS_max            SIG_max0
                 400                 550                  .5                  .4                   0
#                  c           EPS_DOT_0       ICC   Fsmooth               F_cut
                   0                   0         0         0                   0
#                  m              T_melt              rhoC_p                 T_r
                   0                   0                   0                   0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

最大塑性应变

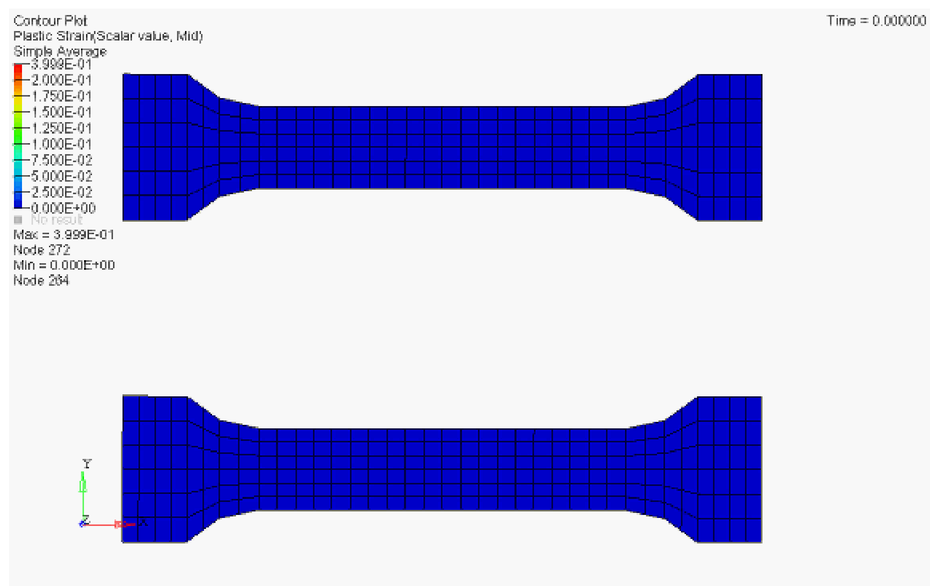
/MAT/LAW2 或 /MAT/JOHNS: 低碳钢示例

带有失效模型的低碳钢拉伸和压缩试验



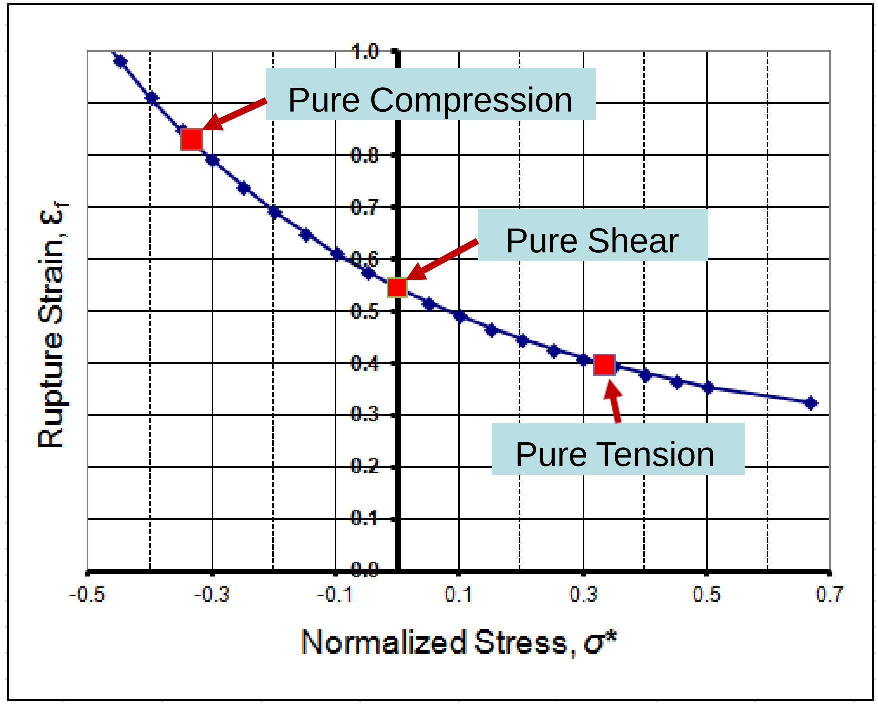


在压缩时，也发生断裂
（不是真实物理现象）



/MAT/LAW2 OR /MAT/PLAS_JOHNS: 失效模型设置

- 使用JOHSON –COOK `/FAIL/JOHNSON` 失效模型，用于模拟 Johnson-Cook材料模型失效。需要做相应的材料失效实验: Compression, Shear, and Tension
- Johnson-Cook 失效模型的应变定义:
  - $\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln(\dot{\varepsilon}^*)][1 + D_5 T^*]$
  - $\sigma^* = \frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}}$ and $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$
  - $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$
    mean stress (or pressure)



/MAT/LAW2或/MAT/JOHNS: 低碳钢示例

Altair

通过 /FAIL/JOHNSON 卡片来定义单元失效

不需要定义

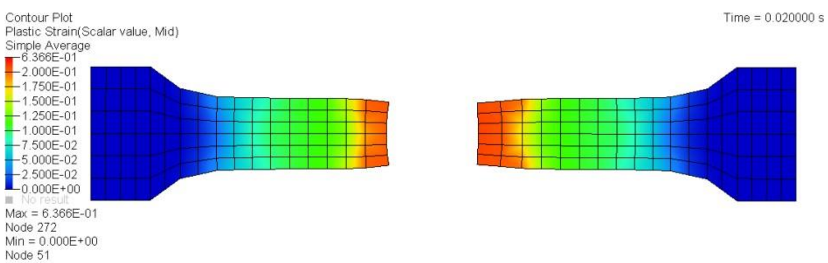
```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/PLAS_JOHNS/1
Material_A
#              RHO_I
               7.8E-9                   0
#                  E                   Nu
               210000                  .3
#                  a                    b                   n             EPS_max             SIG_max0
                  400                  450                  .3                  0                    0
#                  c            EPS_DOT_0       ICC    Fsmooth               F_cut
                    0                    0         0          0                  0
#                  m               T_melt               rhoC_p                 T_r
                    0                    0                    0                  0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/FAIL/JOHNSON/1
#                 D1                   D2                   D3                  D4                   D5
                 .246                  .3                   -2                   0                    0
#              EPS_0      Ishell      Isolid                                                     Ixfem
                    0          2           0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

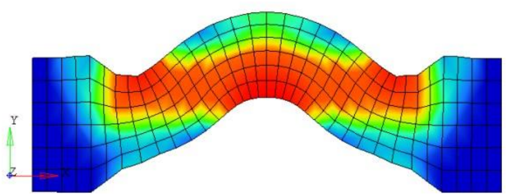
当所有的积分点达到断裂标准时单元就会失效

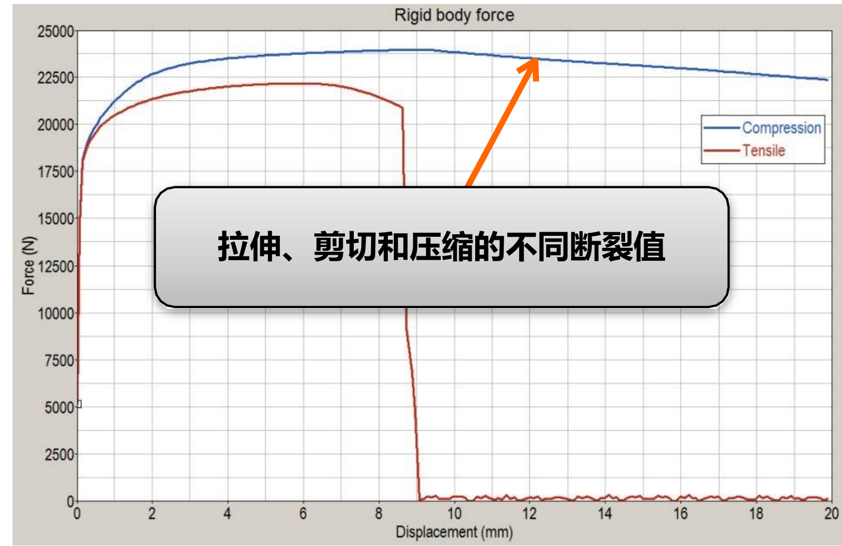
/MAT/LAW2或/MAT/JOHNS: 低碳钢示例

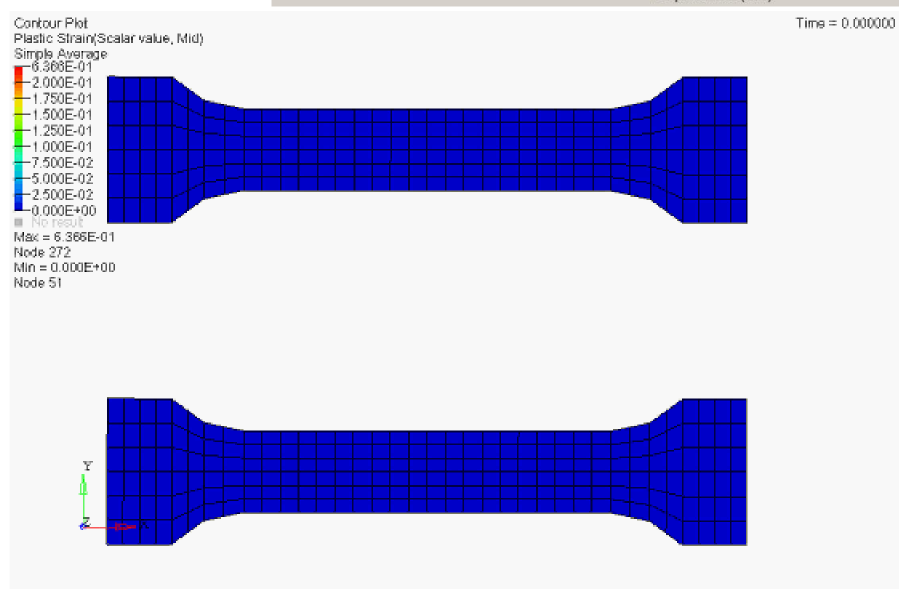
Altair

使用了单独的失效卡片的模型







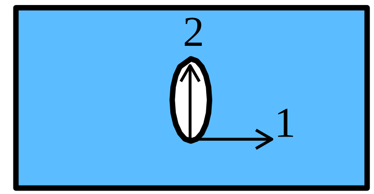


/MAT/LAW27 或/MAT/PLAS_BRIT: 弹塑脆性

使用Johnson-Cook材料模型的各向同性弹塑性材料，仅在壳单元中定义为各向异性脆性失效模式

屈服表面的定义与Johnson-Cook模型一样

在每个主方向上破坏和断裂可由4个参数表达



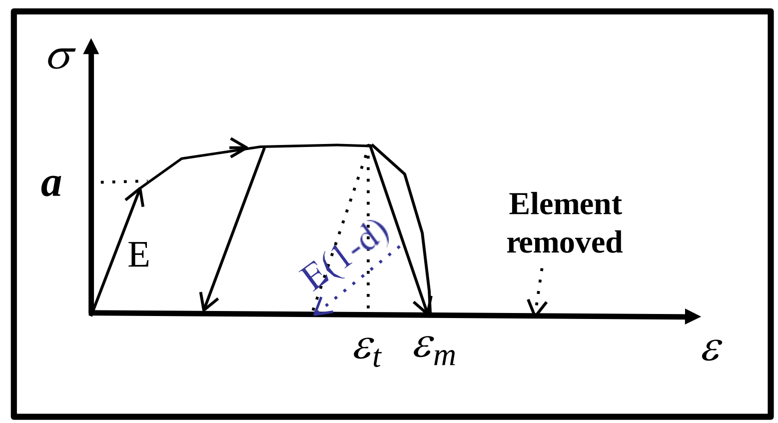
断裂方向

ε_t = 初始拉伸失效应变

ε_m = 最大拉伸应变，取决于d_{max}

d_{max}= 最大破坏因子

ε_f = 删除单元的最大拉伸应变

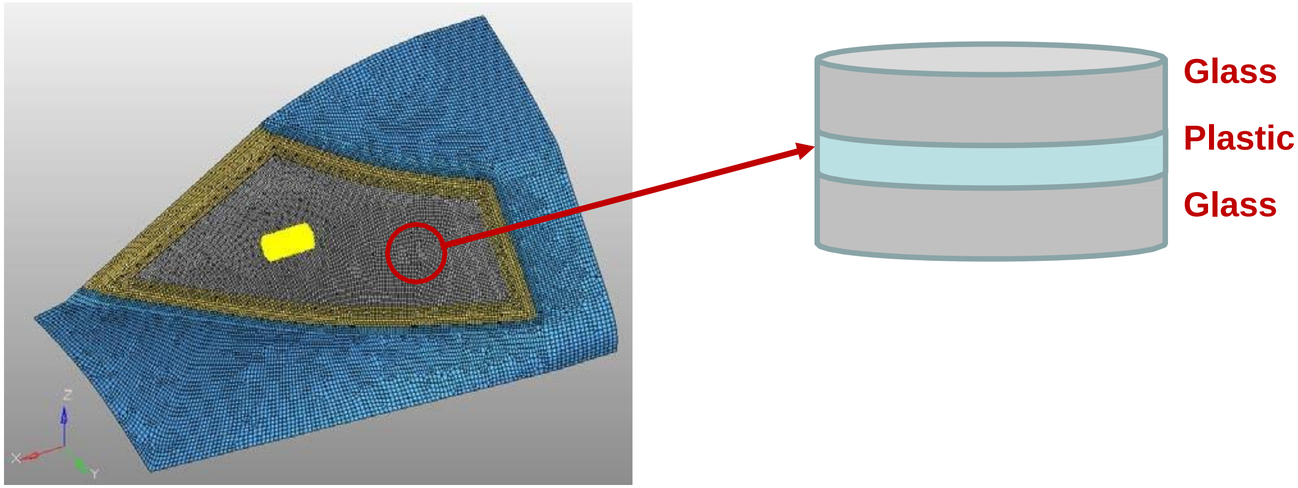


ε_f

适用于玻璃的脆性失效建模

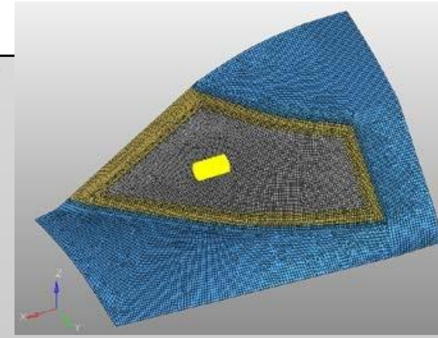
/MAT/LAW27 或 /MAT/PLAS_BRIT: 安全玻璃示例

Altair




```
/PROP/SH_SANDW/3000005
windshield
#   Ishell    Ismstr
        24         0
#                 hm                  hf                  hr                  dm                  dn
                   0                   0                   0                   0                   0
#         N   Istrain               Thick              Ashear              Ithick     Iplas
          3         1                 4.5                   0                   1         1
#                 Vx                  Vy                  Vz   Skew_ID      Iorth      Ipos
                   0                   0                   0         0          0         0
#                Phi                   t                   Z    mat_ID
                   0                 2.0                   0         8  Glass
                   0                 0.5                   0         9  Plastic
                   0                 2.0                   0         8  Glass
```

/MAT/LAW27 或 /MAT/PLAS_BRIT: 安全玻璃示例



```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7                        ---10----|
/MAT/PLAS_BRIT/8
glass
#               RHO_I
               1.74E-6                   0
#                   E                   NU
                   61                   .3
#                   a                    b                   n                   SIG_max0
                 .045                  .05                   1                          0
#                   c                 EPS0         ICC
                    0                    0           0
#              EPS_t1               EPS_m1              d_max1              EPS_f1
                  .01                  .03                 .95                 .06
#              EPS_t2               EPS_m2              d_max2              EPS_f2
                  .01                  .03                 .95                 .06
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/PLAS_BRIT/9
plastic
#               RHO_I
                 8E-7                    0
#                   E                   NU
                    3                   .3
#                   a                    b                   n                   SIG_max0
                 1E30                    0                   0                          0
#                   c                 EPS0         ICC
                    0                    0           0
#              EPS_t1               EPS_m1              d_max1              EPS_f1
                    0                    0                   0                   0
#              EPS_t2               EPS_m2              d_max2              EPS_f2
                    0                    0                   0                   0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

脆性失效准则

/MAT/PLAS_TAB 或 /MAT/LAW36: 弹塑性材料本构

各向同性弹塑性材料

用户自定义函数真实应力-应变曲线

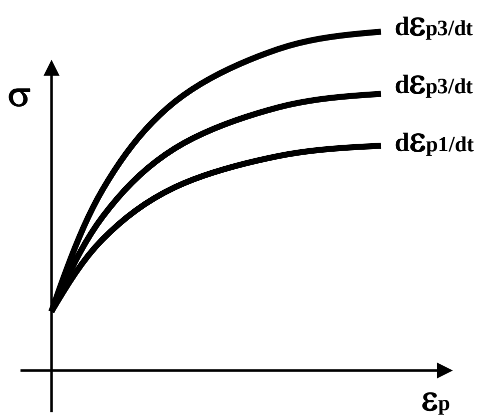
适用于实体/壳单元

材料弹性阶段，应力-应变曲线由杨氏模量和泊松比确定

指定任意应变率下的材料塑性曲线

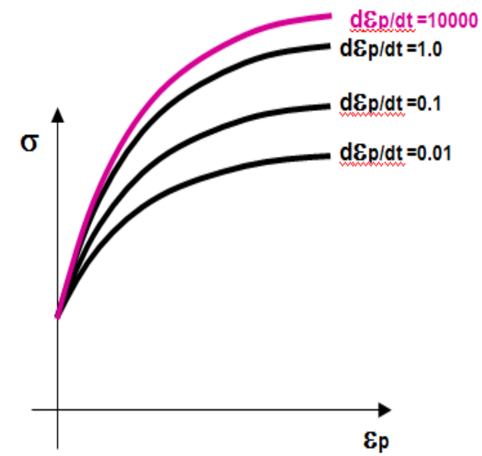
应力-应变曲线的线性插值

- 对于给定应变率
- 对于给定塑性应变

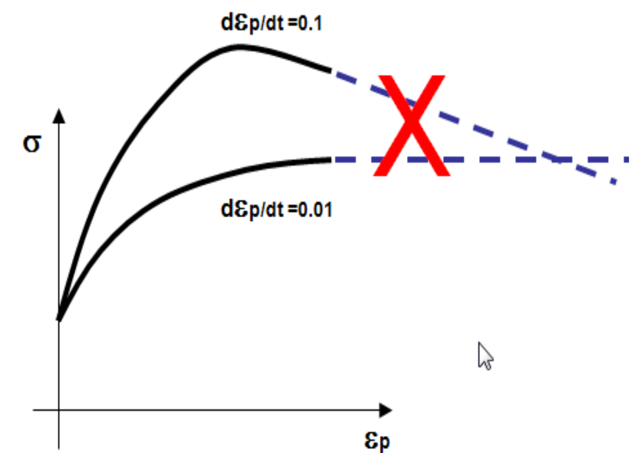


/MAT/PLAS_TAB 或/MAT/LAW36: 弹塑性平板

为了避免在应变计算中得到较差的曲线外插，可以在模型中加入一个高应变率数值定义的虚拟曲线



必须定义此曲线以保证在可能的最大工作应变区间内曲线之间不会出现交叉，否则可能计算错误。



/MAT/PLAS_TAB 或/MAT/LAW36: 弹塑性平板

破坏和断裂的四个参数

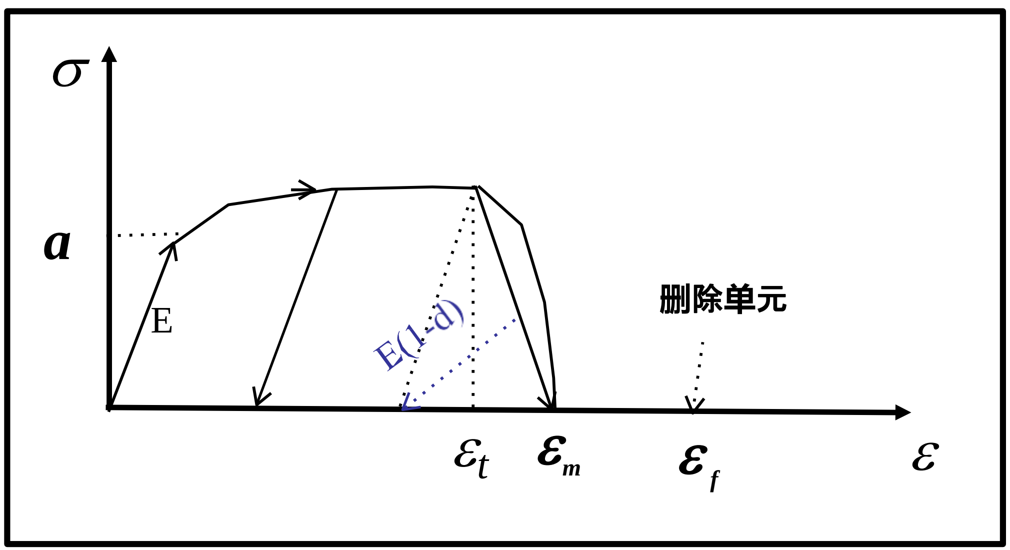
ε_p^{max} 是在任何载荷（拉伸、剪切和压缩）作用下，删除单元的最大塑性应变

ε_t 是初始拉伸失效应变，曲线中从此点开始的应力值按因子（下式）减小，其中ε_1是最大主应变

$$\sigma = \sigma\left(\frac{\varepsilon_m - \varepsilon_1}{\varepsilon_m - \varepsilon_t}\right)$$

ε_m 是最大拉伸失效应变。失效时，应力值为0，但是不删除单元

ε_f 单元删除的拉伸失效应变



/MAT/PLAS_TAB 或/MAT/LAW36: 弹塑性平板

Altair

/MAT/PLAS_TAB 卡片信息示例

应变率滤波设置 “on”

Eps_p_max : tension, compression or shear 最大失效值

拉伸实验的失效参数值

```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/PLAS_TAB/1
Material_A
#              RHO_I
              7.8E-9                   0
#                  E                  Nu           Eps_p_max               Eps_t               Eps_m
              210000                  .3                 0.8                 0.4                 0.5
#  N_funct  F_smooth              C_hard               F_cut               Eps_f
         1         1                   0                   0                   0
# func_IDp                Fscale FUNCT_IDE                EINF                  CE
         0                     0
# func_ID1
         4
#           Fscale_1
                   0
#          Eps_dot_1
                1E-6
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

对应于应变率$\dot{\varepsilon}1$
的函数标识符1(fct_ID$_1$)

应变率 $\dot{\varepsilon}_1$

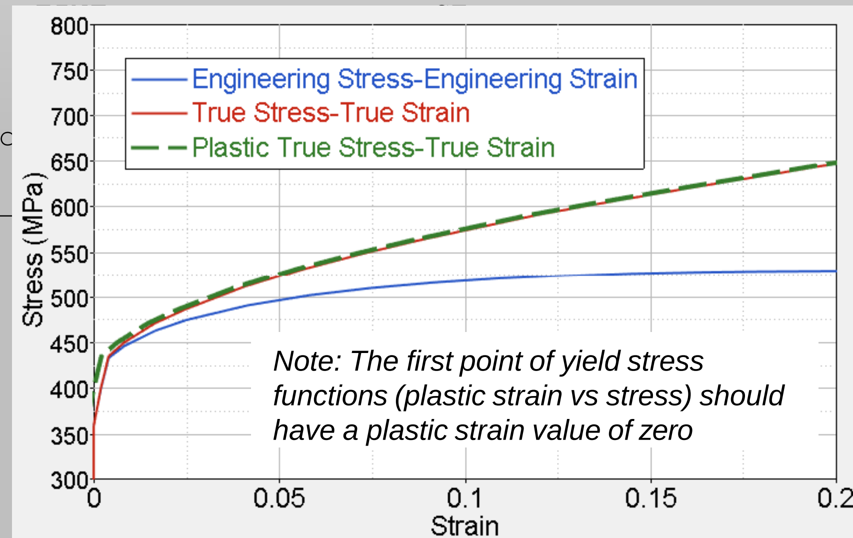
断裂参数

/MAT/PLAS_TAB 或/MAT/LAW36: 弹塑性平板

Altair

/MAT/PLAS_TAB OR /MAT/LAW36: YIELD STRESS FUNCTIONS

```
/MAT/PLAS_TAB/1
Material_A
#              RHO_I
               7.8E-9                   0
#                  E                   Nu              Eps_p_max               Eps_t               Eps_m
              210000                   .3                    1.2                0.35                0.38
#   N_funct  F_smooth              C_hard                  F_cut               Eps_f
          5         1                   0                      0                 0.4
# func_IDp                  Fscale FUNCT_IDE
          0                                0
# func_ID1  func_ID2  func_ID3  func_ID4  func_ID5
          4         5         6         7         7
#           Fscale_1                      Fscale_2                     Fsc

#          Eps_dot_1                     Eps_dot_2                     Eps_
                0.01                           0.1
/FUNCT/4
Plastic-True-Stress-Strain
#                  X                             Y
                 0.0                         400.0
             0.00208                         435.0
              0.0063                         450.0
              0.0146                         471.0
              0.0227                         486.0
Etc…
```

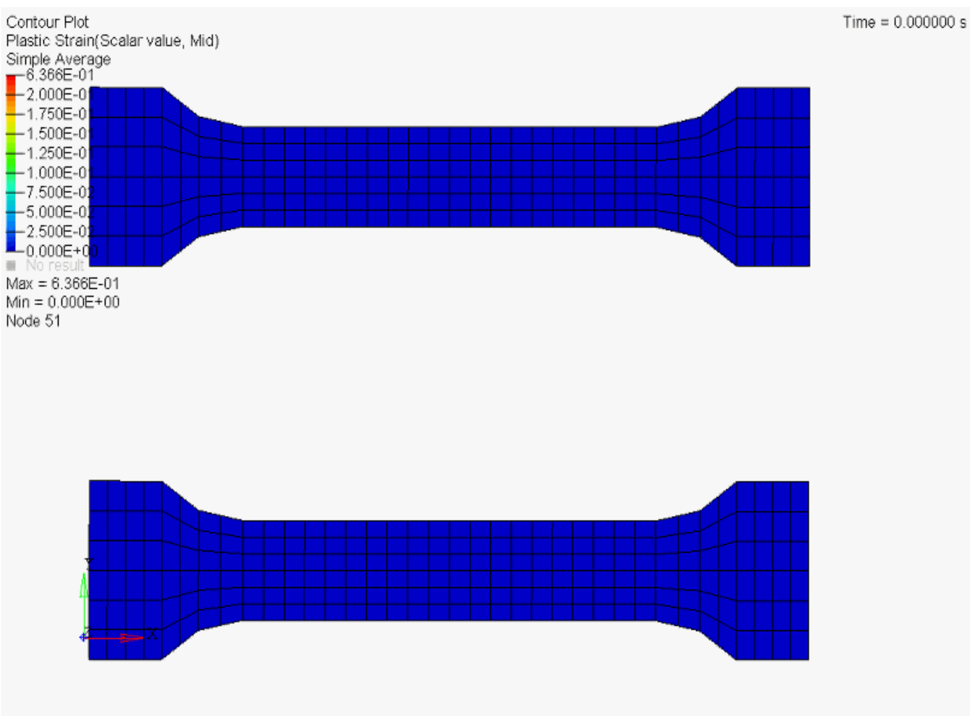


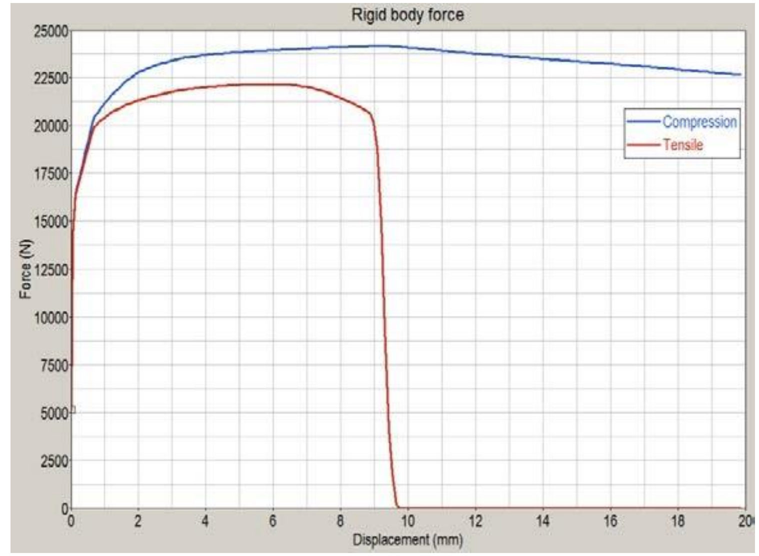
Plastic True Strains

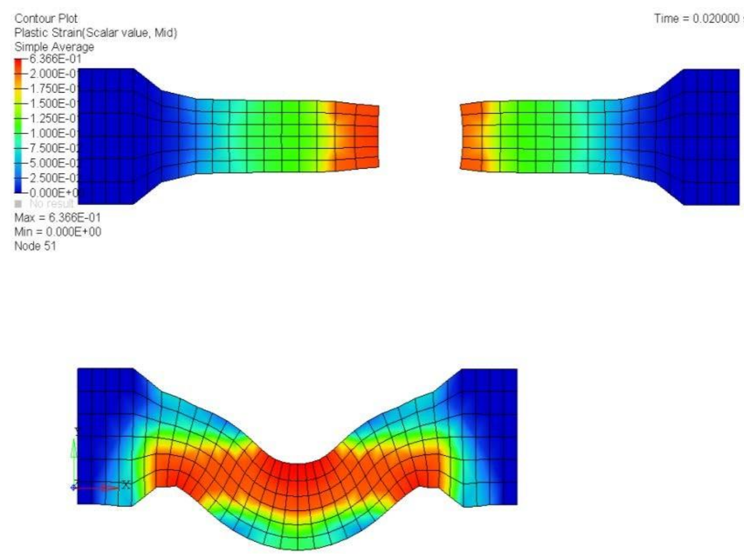
Post-Yield True Stress

/MAT/PLAS_TAB 或/MAT/LAW36：低碳钢示例

在卡片信息中使用失效准则的结果







/MAT/PLAS_TAB 或/MAT/LAW36: 弹塑性平板

Altair

使用Johnson Cook 失效模型的/MAT/PLAS_TAB 卡片信息示例

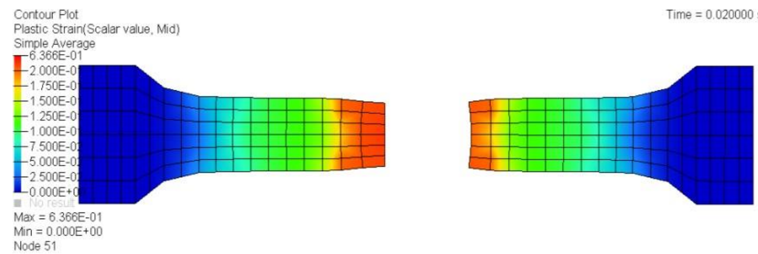
```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/PLAS_TAB/1
Material_A
#              RHO_I
              7.8E-9                   0
#                  E                  Nu           Eps_p_max              Eps_t               Eps_m
              210000                  .3                   0                  0                   0
#   N_funct  F_smooth             C_hard               F_cut              Eps_f
          1         1                  0                   0                  0
#  func_IDp            Fscale  FUNCT_IDE                EINF                 CE
          0                 0
#  func_ID1
          4
#           Fscale_1
                   0
#          Eps_dot_1
                1E-6
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/FAIL/JOHNSON/1
#                 D1                  D2                  D3                 D4                  D5
                .246                  .3                  -2                  0                   0
#         Eps_rate_0    Ishell    Isolid
                   0         2         0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

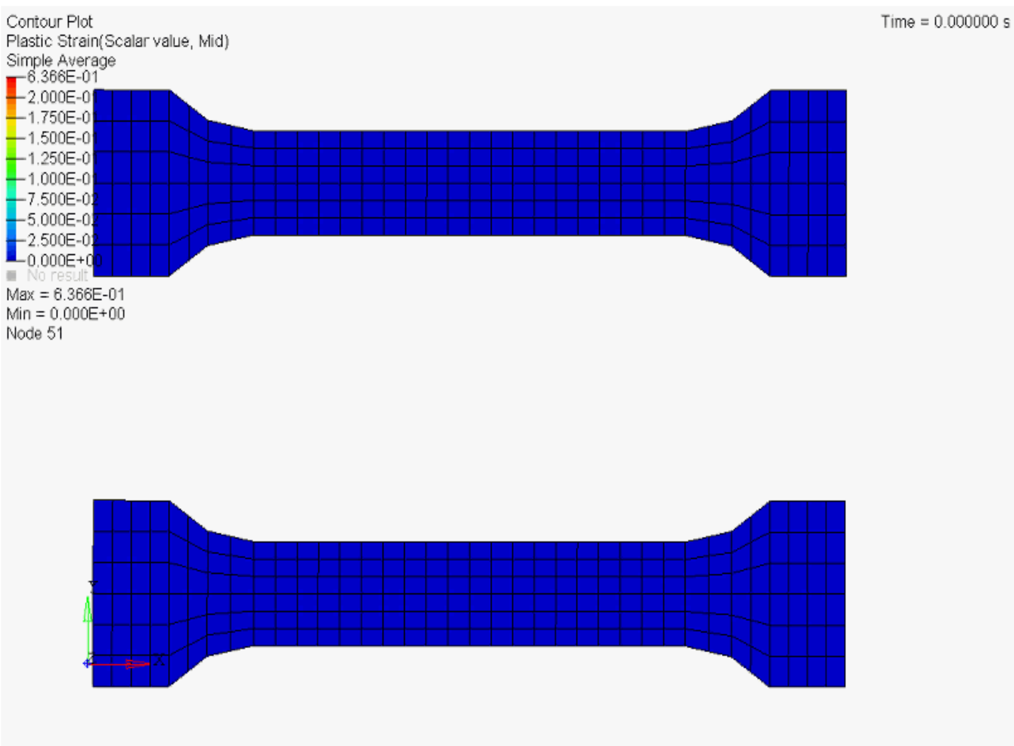
无需设置失效参数

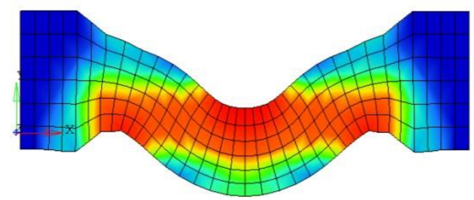
在/FAIL 卡片中设置

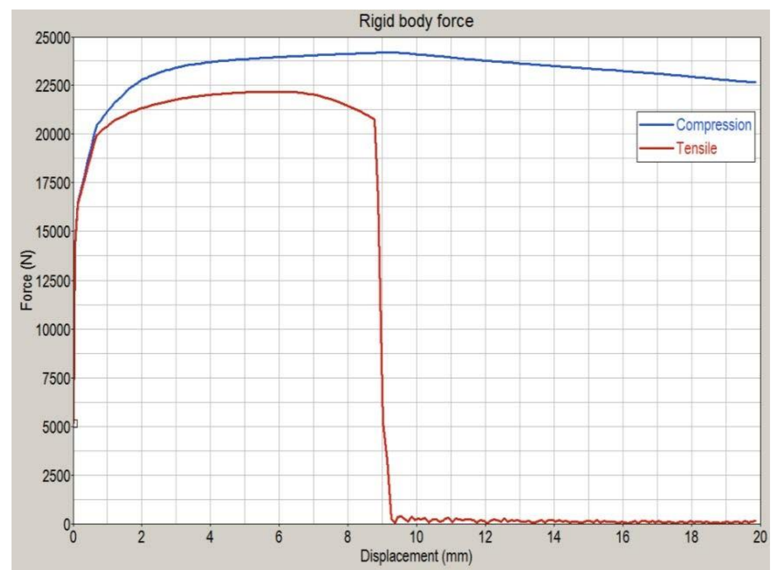
/MAT/PLAS_TAB 或 /MAT/LAW36：低碳钢示例

在卡片信息中使用失效准则的结果





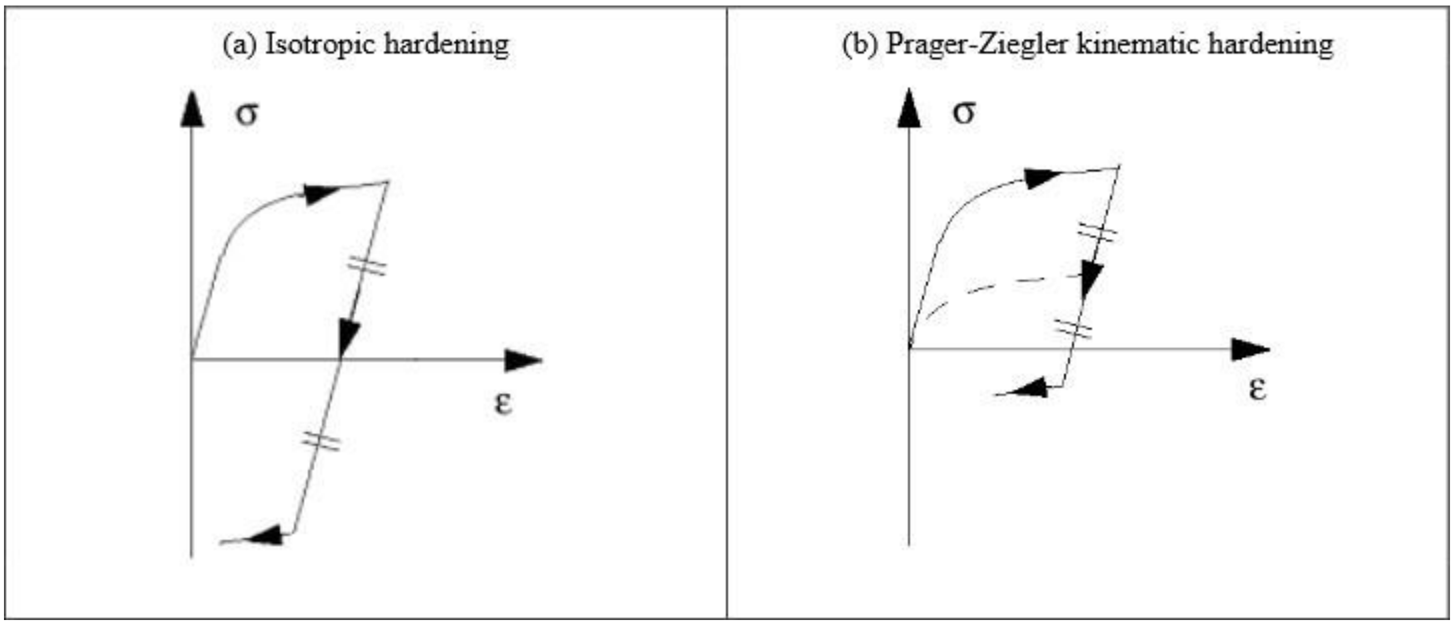




/MAT/PLAS_TAB 或 /MAT/LAW36：硬化参数

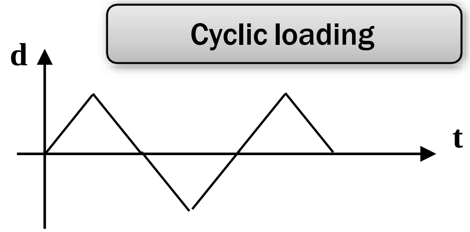
在/**MAT**/**PLAS_TAB**中,通过C_{hard}改变参数模拟不同的硬化模型：

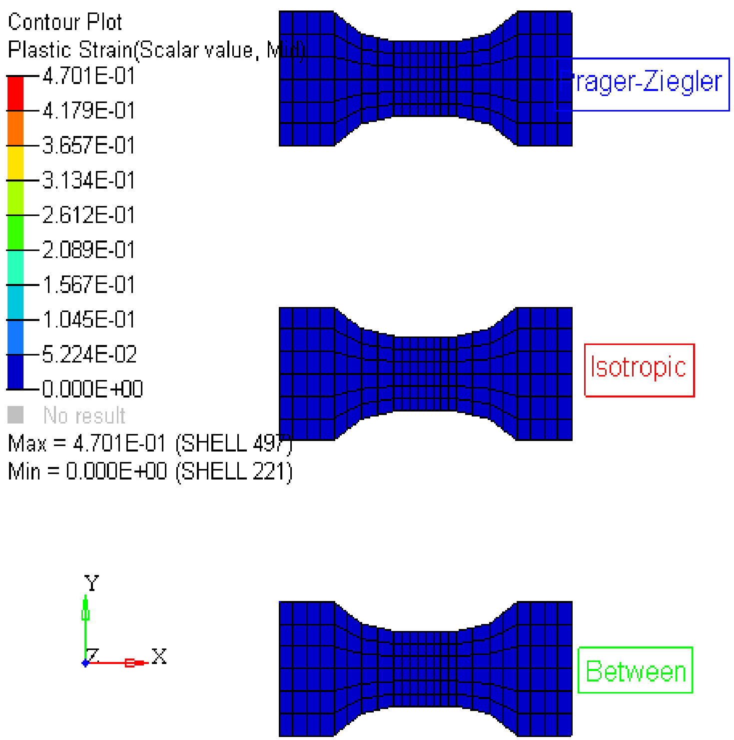
- 各向同性
- Prager-Ziegler
- 两者之间的插值

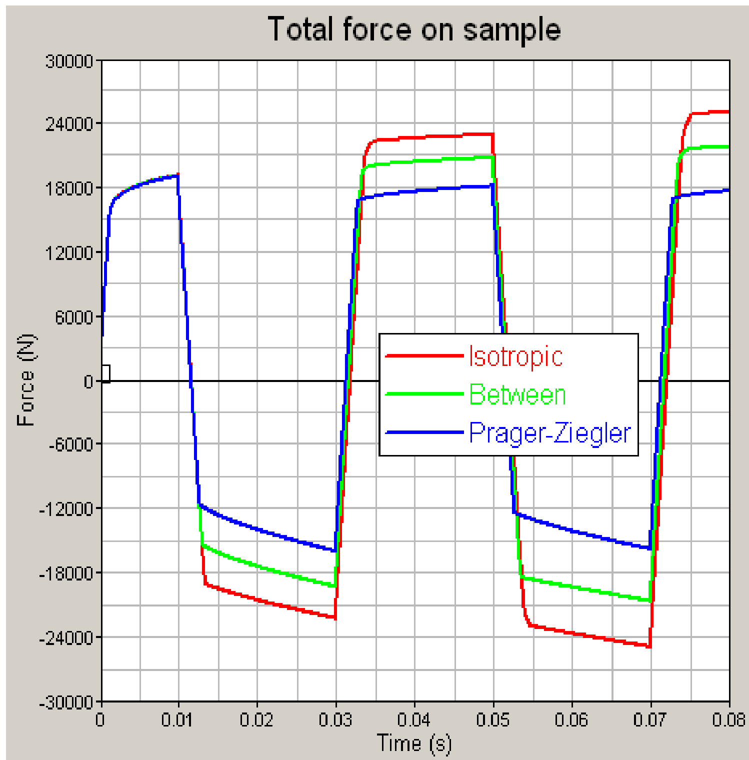


/MAT/PLAS_TAB 或/MAT/LAW36：硬化参数

循环加载（拉伸-压缩）动画



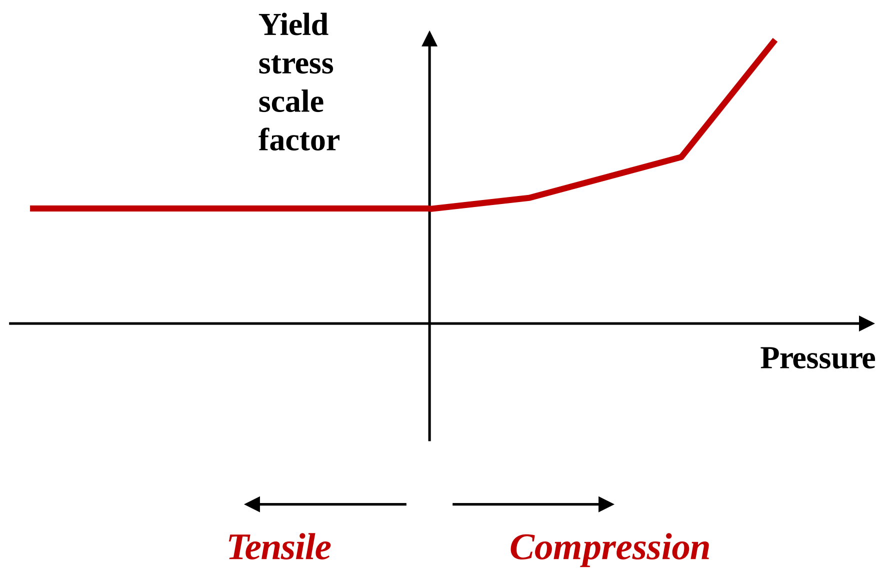




/MAT/PLAS_TAB 或 /MAT/LAW36 : 屈服应力 VS 压力

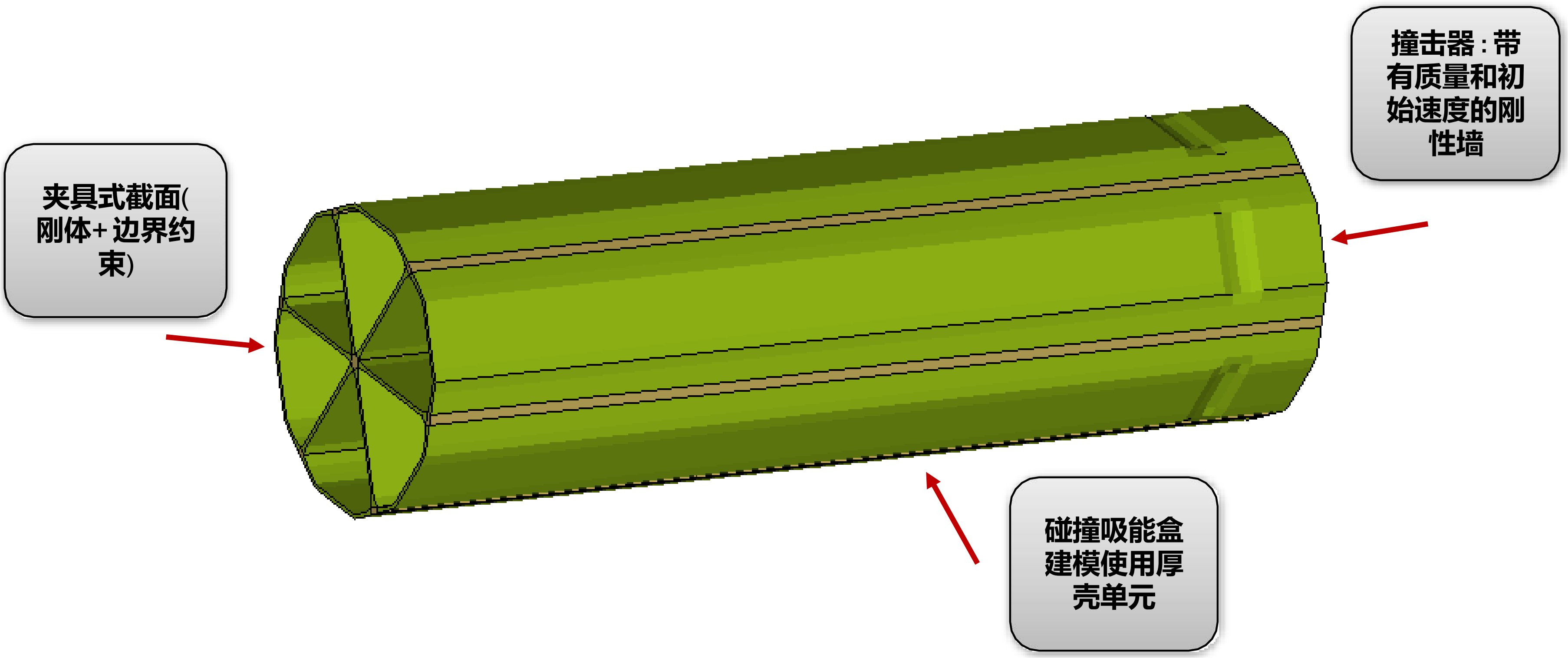
如果屈服应力和压力相关，可以通过fct_ID$_p$函数施加一个缩放系数

函数 fct_ID$_p$ 用于区分某些材料的拉伸和压缩行为



/MAT/PLAS_TAB 或 /MAT/LAW36 : 屈服应力 VS 压力

压力与屈服应力相关的管柱压缩模拟示例:



/MAT/PLAS_TAB 或 /MAT/LAW36：屈服应力 VS 压力

Altair

压力与屈服应力相关的管柱压缩模拟示例 – 卡片信息:

```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/PLAS_TAB/1
ALUMINIUM
#              RHO_I
              2.7E-9                   0
#                  E                  Nu             Eps_p_max                 Eps_t                 Eps_m
               70000                  .3                     0                     0                     0
#  N_funct  F_smooth              C_hard                 F_cut                 Eps_f
         1         1                   0                     0                     0
# func_IDp                Fscale FUNCT_IDE                EINF                    CE
       100                     1
# func_ID1
        52
#           Fscale_1
                   0
#          Eps_dot_1
                   0
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/FUNCT/100
Pressure effect for compression
#                  X                   Y
                  -1                   1
                   0                   1
                  75                 1.1
                 150                 1.3
                 500                   3
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

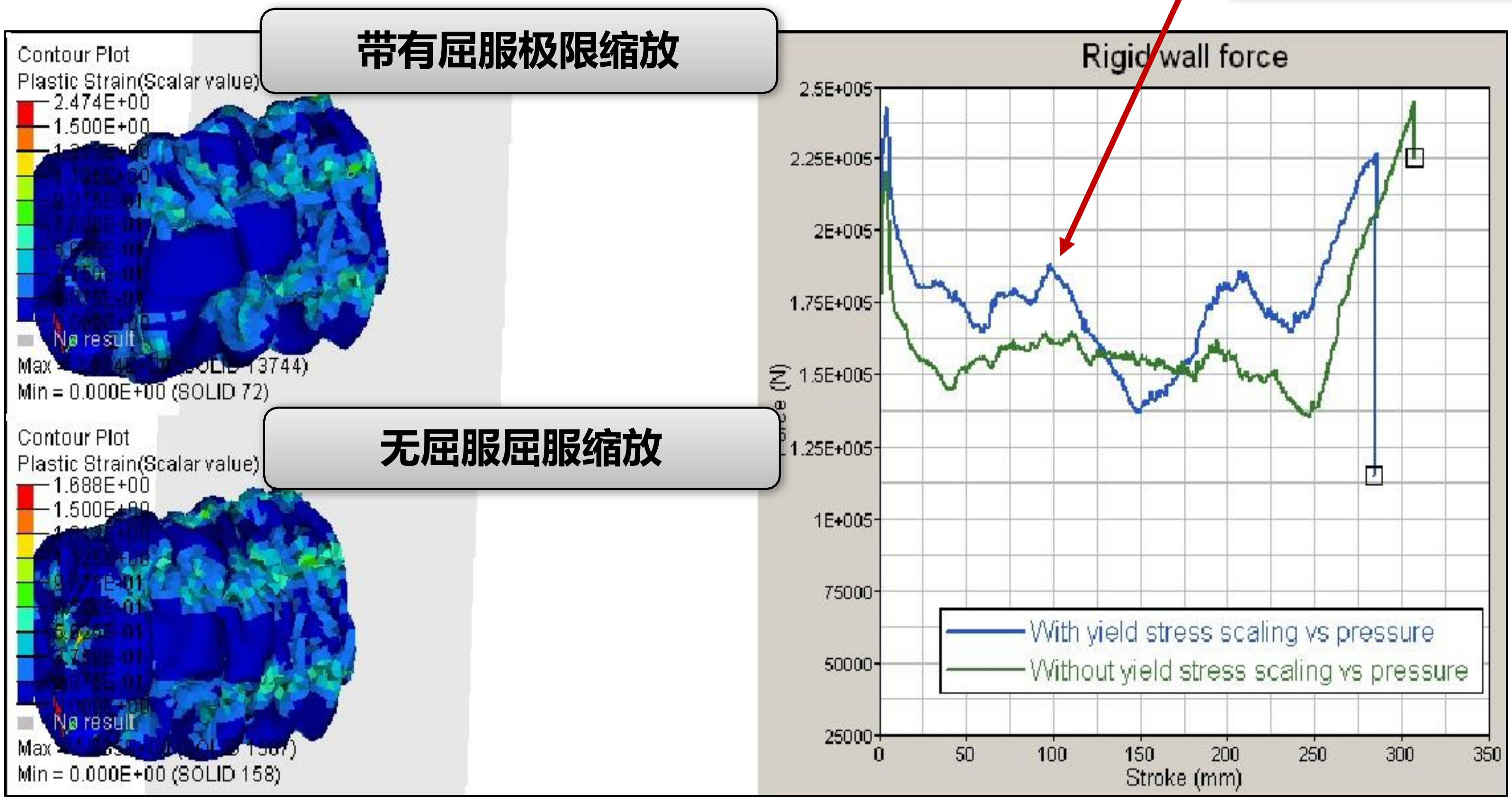
Tension

Compression

/MAT/PLAS_TAB 或 /MAT/LAW36：屈服应力 VS 压力

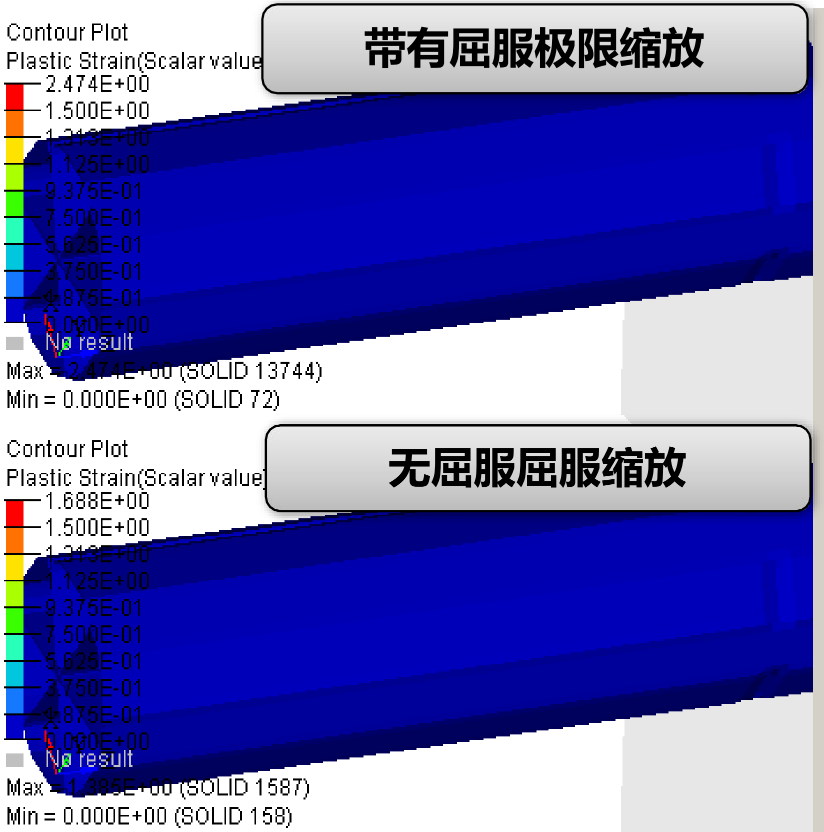
压力与屈服应力相关的管柱压缩模拟示例计算结果

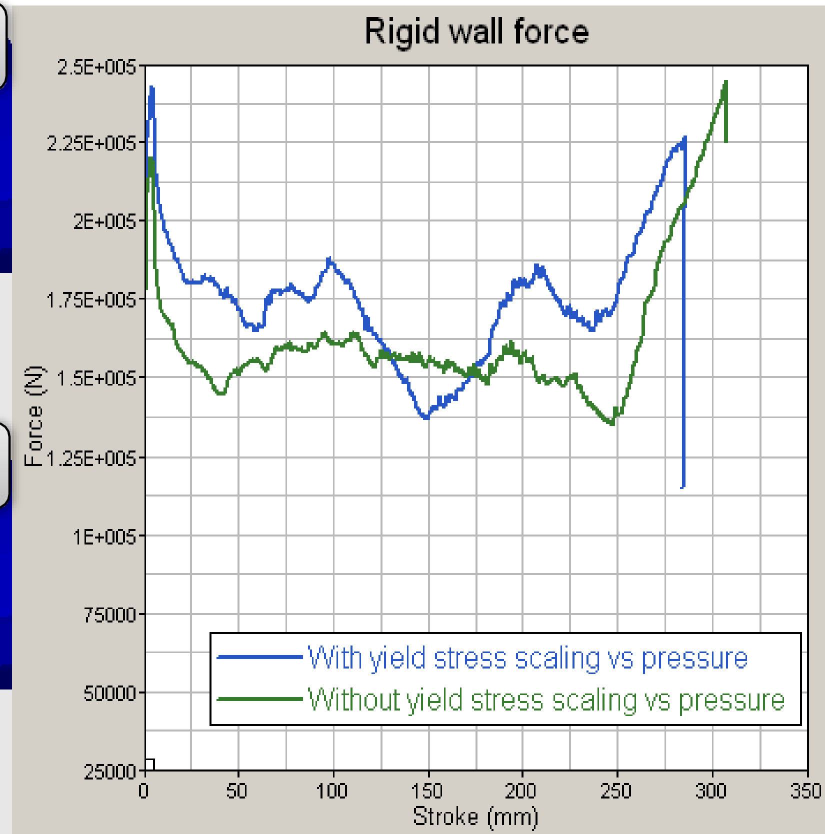
带有屈服极限缩放，压缩力的数值会更大



/MAT/PLAS_TAB 或 /MAT/LAW36：屈服应力 VS 压力

压力与屈服应力相关的管柱压缩模拟示例计算结果





/MAT/PLAS_TAB 或 /MAT/LAW36：屈服应力 VS 压力

Q: 当使用Law36材料模型，用于描述一个塑性定律的行为时，需要在横坐标上的输入什么值?

A: Law36需要在横坐标上输入塑性的真应变值。纵坐标为真实应力。

/MAT/OGDEN 或 /MAT/LAW42 : Ogden, Mooney-Rivlin

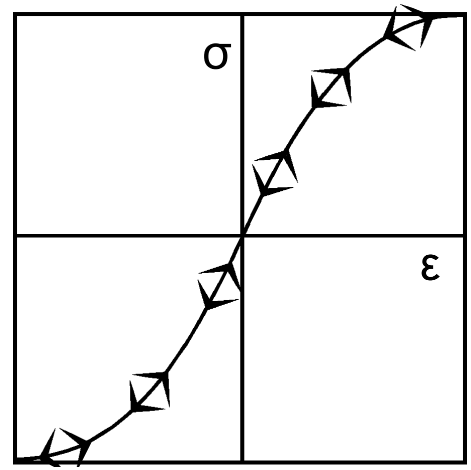
Altair

超弹性行为（非线性弹性）

通常用于聚合物和弹性体的建模

应力–应变曲线以应变能函数W为基础：

$$W(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3)=\sum_p \frac{\mu_p}{\alpha_p}\left(\bar{\lambda}_1^{\alpha_p}+\bar{\lambda}_2^{\alpha_p}+\bar{\lambda}_3^{\alpha_p}-3\right)+\frac{K}{2}(J-1)^2$$



Nonlinear-Elastic

与应变能相关的应力：

$$\sigma_i=\frac{\lambda_i}{J}\frac{\partial W}{\partial \lambda_i}$$

Mooney-Rivlin 给出应变能

$$W=C_{10}\left(I_1-3\right)+C_{01}\left(I_2-3\right)$$

其中:

$$\mu_1=2\cdot C_{10}$$
$$\mu_2=-2\cdot C_{01}$$
$$\alpha_1=2$$
$$\alpha_2=-2$$

Note:

C10 和 C01 的材料参数是通过材料实验得到的。

/MAT/OGDEN 或/MAT/LAW42 : Ogden, Mooney-Rivlin

Altair

超弹性材料卡片信息示例：

将 ν =0.495 设置为一个最大值来
避免时间步长减少

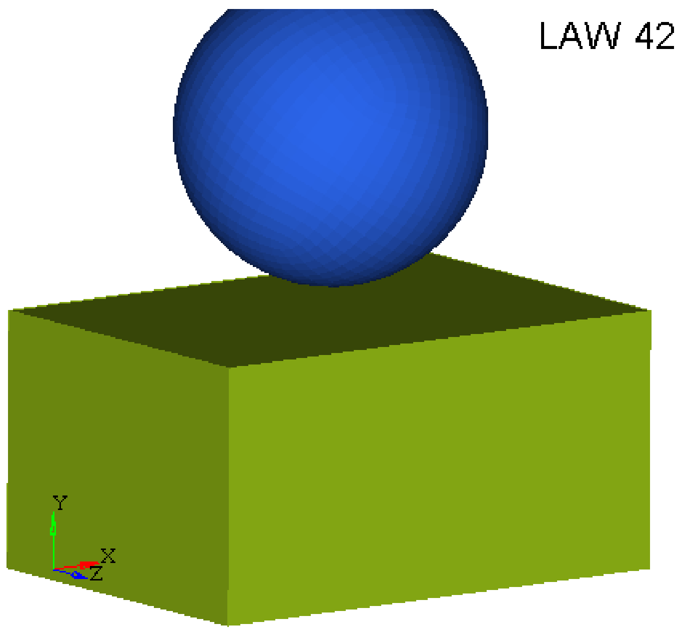
```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/OGDEN/6
Rubber
#              RHO_I
               6E-10                   0
#                 Nu           sigma_cut           funIDbulk         Fscale_bulk         M
                 .49                   0                   0                   0         0
#               Mu_1                Mu_2                Mu_3                Mu_4                Mu_5
                  .1                -.01                   0                   0                   0
# blank card

#            alpha_1             alpha_2             alpha_3             alpha_4             alpha_5
                   2                  -2                   0                   0                   0
# blank card

#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

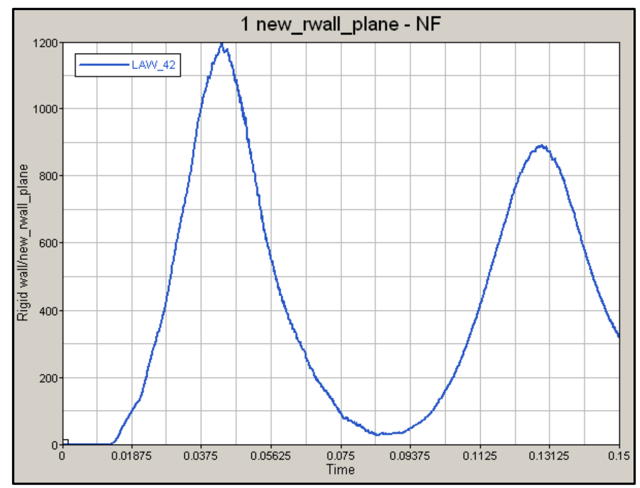
依据Mooney-Rivlin分别将α_1和
α_2设置为 2, -2

/MAT/OGDEN或/MAT/LAW42 : Ogden, Mooney-Rivlin

相应属性的最佳应用:

- **HEPH实体单元公式 (I_{solid} = 24)**
- 拉格朗日类型的总应变 (I_{smstr} = 10)
- 高级切线模量估算 (I_{HKT} = 2)





/MAT/FOAM_TAB 或 /MAT/LAW70：可输入曲线泡沫材料本构

粘弹性行为

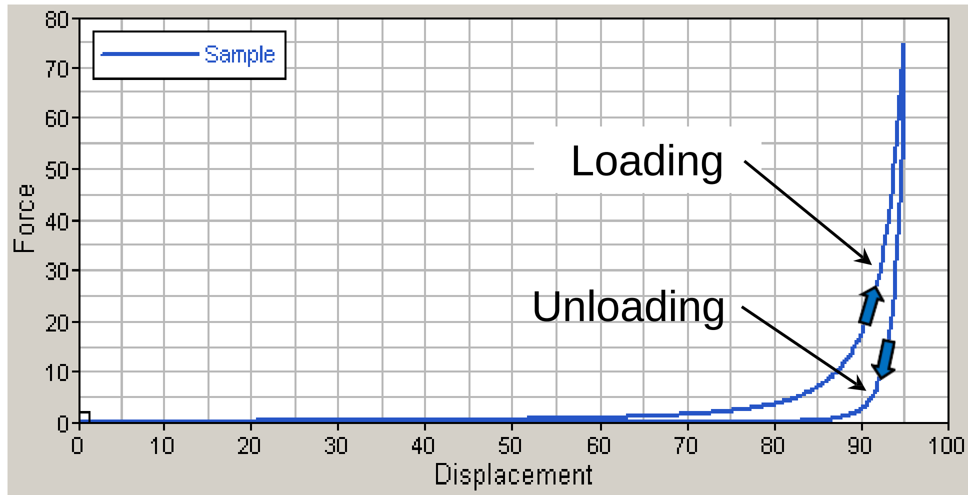
根据应变率函数定义的应力—应变曲线

卸载行为的定义如下:

- 曲线
- 滞回参数

/MAT/FOAM_TAB 或 /MAT/LAW70：可输入曲线泡沫材料本构

- 粘弹性行为
- 较大的压缩比例
- 复杂的应力-应变响应:
  - 压缩加载和卸载曲线是不同的
  - 材料的压缩相应和拉伸相应是不同的
- 带孔洞的泡沫赋予各向同性材料属性



Compression Loading and Unloading Curves

/MAT/FOAM_TAB 或 /MAT/LAW70：可输入曲线泡沫材料本构

/处于压缩状态时**compression**, 应力-应变曲线行为的定义为：

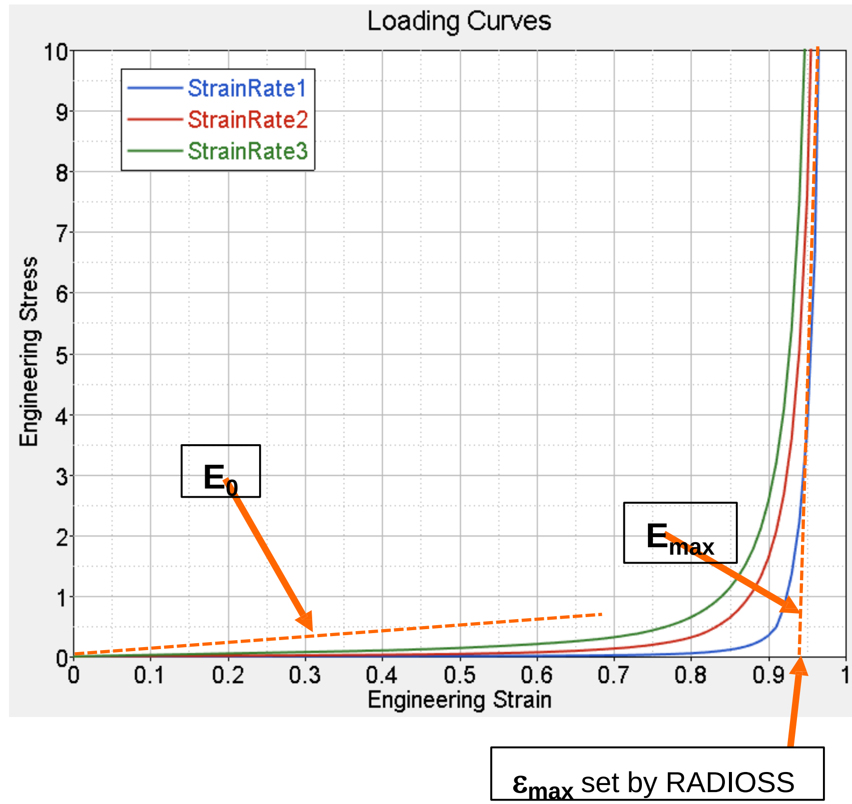
- 加载:根据应变速率函数定义应力应变
- 卸荷:按应变率函数定义应力应变 或者 通过滞后参数， “形状” 和 “Hys”

/ 处于拉伸状态时**tension**, 应力-应变曲线行为的定义为：

- 压缩与拉伸状态间有相同的行为(Itens = 0)
- 压缩和拉伸状态间有不同行为，是基于对一个压缩曲线进行尺度的调节得到 (Itens = 1)

/MAT/FOAM_TAB 或 /MAT/LAW70：可输入曲线泡沫材料本构

- 通过压缩实验，创造一个基于工程应力应变的加载曲线。
- 通过实验和误差数据得到 Shape 和 Hys 的参数，或者通过压缩实验的得到一个卸载曲线。
- 设置 E_0 为初始加载曲线的初始斜率的10倍值。
- 设置默认数值 εmax(1) 和 设置 Emax数值 到能反应出最大泡沫压缩量时的模量数值



/MAT/FOAM_TAB 或 /MAT/LAW70：可输入曲线泡沫材料本构

接触和时间步长的计算需要使用到初始模量。 通常设置 E_0 为初始加载曲线的初始斜率的10倍值

E_{max} 使用能等同于全致密材料（fully densified material）的杨氏模量数值.

EPS_Max, 默认输入数值 1

I_{tens} 用于拉伸效应

```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/LAW70/1
LAW70_seat_foam
#              RHO_I
                5E-8
#                 EO                  NU               E_max             EPS_max     Itens
                 .01                   0                  10                   1
#              F_cut   Ismooth     Nload   Nunload     Iflag               Shape                 Hys
                  .1         1         4         0         4                   2               1E-20
#  fct_IDL          Eps_._load          Fscaleload
         1                   0                .001
         2                 .01                .001
         3                  .1                .001
         3                   1                .001
# fct_IDul        Eps_._unload        Fscaleunload
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

/MAT/FOAM_TAB 或 /MAT/LAW70：可输入曲线泡沫材料本构

```
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
/MAT/LAW70/1
LAW70_seat_foam
#              RHO_I
                5E-8
#                 EO                  NU                E_max                 EPS_max      Itens
                 .01                   0                   10
#              F_cut    Ismooth      Nload    Nunload     Iflag                   Shape                 Hys
                  .1          1          4          0         4                       2               1E-20
#  fct_IDL             Eps_._load                Fscaleload
         1                      0                      .001
         2                    .01                      .001
         3                     .1                      .001
         3                      1                      .001
# fct_IDul           Eps_._unload              Fscaleunload
#---1----|----2----|----3----|----4----|----5----|----6----|----7----|----8----|----9----|---10----|
```

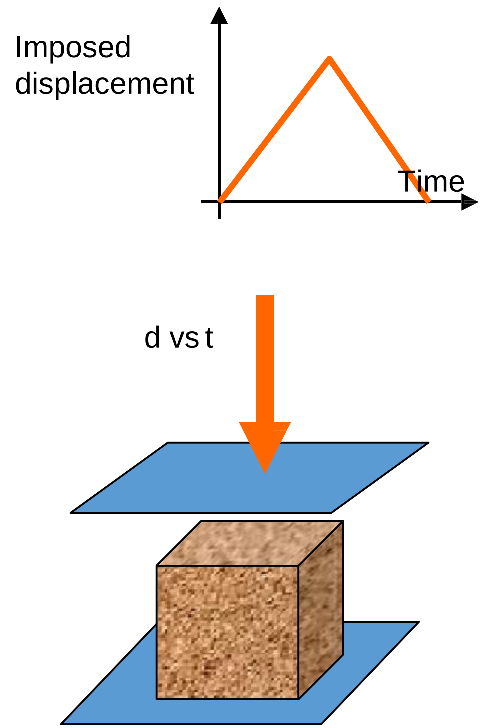
对应每一个应变速率的压缩加载函数，包括对函数的纵坐标(Y)值的倍数调整

加载和卸载曲线的数目

压缩曲线的效应通过 Hysteresis 参数定义，“Shape” 和 “Hys” 通过 I_{flag} = 4， 可设定为推荐值。

/MAT/FOAM_TAB 或 /MAT/LAW70：可输入曲线泡沫材料本构

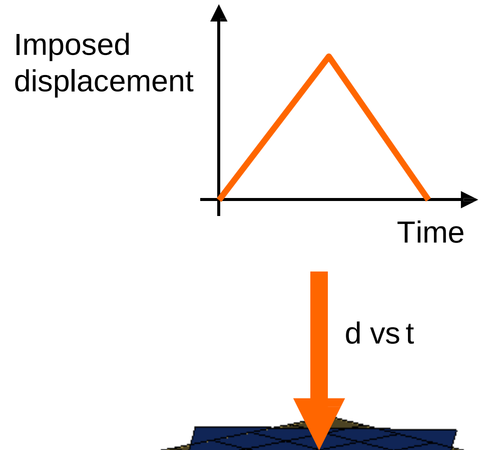
- 压缩实验的确立方式:
  - 力和位移曲线
  - 加载和卸载曲线
- 通过准静态或者更高的速率（高速率的实验是通过 drop tower 仪器来完成的）
- 对压缩实验施加的位移量应该达到最大值 (90 to 95%)
- 工程应力 vs. 应变曲线是通过力 vs. 位移（偏移）曲线来确定

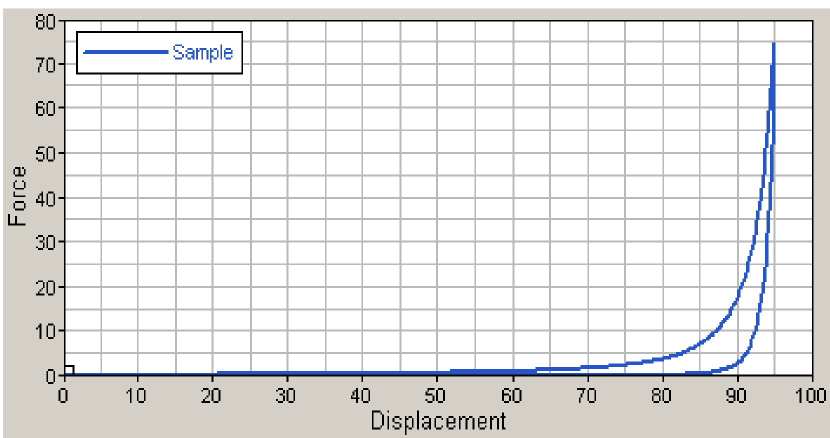


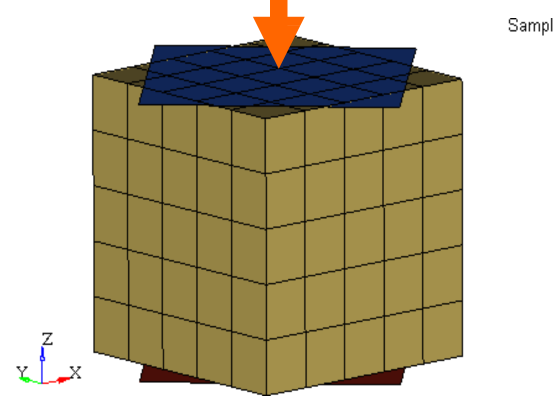
Drop tower for high speed compression test

/MAT/FOAM_TAB 或 /MAT/LAW70：可输入曲线泡沫材料本构

- 建立一个具有代表性的测试模型标本
- 在测试中评估不同的应变率
- 不同应变率下的测试结果可以通过不同的力-位移曲线来做验证



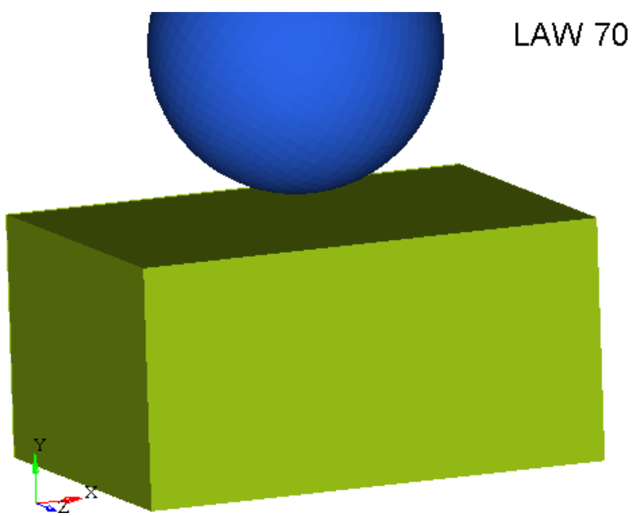


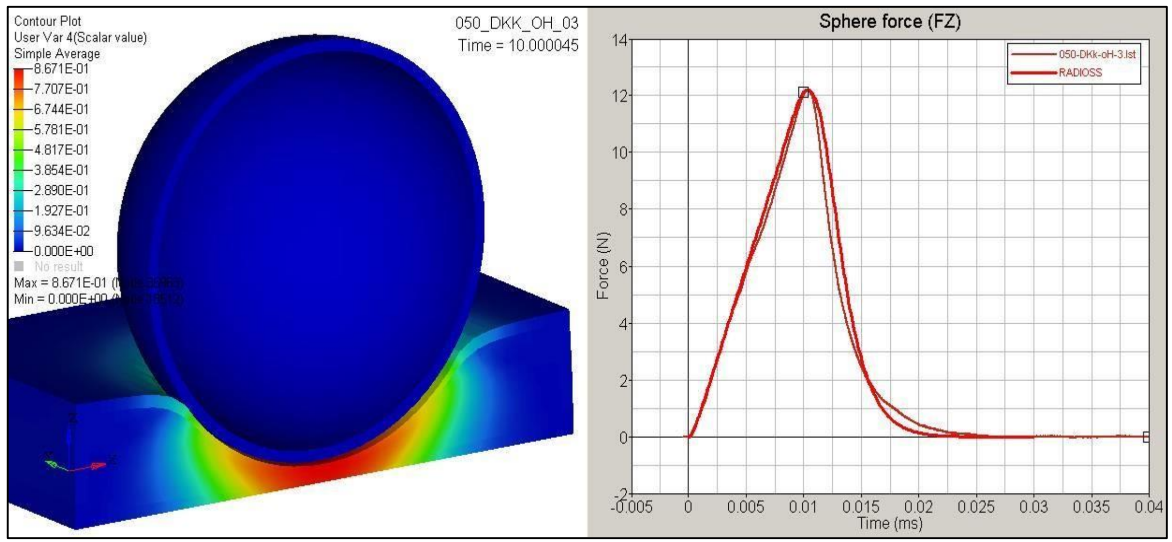


/MAT/FOAM_TAB 或 /MAT/LAW70：可输入曲线泡沫材料本构

相应属性的推荐设置:

- Belytschko实体单元公式 (I_{solid} = 1，or 17针对发生hourglass)
- 小应变(I_{smstr} = 11)





Ball drop test correlation example : EPP foam