

复合材料模型建模与分析

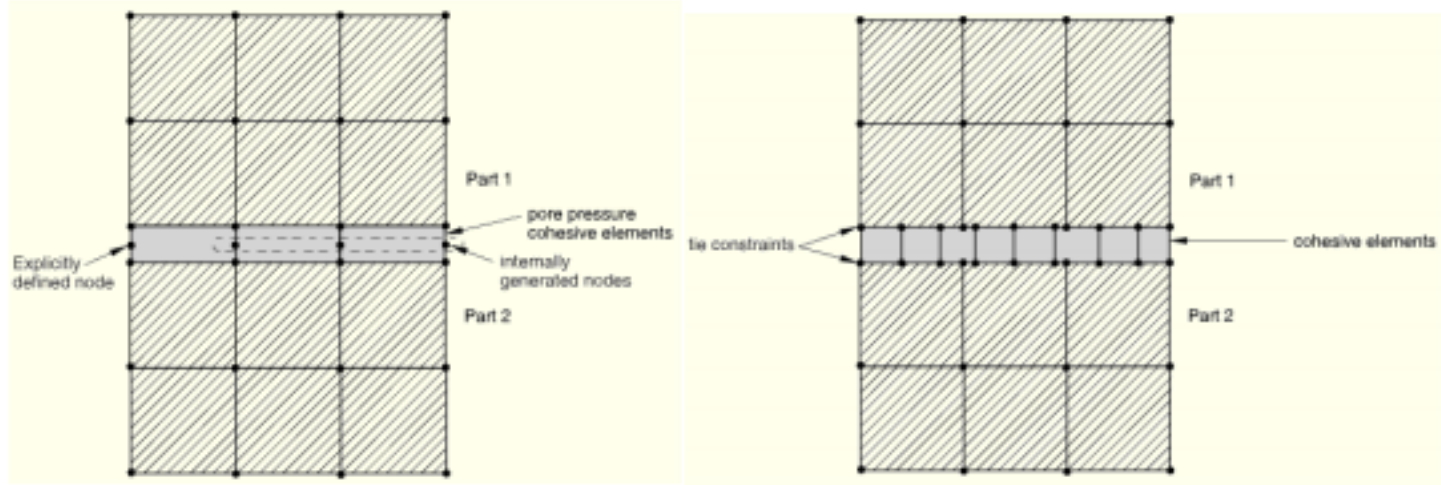
1. Cohesive 单元建模方法

1.1 几何模型

使用内聚力模型 (cohesive zone) 模拟裂纹的产生和扩展, 需要在预计产生裂纹的区域加入 cohesive 层。建立 cohesive 层的方法主要有:

方法一、建立完整的结构 (如图 1(a)所示), 然后在上面切割出一个薄层来模拟 cohesive 单元, 用这种方法建立的 cohesive 单元与其他单元公用节点, 并以此传递力和位移。

方法二、分别建立 cohesive 层和其他结构部件的实体模型, 通过 “tie” 绑定约束, 使得 cohesive 单元两侧的单元位移和应力协调, 如图 1(b) 所示。



(a) cohesive 单元与其他单元公用节点

(b) 独立的网格通过 “tie” 绑定

图 1.建模方法

上述两种方法都可以用来模拟复合材料的分层失效, 第一种方法划分网格比较复杂; 第二种方法赋材料属性简单, 划分网格也方便, 但是装配及 “tie” 很繁琐; 因此在实际建模中我们应根据实际结构选取较简单的方法。

1.2 材料属性

应用 cohesive 单元模拟复合材料失效, 包括两种模型: 一种是基于 traction-separation 描述; 另一种是基于连续体描述。其中基于 traction-separation 描述的方法应用更加广泛。

而在基于 traction-separation 描述的方法中, 最常用的本构模型为图 2 所示的双线性本构模型。它给出了材料达到强度极限前的线弹性段和材料达到强度极限后的刚度线性降低软化阶段。注意图中纵坐标为应力, 而横坐标为位移, 因此线弹性段的斜率代表的实际是 cohesive 单元的刚度。曲线下的面积即为材料断裂时的能量释放率。因此在定义 cohesive 的力学性能时, 实际就是要确定上述本构模型的具体形状: 包括刚度、极限强度、以及临界断裂能量释放率, 或者最终失效时单元的位移。常用的定义方法是给定上述参数中的前三项, 也就确定了 cohesive 的本构模型。Cohesive 单元可理解为一种准二维单元, 可以将它看作被一个厚度隔开的两个面, 这两个面分别和其他实体单元连接。Cohesive 单元只考虑面外的力, 包括法向的正应力以及 XZ, YZ 两个方向的剪应力。

下文对 cohesive 单元的参数进行阐述, 并介绍参数的选择方法。

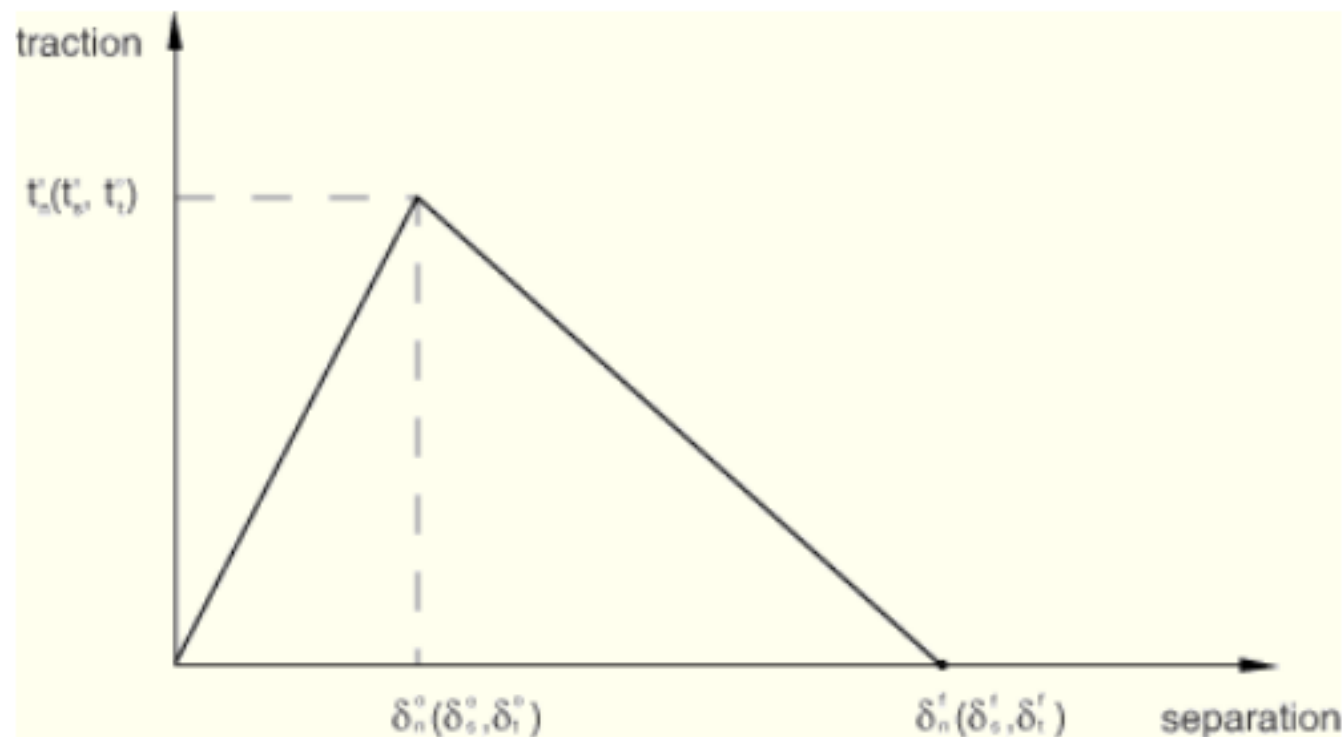


图 2. 双线性本构模型

1.2.1 cohesive 单元的刚度

基于 traction-separation 模型的界面单元的刚度可以通过一个简单杆的变形公式来理解

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (1)$$

其中 L 为杆长， E 为弹性刚度， A 为初始截面积， P 为载荷。公式 (1) 又可以写成

$$\delta = \frac{S}{K} \quad (2)$$

其中 $S = P/A$ 为名义应力， $K = E/L$ 为材料的刚度。

为了更好的理解 K ，我们把 $K = E/L$ 写成：

$$K = \frac{E}{L} = \frac{E/L}{1} = \frac{E/L}{L'} \quad (3)$$

这里我们用 L' 来代替 1，其中 L 可以理解为建模厚度，即建模时 cohesive interface 的几何厚度； L' 为实际厚度，即 cohesive interface 的真实厚度，这个厚度在 cohesive section 中定义。

E/L 可以理解为几何刚度，即模型中 cohesive interface 所具有的刚度； $\frac{E/L}{L'}$ 为 cohesive interface 的真实刚度。

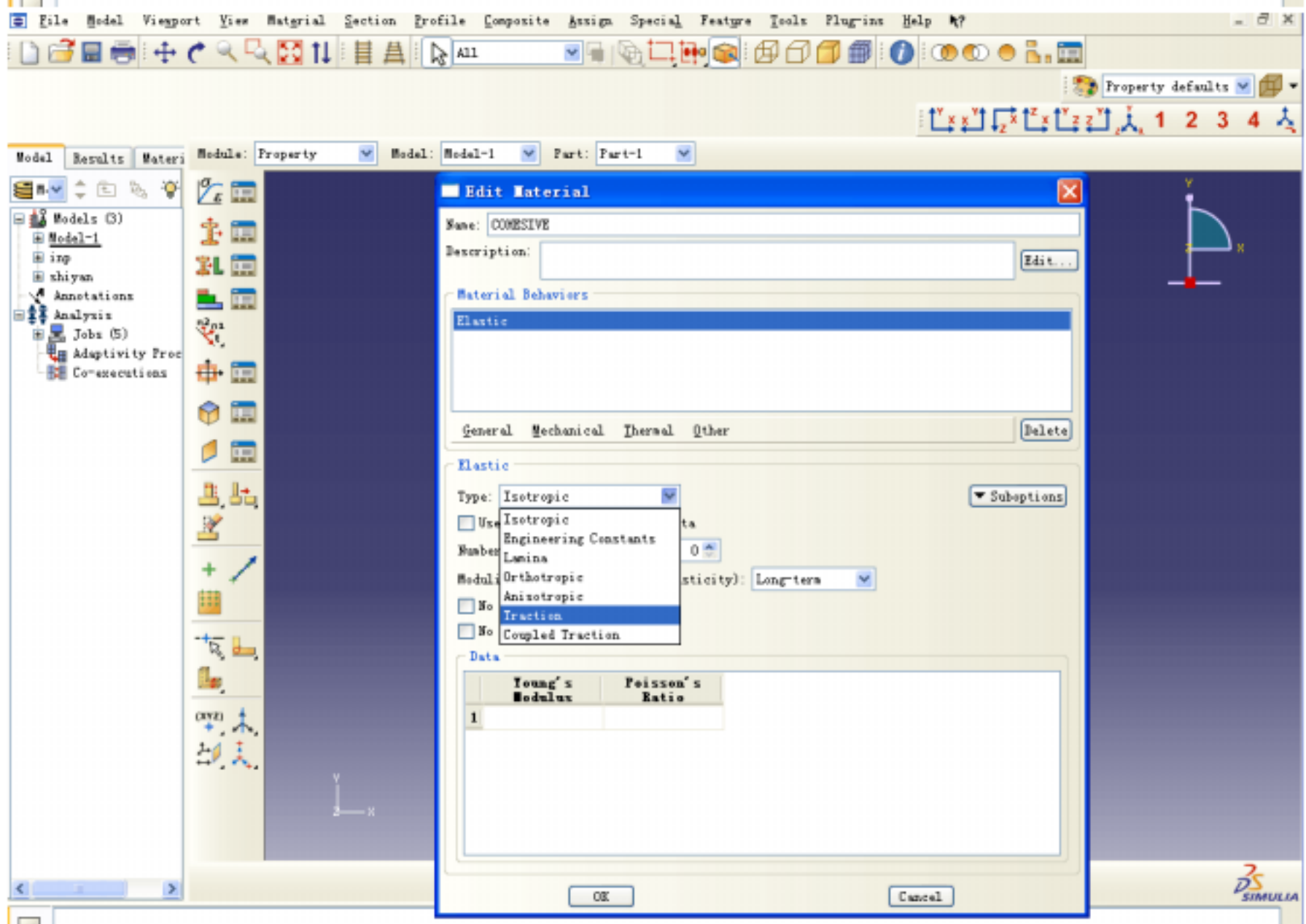
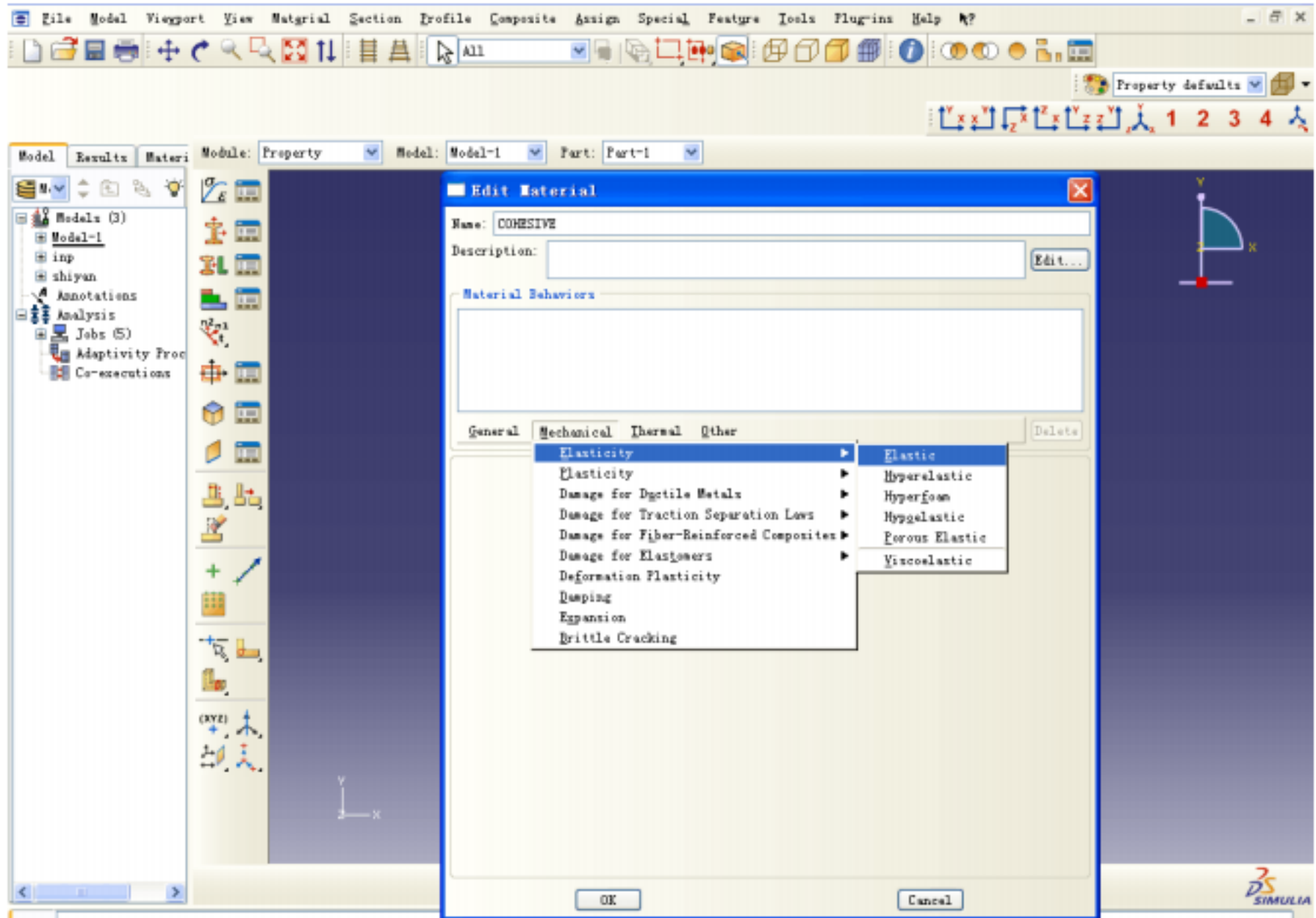
当 L' 为 1 时，计算界面刚度就采用几何刚度 E/L ，当 L' 为 0.001 时，

计算时界面刚度变为 $1000 E/L$ 。举个小例子，如果界面的实际厚度为 0.01，而在建模时就是按照这个厚度建立的，在定义 material-section 时又 specify 这层的厚度为 0.01，实际上就等于把界面刚度提高了 2 个数量级，模拟结果当然是不对的，这时定义 section 时应采用默认厚度 1。

ABAQUS 在 cohesive 建模中使用了很“人性化”的设计，实际问题中界面可能很薄，有的只有 0.001mm，甚至更小。有些问题 cohesive 单元的 interface 还可能是 0 厚度（比如 crack 问题），而相对来说整体模型也许很大，如果不引入这两个厚度，我们就要在很大的模型中去创建这个很小的界面这是一个很麻烦的事情。引入这两个厚度，在建模时我们就可以用有限的厚度来代替这个很小的界面厚度，只要在 section 中定义这个 L' 就好了。（注：以上大部分内容来自仿真论坛：再议 cohesive 应用中对于一些参数的理解）

下面举例来说明 cohesive 单元刚度的设置过程，以 ABAQUS6.9 为例：

进入 property 界面，点击 Material Creat，在弹出的 Edit Material 对话框中，可以编辑新创建的 cohesive 材料的名称，然后点击 Mechanical Elasticity Elastic Traction，在空格中输入相应的刚度。



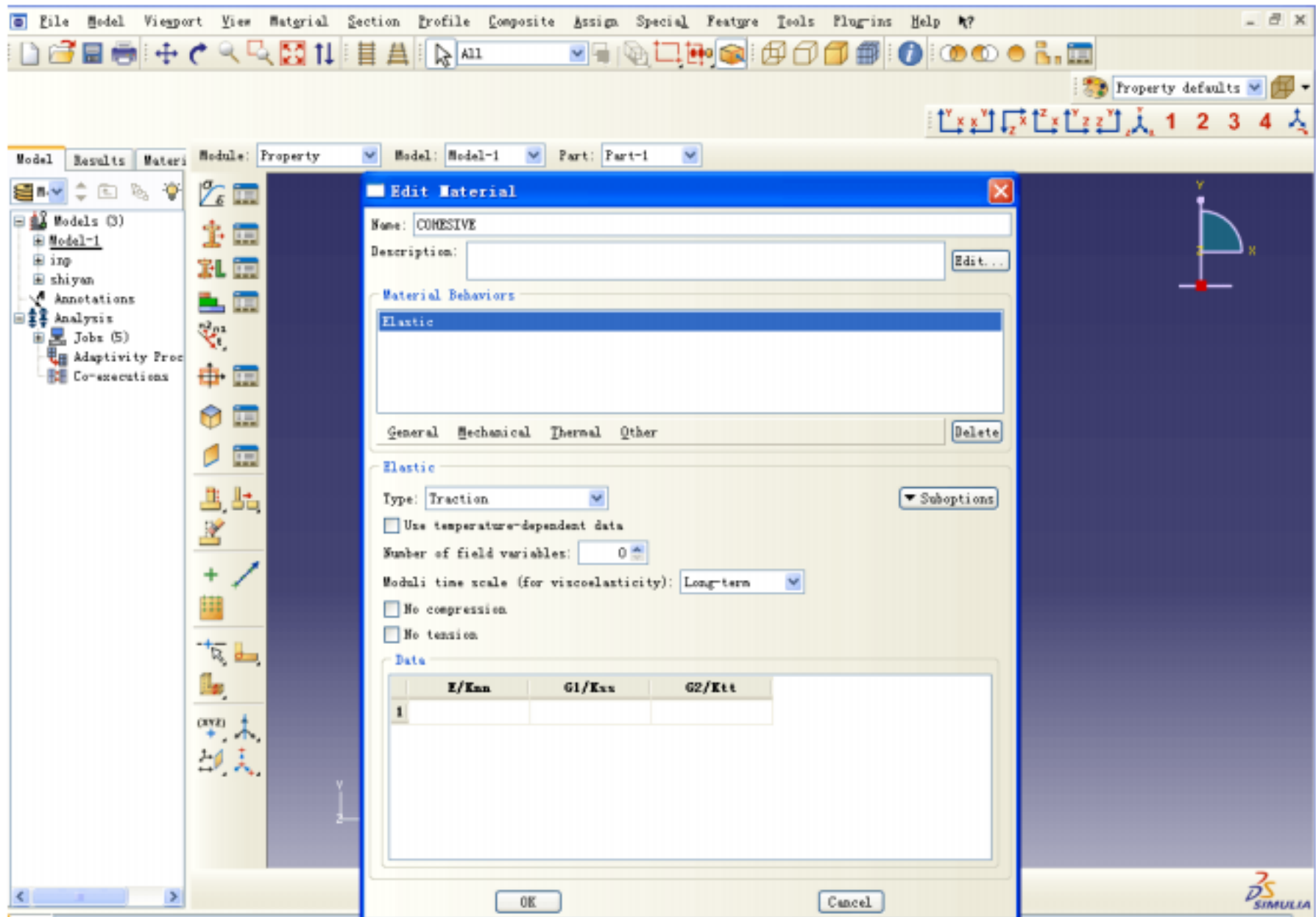


图 3. cohesive 单元刚度的定义

1.2.2 损伤准则

1.2.2.1 初始损伤准则

初始损伤对应于材料开始退化，当应力或应变满足于定义的初始临界损伤准则，则此时退化开始。Abaqus 的 Damage for traction separation laws 中包括：Quade Damage、Maxe Damage、Quads Damage、Maxs Damage、Maxpe Damage、Maxps Damage 六种初始损伤准则，其中前四种用于一般复合材料分层模拟，后两种主要是在扩展有限元法模拟不连续体（比如 crack 问题）问题时使用。

使用图 2 所示的双线本构模型，其中： t_n^0 、 t_s^0 及 t_t^0 分别代表纯型、纯型或纯破坏的最大名义应力， ε_n^0 、 ε_s^0 ， ε_t^0 代表相应的最大名义应变，当定义界面单元的初始厚度为 1 时，则名义应变等于与之相对应的相对位移 δ_n ， δ_s 及 δ_t 。

Quade Damage 为二次名义应变准则：当名义应变比的平方和等于 1 时，损伤开始。

$$\left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0} \right\}^2 = 1$$

Maxe Damage 为最大名义应变准则：当任何一个名义应变的比值达到 1 时，损伤开始。

$$\max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0}, \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_t^0} \right\} = 1$$

Quads Damage 为二次名义应力准则：当各个方向的名义应变比的平方和等于 1 时，损伤开始。

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1$$

Maxs Damage 为最大名义应力准则：当任何一个名义应力比值达到 1 时，损伤开始。

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1$$

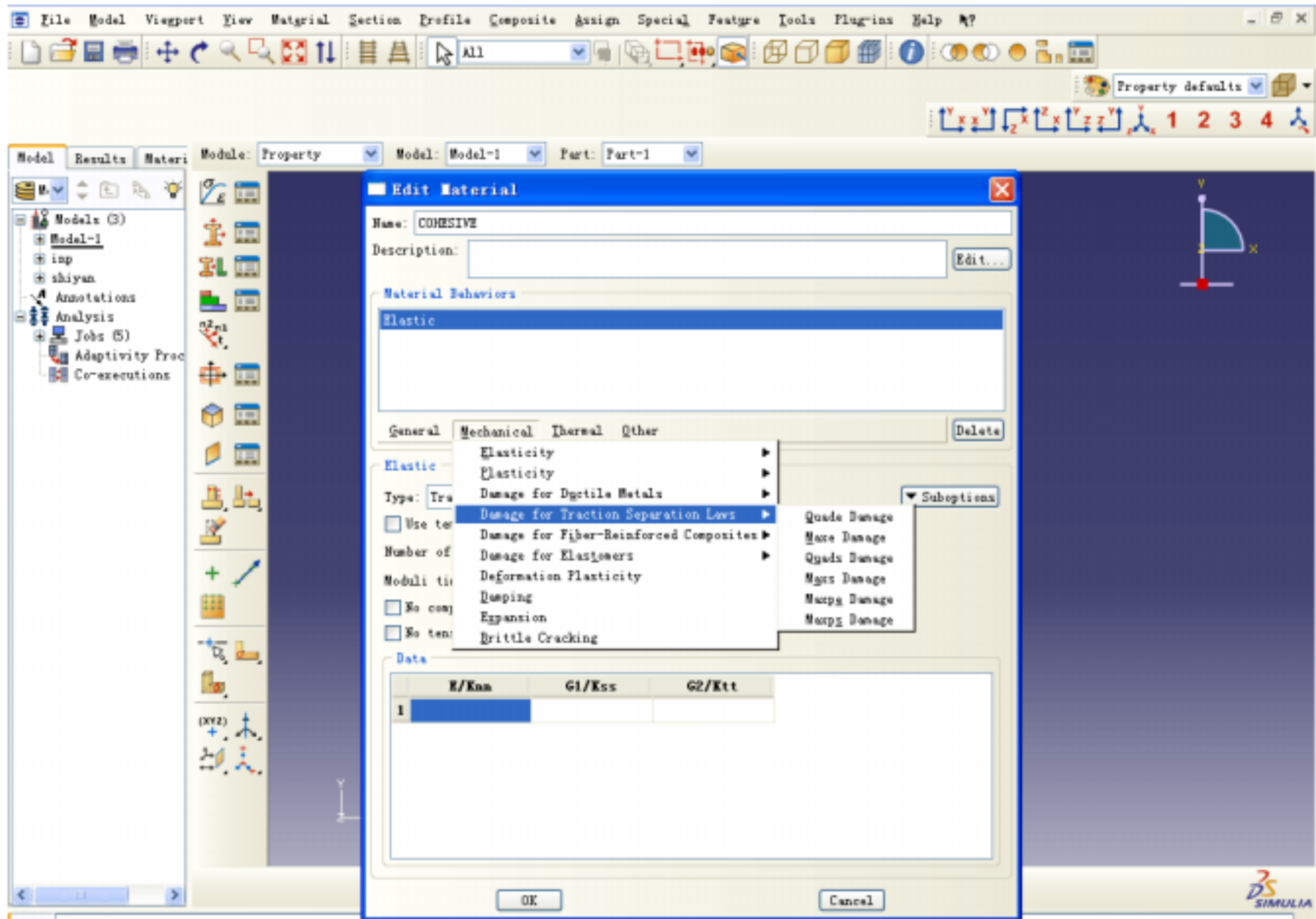


图 4. 初始损伤准则定义

Edit Material 对话框中，点击 Mechanical Damage for Traction Separation Laws，然后根据自己的需要点击相应的损伤准则。其中最常用是 Quads Damage。

1.2.2.2 损伤演化规律

选择了初始损伤准则之后，然后点击 Suboptions Damage Evolution，窗口如图 5 所示。其中 Type 包括 Displacement 和 Energy，Displacement 为基于位移的损伤演化规律，而 Energy 为基于能量的损伤演化规律。Softening 中包括 Linear，Exponential 及 Tabular 三种刚度退化方式…… Damage Evolution 中的所有的选项都是用来确定单元达到强度极限以后的刚度降阶方式。一般常用：以能量来控制单元的退化，即 Type Energy；线性软化模型，即 Softening Linear，Degradation Maximum；Mixed mode behavior BK，Mode mix ratio Energy，并选中 Power。

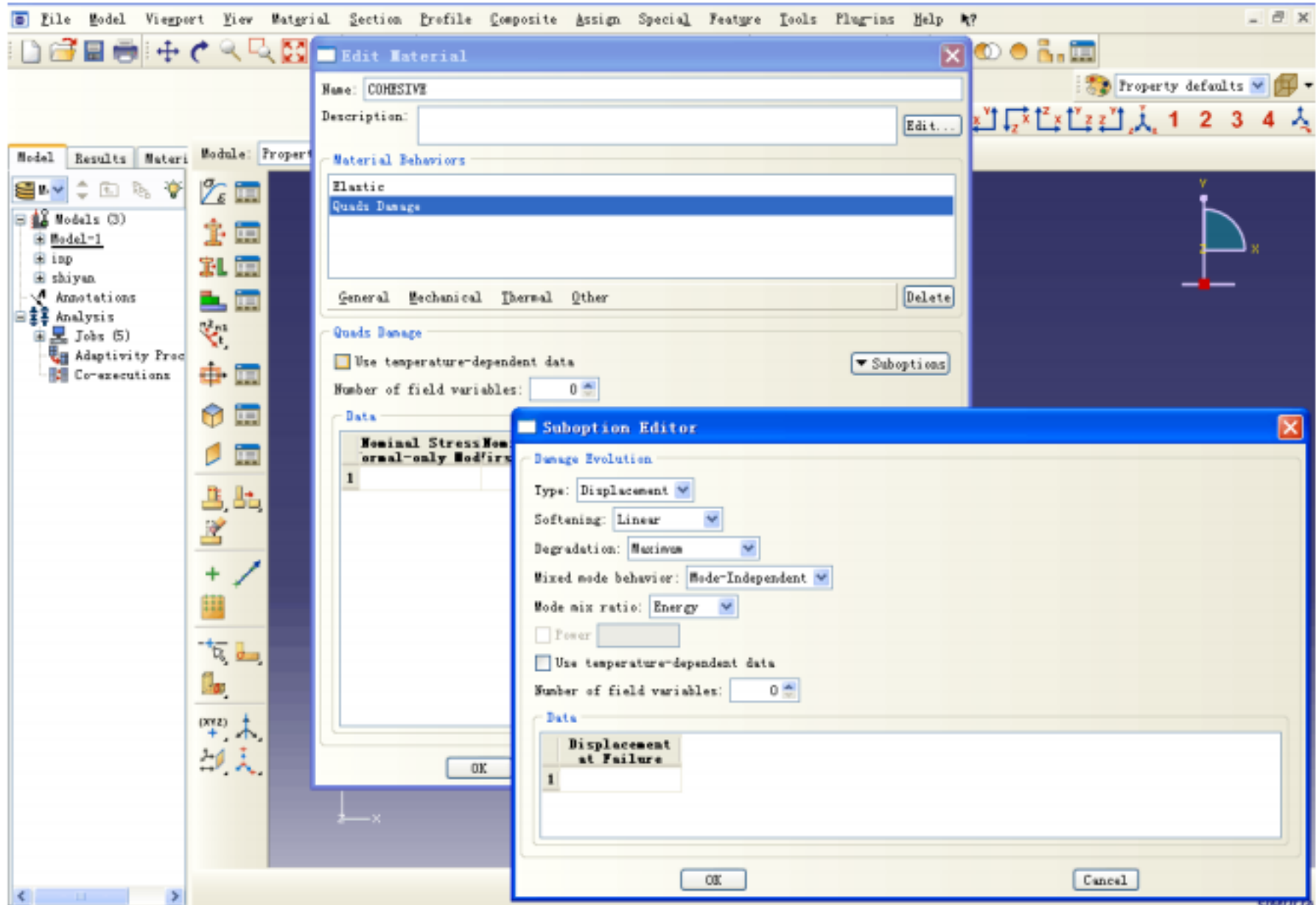


图 5.损伤演化规律定义

1.3 cohesive 单元界面属性

还是在 Property 界面中，点击 Section Create，在弹出的 Edit Section 对话框中，选择 Other Cohesive。

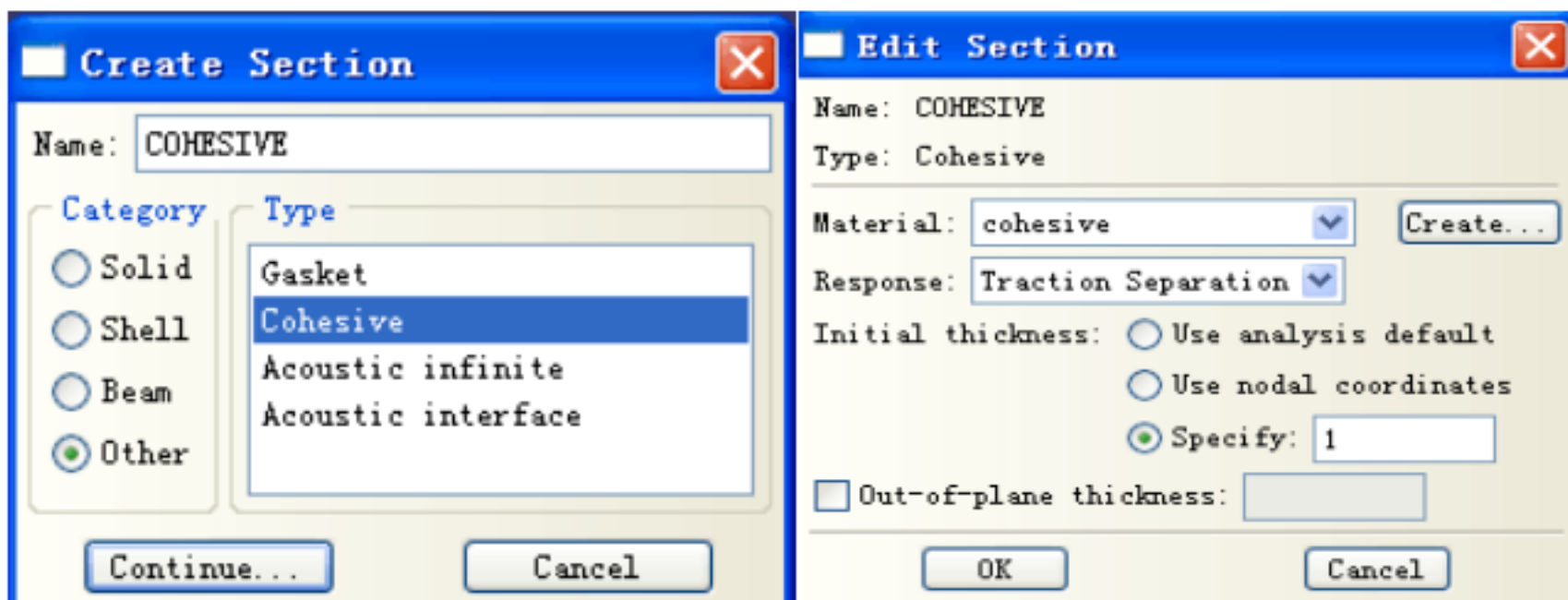


图 6. 定义材料的界面属性

在 Edit Section 对话框中，在 material 的下拉菜单中选择刚才创建的 cohesive 材料，也可以点击右侧的 create 创建一组新的材料；Response 选择 traction separation。Initial thickness 为前文提到的 L' ，默认值为 1，也可以在 specify 中指定一个特定的值。

1.4 将所创建的界面属性赋予几何实体

点击 Assign Section，然后在视图中选中要赋的几何实体，点击左下角的 Done，则弹出如下窗口，在窗口是 Section 中下拉选中所创建的 Cohesive 截面，点击 OK,操作完成。

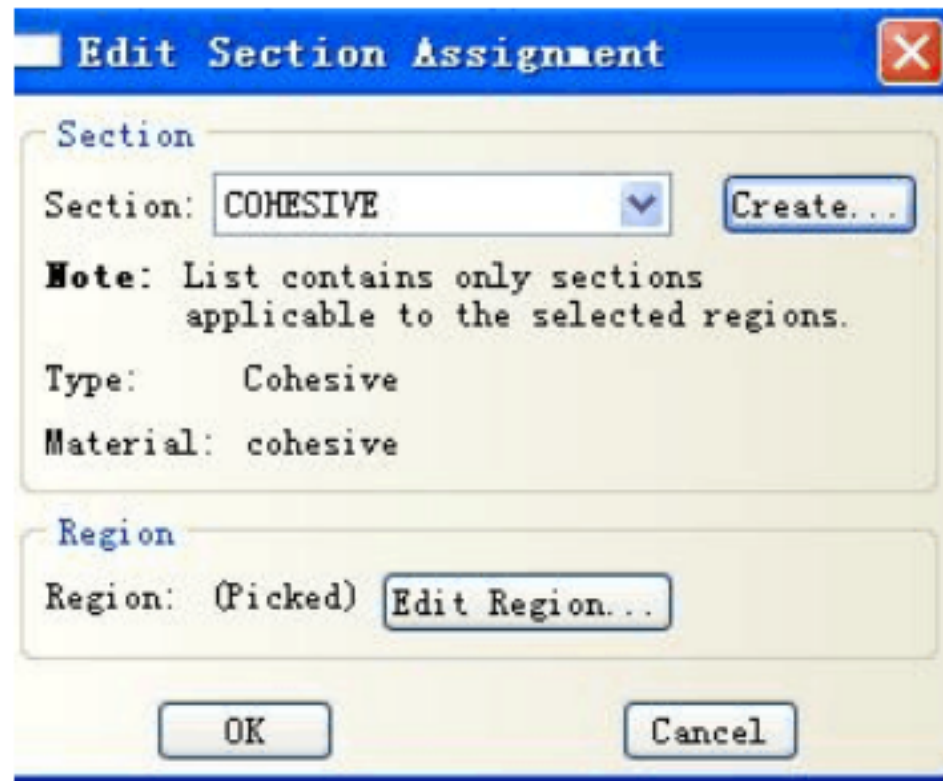


图 7. 给实体赋截面属性

1.5 cohesive 单元网格划分

Cohesive 单元网格的划分与其他单元基本一致，但是以下几点不同与其他单元，划分网格时应特别注意。

- 一、 网格密度， cohesive 单元的网格尺寸不能太大，通常需要比较精细的网格，不然容易引起收敛性问题，甚至无法继续计算。
- 二、 必须使用 sweep (扫掠) 划分网格的方法，并且扫掠的方向垂直于 cohesive 面，即沿着 cohesive 单元的厚度方向。
- 三、 单元种类的选择

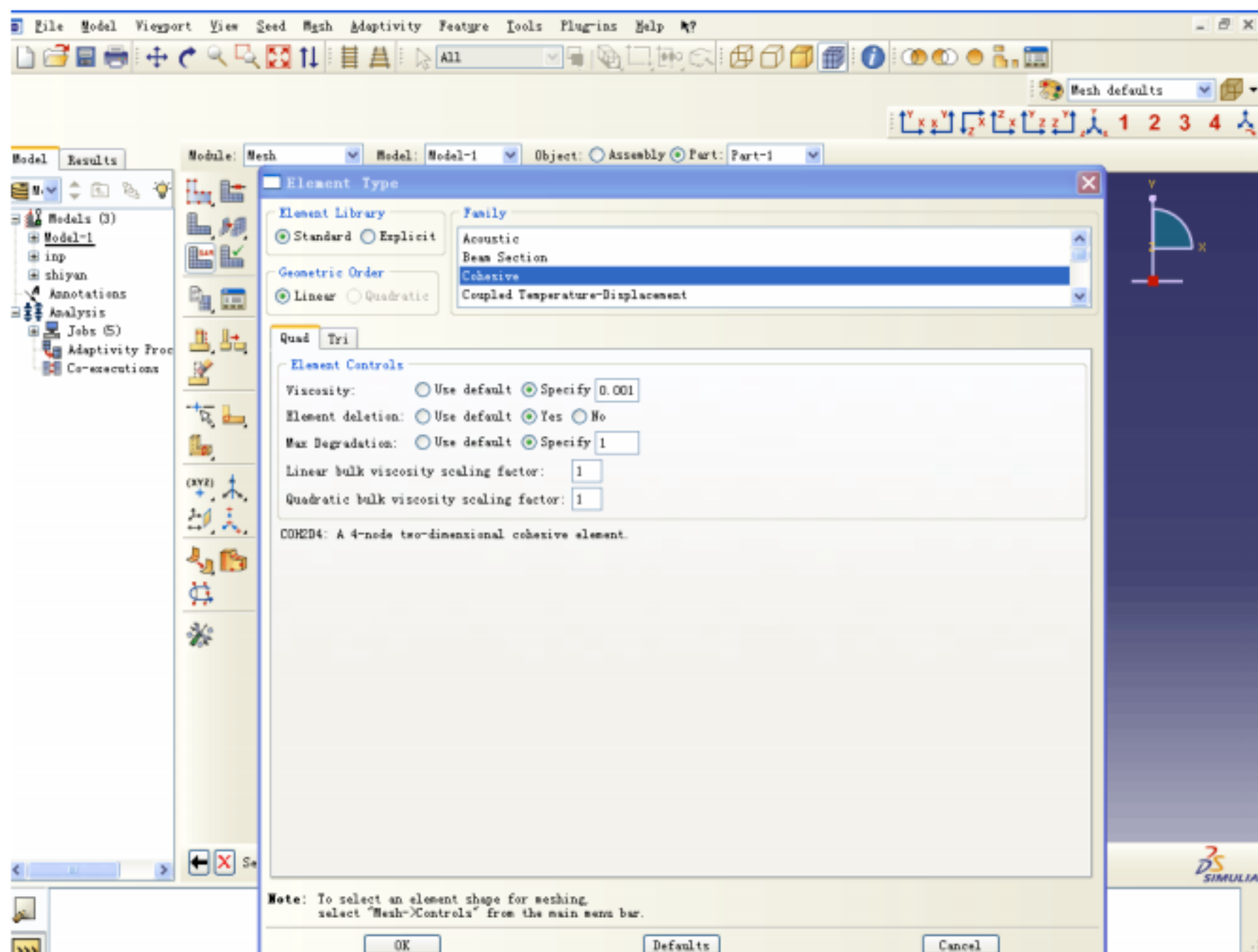


图 8.cohesive 单元种类选择

在单元库中选择 cohesive，可以在 Viscosity，specify 中指定一粘性系数，来改善收敛性，

但是粘性系数的设置不能太大，不然会影响计算结果，我们一般设置为 0.001；Element deletion：用于设置单元的删除情况，一般选 yes，即当单元完全失效时被删除；max degradation：一般设置为 1，即当 SDEG=1 时，认为单元失效。

2. cohesive 单元在复合材料分层分析中的应用

为了验证商用有限元软件 ABAQUS 中的 cohesive 单元在复合材料分层计算时的有效性，我们通过其与一实验值的对比验证了其计算的准确性。

— DCB 试验件，长 150mm，宽 20mm，单臂厚度 1.98mm，预置 55mm 长的初始裂纹，如图 9 所示。材料属性为 $E_{11}=150\text{GPa}$ ， $E_{22}=E_{33}=11\text{GPa}$ ， $G_{12}=G_{13}=6.0\text{GPa}$ ， $G_{23}=3.7\text{GPa}$ ， $\nu_{12}=0.25$ ， $\nu_{13}=0.25$ ， $\nu_{23}=0.45$ ；cohesive 单元的材料属性为 $K=1 \times 10^5 \text{MPa/mm}$ ，界面强度 $T=15\text{MPa}$ ，临界能量释放率 $G_{IC}=0.268 \text{KJ/m}^2$ 。悬臂梁一端固支，一端施加位移载荷。

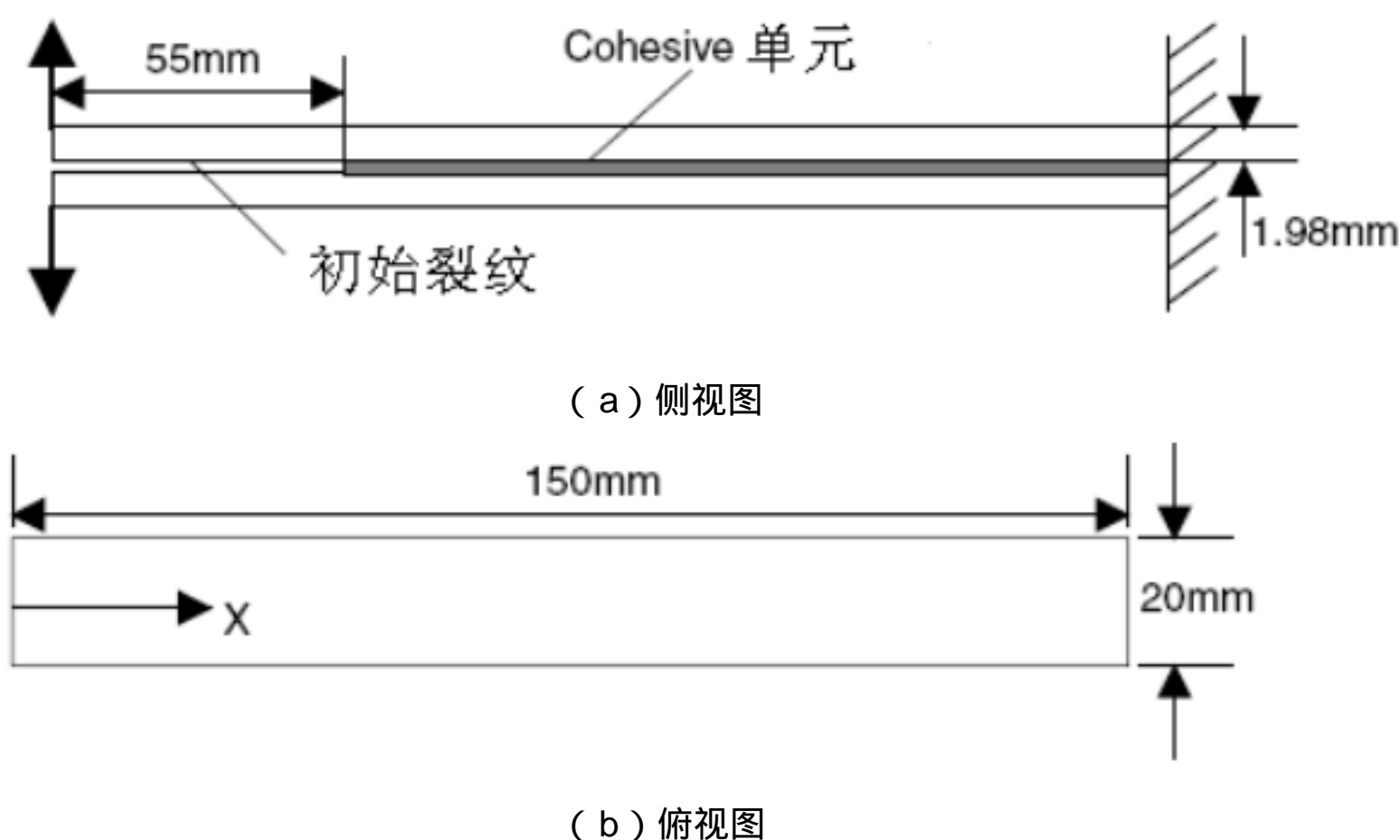
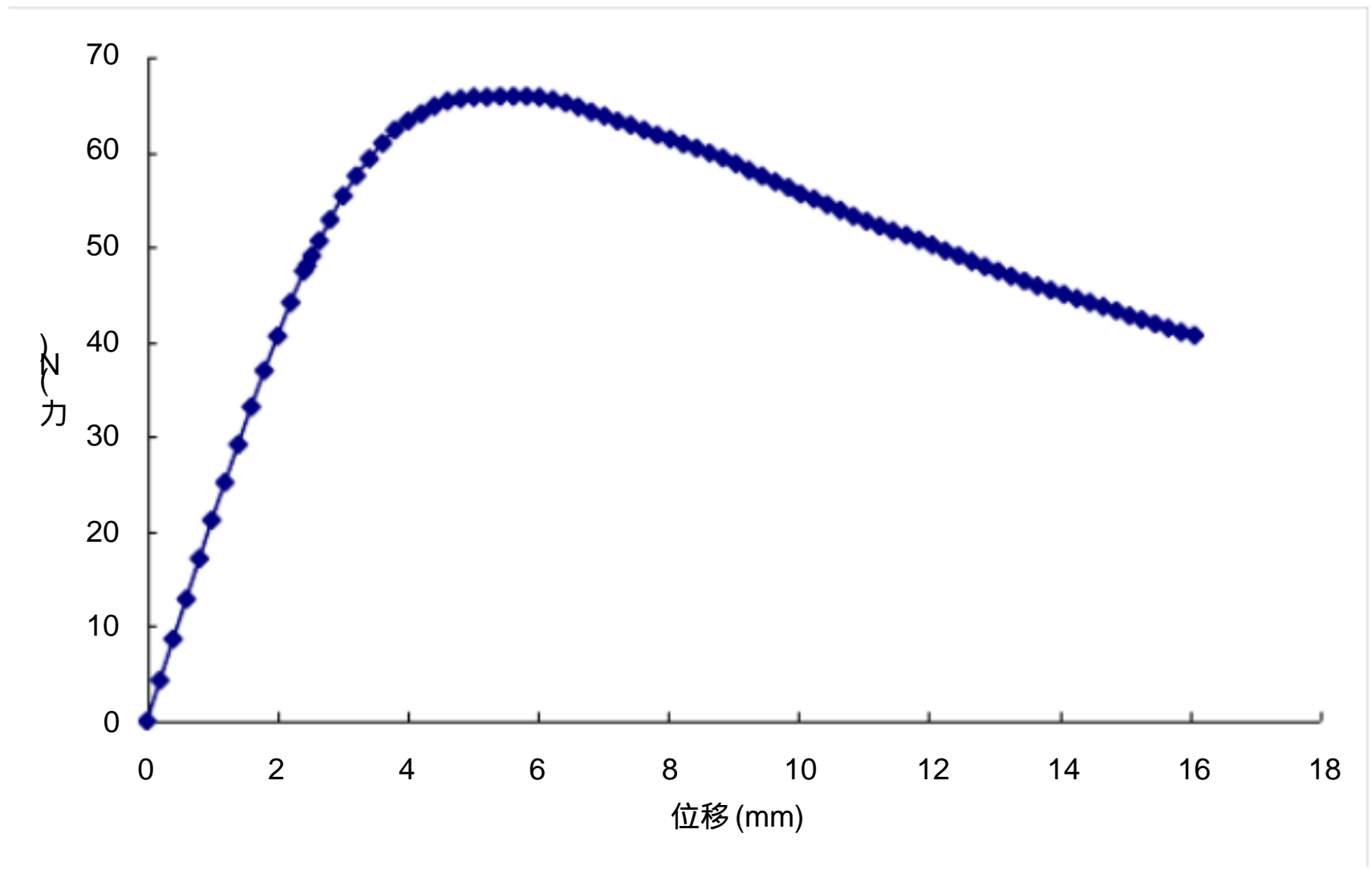
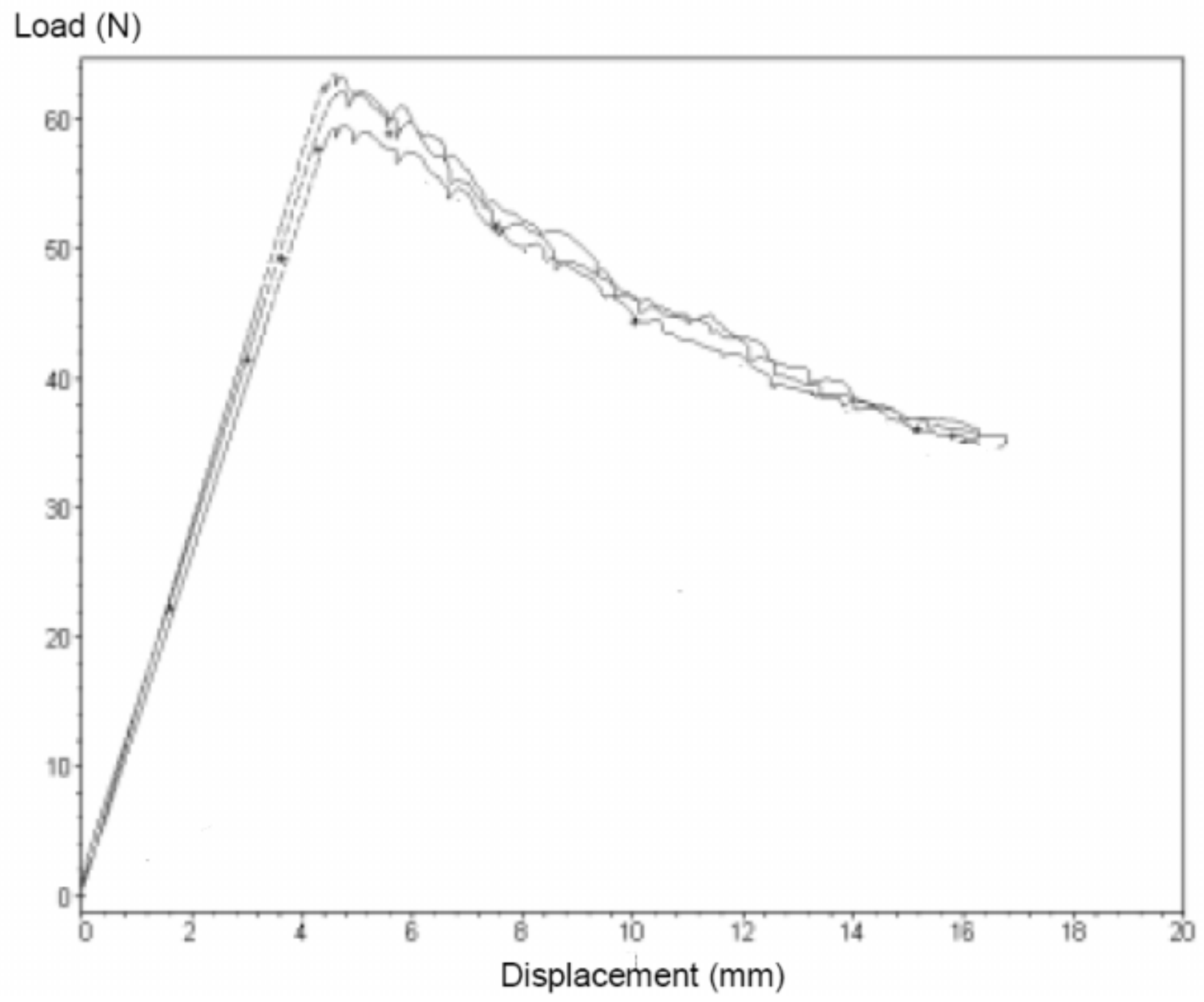


图 9. DCB 几何模型

Abaqus 和实验 [1] 得到的力位移曲线如图 10 所示，从图中可以看出，数值模拟的力位移曲线与实验得到的力位移曲线吻合的很好，数值模拟得到的最大力为 65.8N，而实验得到的最大力为 62.52N，数值模拟结果略高于实验结果。由此，我们可以得到有限元软件 ABAQUS 中的 cohesive 单元可以有效的模拟复合材料层合板的分层。计算得到的变形过程的应力及位移云图如图 11、12 所示。



(a) abaqus 计算值



(b) 实验值

图 10. 实验及数值模拟结果

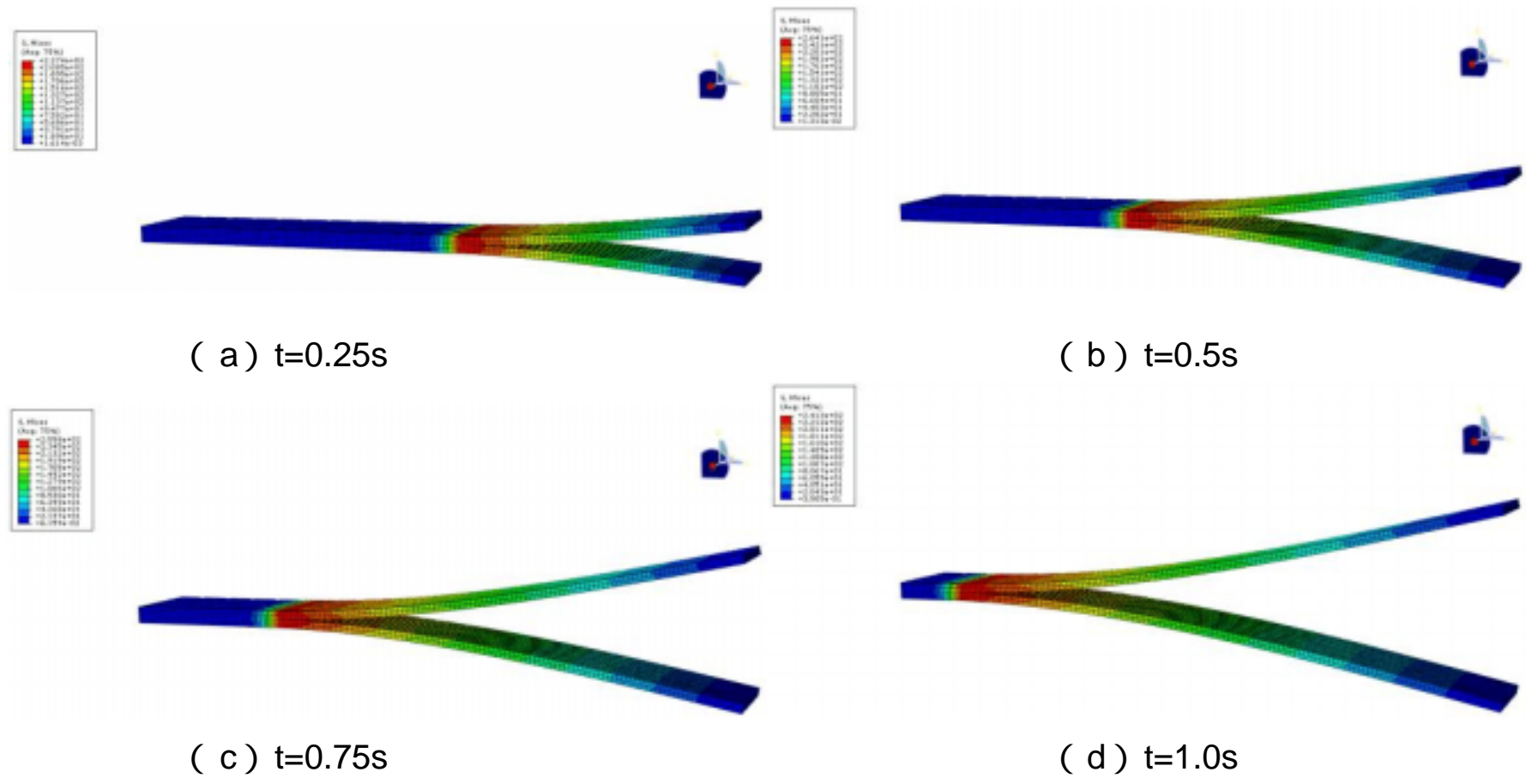


图 11. 变形过程中应力云图

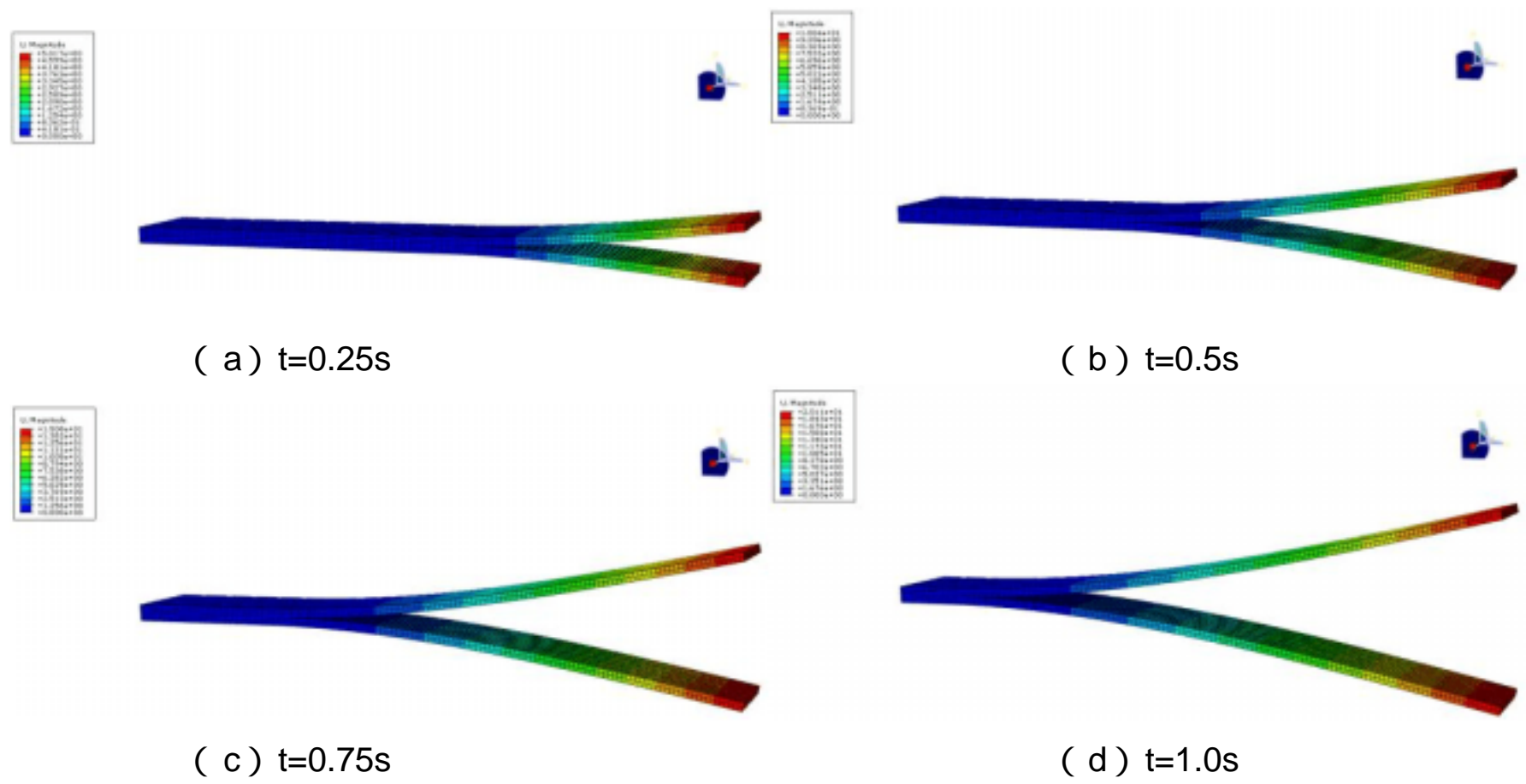


图 12. 变形过程中位移云图