

## 陆新征一曲哲塑性铰模型

清华大学陆新征一曲哲共同开发了一个塑性铰滞回模型如下图 1 所示：

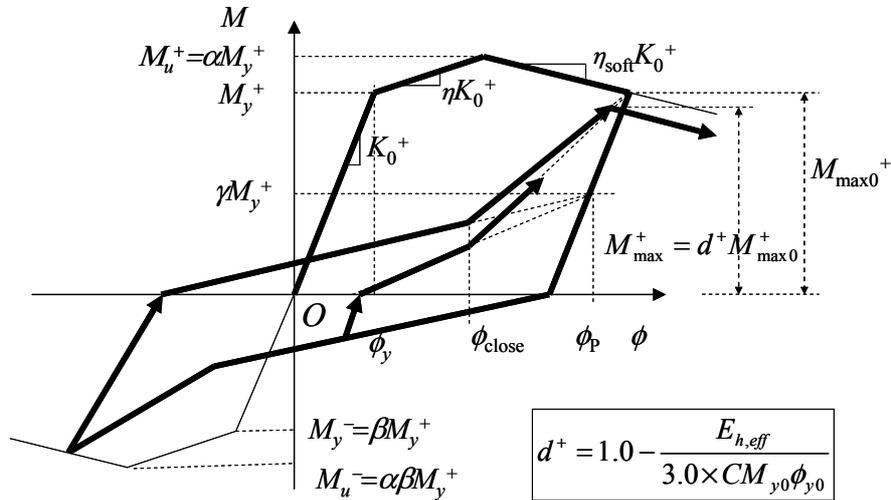


图 1 陆新征一曲哲模型参数含义

该模型的主要特点包括：

- (1) 可以考虑构件的屈服、强化、软化特性。这些特性分别由：初始屈服弯矩  $M_{y0}$ ，极限强度和屈服强度的比值  $\alpha$ ，强化参数  $\eta$  和软化参数  $\eta_{\text{soft}}$  等 4 个参数控制。
- (2) 可以考虑构件的滑移捏拢特性。该特性由滑移捏拢参数  $\gamma$  控制。 $\gamma$  越接近 0，滑移捏拢越严重， $\gamma=1.0$ ，无滑移捏拢现象。
- (3) 可以考虑构件在往复加载下的损伤累计特性。该特性由损伤累计耗能参数  $C$  控制。 $C=\infty$ ，则相当于不考虑累计耗能损伤。
- (4) 可以考虑正向、反向屈服强度不同特性。该特性由结构负向屈服弯矩和正向屈服弯矩之比  $\beta$  确定， $\beta=1.0$  表示正向和负向屈服弯矩相同。

因此，在陆新征一曲哲模型中，一共需要定义 8 个参数

- (1) 初始刚度  $K_0$ ；
- (2) 正向屈服强度  $M_y$ ；
- (3) 强化模量参数  $\eta$ ；
- (4) 损伤累计耗能参数  $C$ ；
- (1) 滑移捏拢参数  $\gamma$ ；
- (2) 软化参数  $\eta_{\text{soft}}$ ；
- (3) 极限强度和屈服强度的比值  $\alpha$ ；
- (4) 负向屈服弯矩和正向屈服弯矩之比  $\beta$ ；

通过调整陆新征一曲哲模型中的系数（强化模量  $\eta$ ，损伤累计耗能参数  $C$ ，滑移捏拢参数  $\gamma$ ，软化参数  $\eta_{\text{soft}}$ ，极限强度参数  $\alpha$ ，正负向强度比参数  $\beta$ ）的取值，就可以模拟多种不同的滞回模型。例如，取损伤累计耗能参数  $C=\infty$ ，则相当于不考虑累计耗能损伤；滑移捏拢参数  $\gamma=1.0$ ，相当于不考虑滑移捏拢效应；取极限强度参数  $\alpha=\infty$ ，则相当于不考虑软化行为。

由陆新征一曲哲模型计算得到的部分典型滞回关系如图 2 所示。

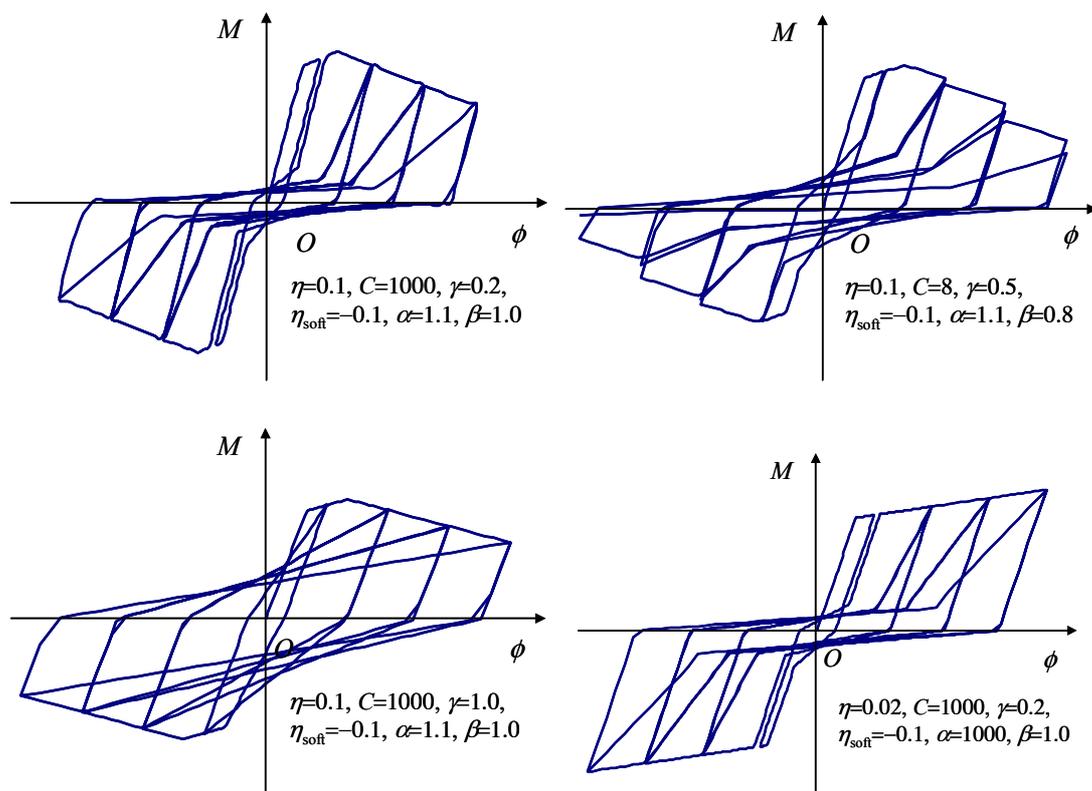


图 2 陆新征一曲哲模型不同参数得到的滞回曲线形状

通过 MSC.MARC 的 UBEAM 程序，可以将陆新征一曲哲模型嵌入到 MSC.MARC 程序中，得到陆新征一曲哲模型塑性铰程序。陆新征一曲哲模型塑性铰程序的主要注意事项：

- (1) 使用 MSC.MARC 98 号梁单元；
- (2) 建立 Matcode.txt 数据文件，输入塑性铰信息。参考 SAP2000 的做法，每个内力份量输入一个行塑性铰，从上到下分别是  $N, V_x, V_y, M_x, M_y, T$ 。如果需要考虑该内力份量的非线性，则需输入所有的 8 个参数（初始刚度  $K_0$ ，屈服强度  $M_y$ ，强化模量  $\eta$  和损伤累计耗能参数  $C$ ，滑移捏拢参数  $\gamma$ ，软化参数  $\eta_{soft}$ ，极限强度参数  $\alpha$ ，正负向强度比参数  $\beta$ ），否则只需输入  $K_0$ ，后面留空，程序自动按弹性处理。

如所附算例中，只需考虑梁局部坐标系  $y$  方向的塑性铰，则对应的 Matcode 输入为：

输入内容	含义
! 截面 01, 梁	第 1 行, 注释
3.00D+09,	第 2 行, $N$
1.00d+15,	第 3 行, $V_x$
1.00d+15,	第 4 行, $V_y$
5.00E+12,	第 5 行, $M_x$
3.49E+13,1.0e8,0.02,1000,0.8, -0.01, 1.05,1.0	第 6 行, $M_y$
3.99E+13	第 7 行, $T$

- (3) 在前处理中，选择 User Defined Var #1~6，分别对应于  $N, V_x, V_y, M_x, M_y, T$  的塑性铰标识。

例如，对所附算例输入以下柱铰和梁铰参数，

梁的塑性铰参数为: 3.49E+13,1.0e8,0.02,1000,0.8, -0.02, 1.05,1.0

柱的塑性铰参数为: 2.33E+13,1.6e8,0.10,100,0.2, -0.05, 1.05,1.0

进行 Kobe 波下的时程分析, 得到柱脚弯矩曲率关系, 梁铰弯矩曲率关系以及结构顶点位移一时程关系如图 3~5 所示, 塑性铰分布如图 6 所示:

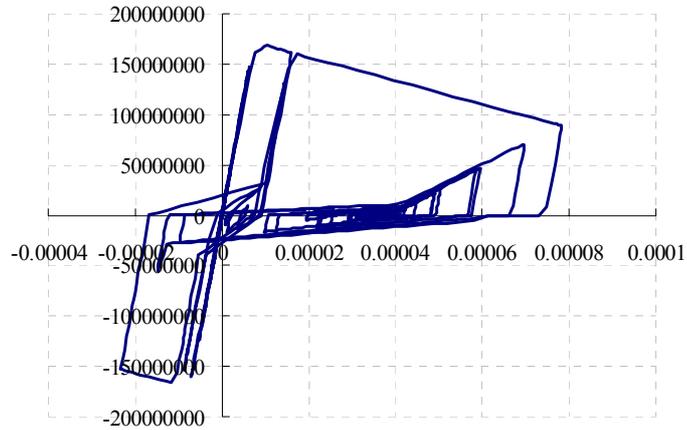


图 3 柱脚弯矩曲率关系

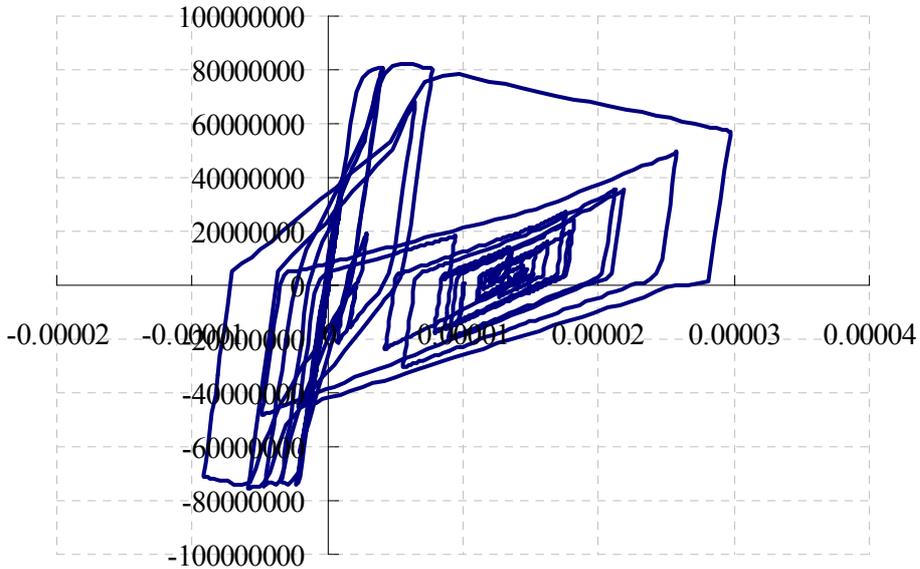


图 4 梁铰弯矩曲率关系

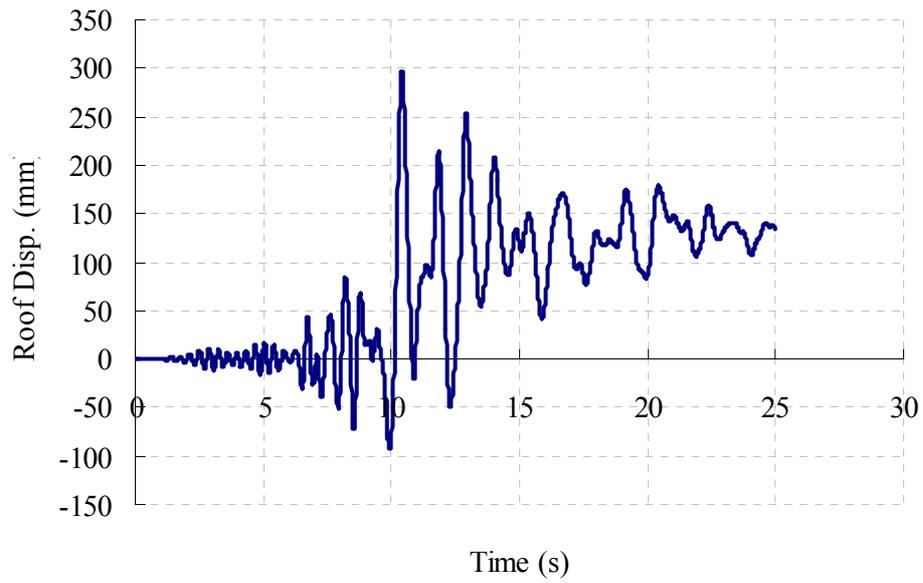


图 5 顶点位移时程关系

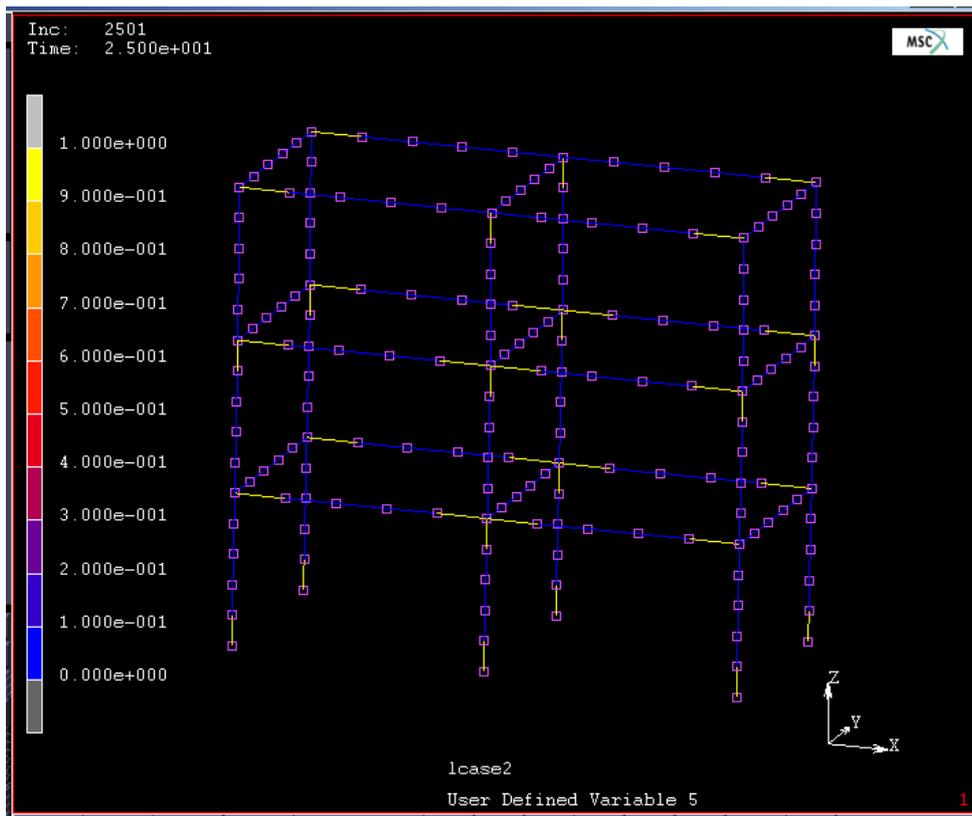


图 6 塑性铰分布

## 附录：框架建模过程

两层混凝土框架，柱子间距为 x 方向 5m，Y 方向 4m，层高 3m。

梁：截面尺寸  $0.2 \times 0.5\text{m}$ ， $M_y = 1.0\text{E}8$ ，其他内力分量保持弹性。

柱：截面尺寸  $0.3 \times 0.4\text{m}$ ， $M_y = 1.6\text{E}8$ ，其他内力分量保持弹性。。

THUFIBER 程序使用时，用户需要输入以下两类信息：

(1)构件的截面几何信息和局部坐标系信息，这部分通过 MSC.MARC 自带的前处理界面实现，其中最重要的信息有三个：截面面积、材料密度和截面 x 轴的方向。程序将根据前两条信息计算得到构件的质量。根据截面 x 轴方向计算其强轴和弱轴行为。

(2)构件截面塑性铰信息，这部分存放在 matcode.txt 文件中。

下面介绍具体建模步骤：

(1)MSC.MARC 程序和多种 CAD 软件有着良好的接口，以广泛使用的 AutoCAD 程序为例，在 AutoCAD 中建立结构的轴线模型如图 7 所示。将模型文件输出为 dxf 格式。

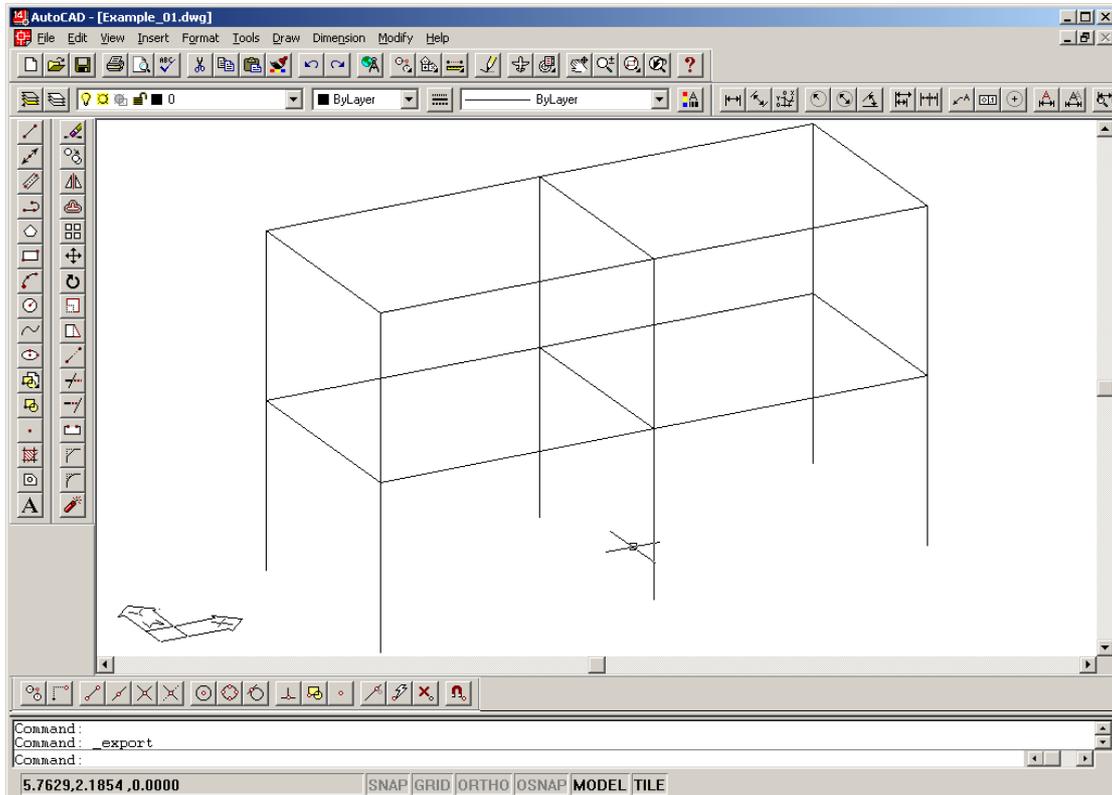


图 7 在 AutoCAD 中建立空间模型

(2)在 MSC.MARC 的前处理程序 MENTAT 中，选择底部的静态菜单 FILE->IMPORT，选择输入 DXF 格式，选择相应文件，读入刚才的 CAD 模型，并用底部静态菜单做适当旋转，结果如图 8 所示。

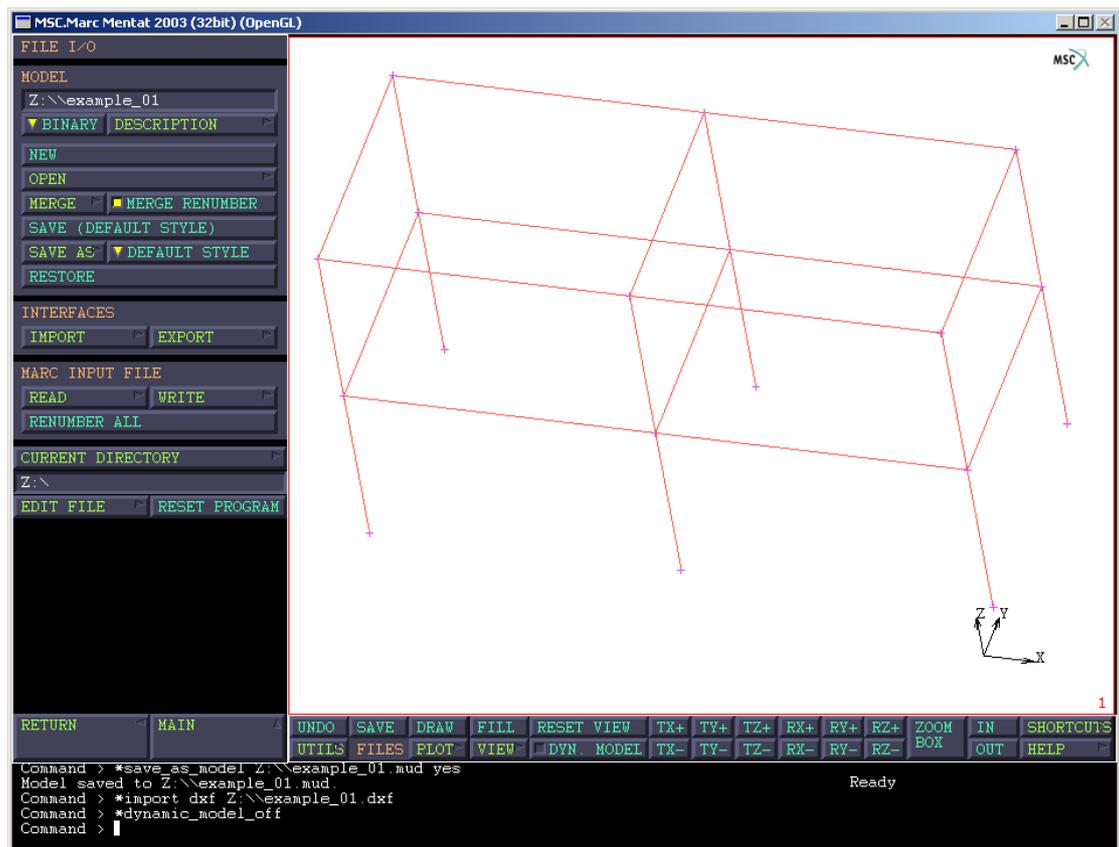


图 8 将 AutoCAD 模型导入 MARC

(3)目前在有限元程序中读入的模型还是几何信息，需要将其转化为有限元信息。进入 MARC 的主菜单 MESH GENERATION，选择 CONVERT，将 DIVISIONS 设置为 5,5，即每个线段划分成 5 个单元。选择 CURVERS TO ELEMENTS，选择 ALL: EXIST，得到单元和节点分布如图 9 所示。

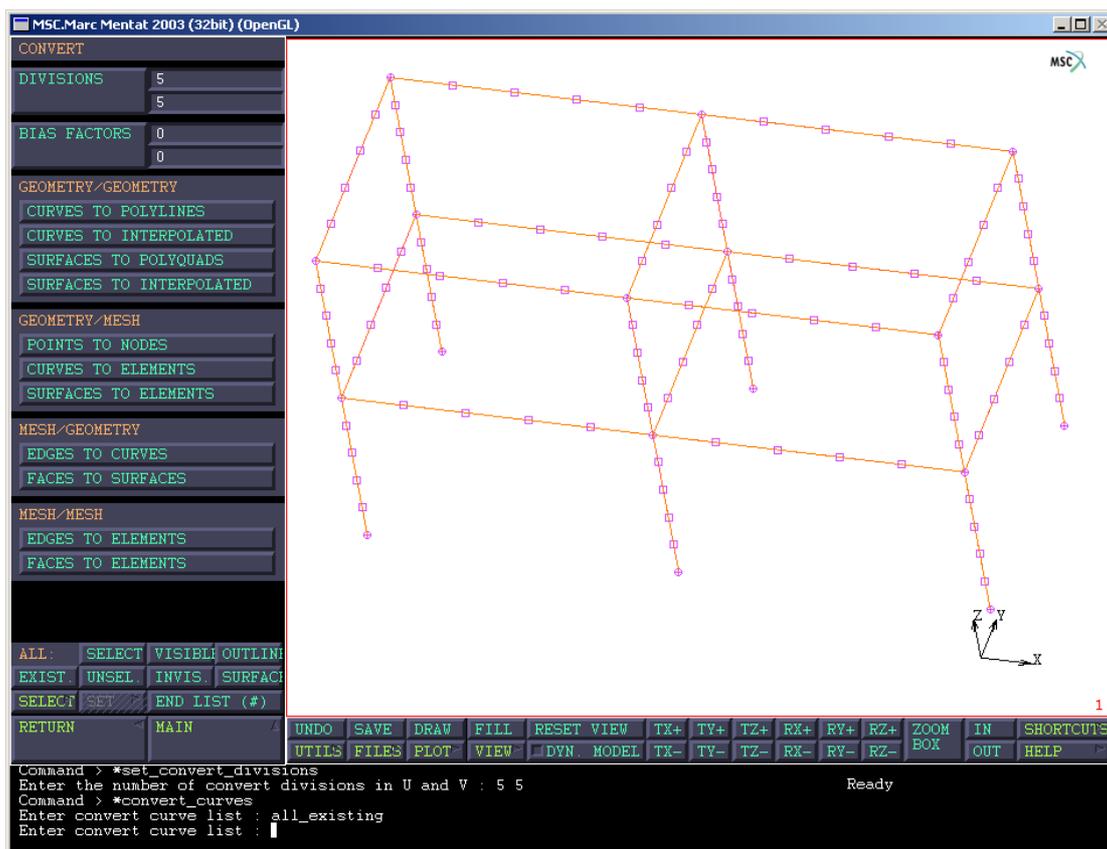


图9 将单元细分

(4) 回到主菜单 MAIN MENU->MESH GENERATION, 选择 SWEEP 按钮, 选择 ALL, 清理不必要的节点和单元信息 (图 10)。

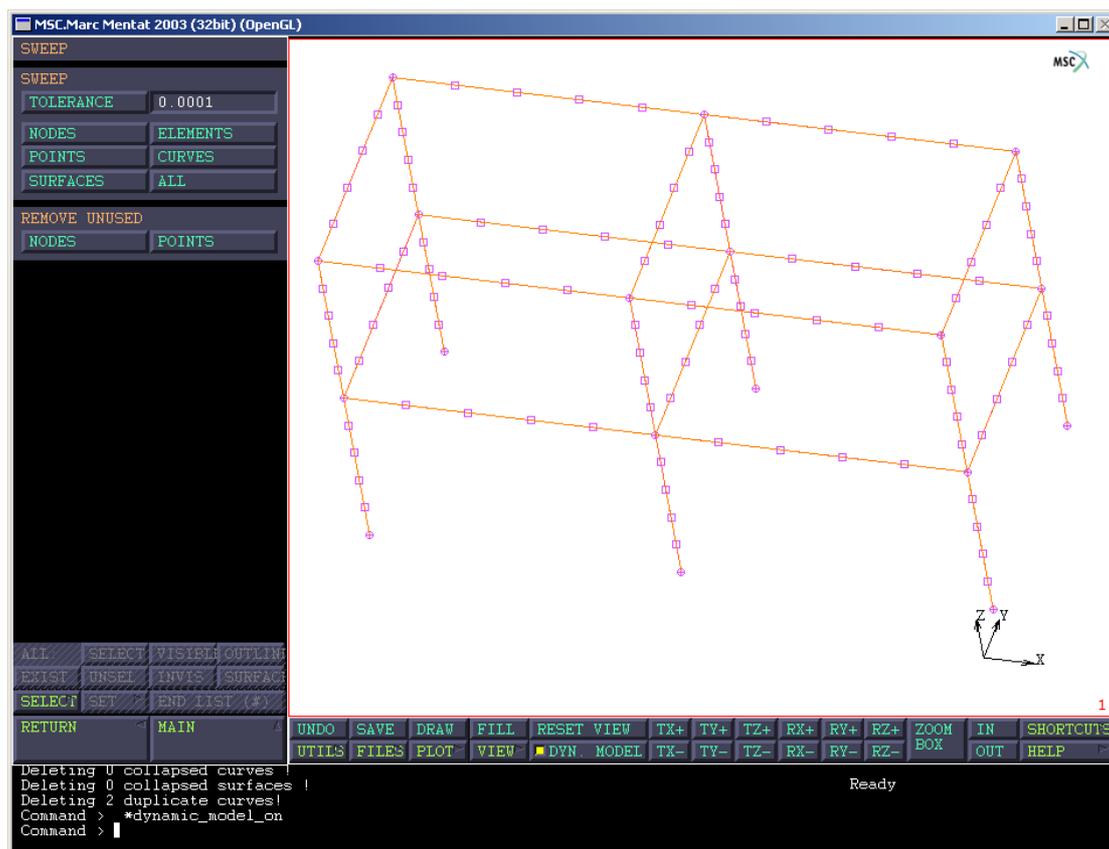


图 10 清理重复元素

(5)下面给模型输入材料信息。第一种材料为梁，需要说明的是，MARC 的材料信息编号对应于截面编号，所以必须严格逐个输入。输入材料名称为 Beam，材料类型为 HYPOELASTIC->USER SUB. UBEAM，即这个材料是用户自定义的。输入材料的密度为 5000，即相当于将部分楼板重量折算到梁上面（图 11）。

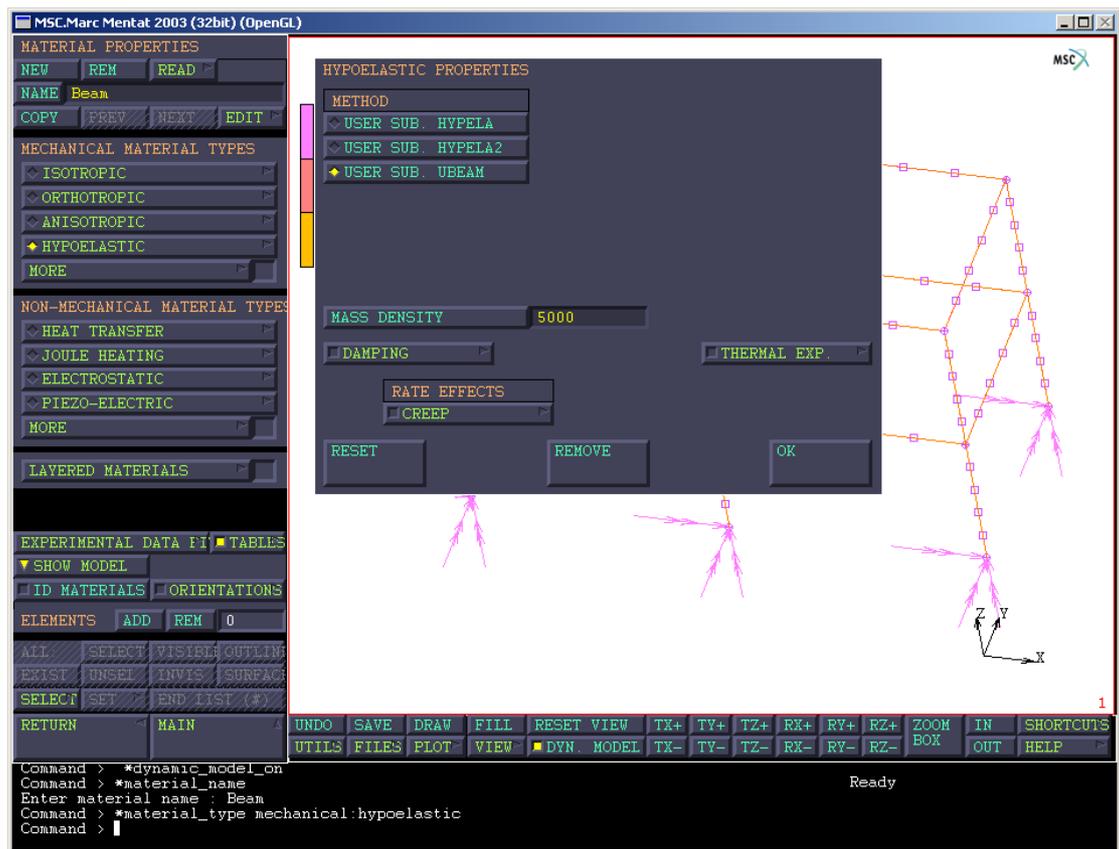


图 11 定义梁材料信息

(6)选择 ELEMENTS->ADD, 选取相应的梁单元, 将材料信息赋予之。

(7)再建立一个材料, 名称为 Column, 类型还是 HYPOELASTIC->USER SUB. UBEAM, 只是密度为 2500。同样再选择 ELEMENTS->ADD, 选取相应的柱子单元, 赋予材料信息。最后得到相应的材料信息如图 12。

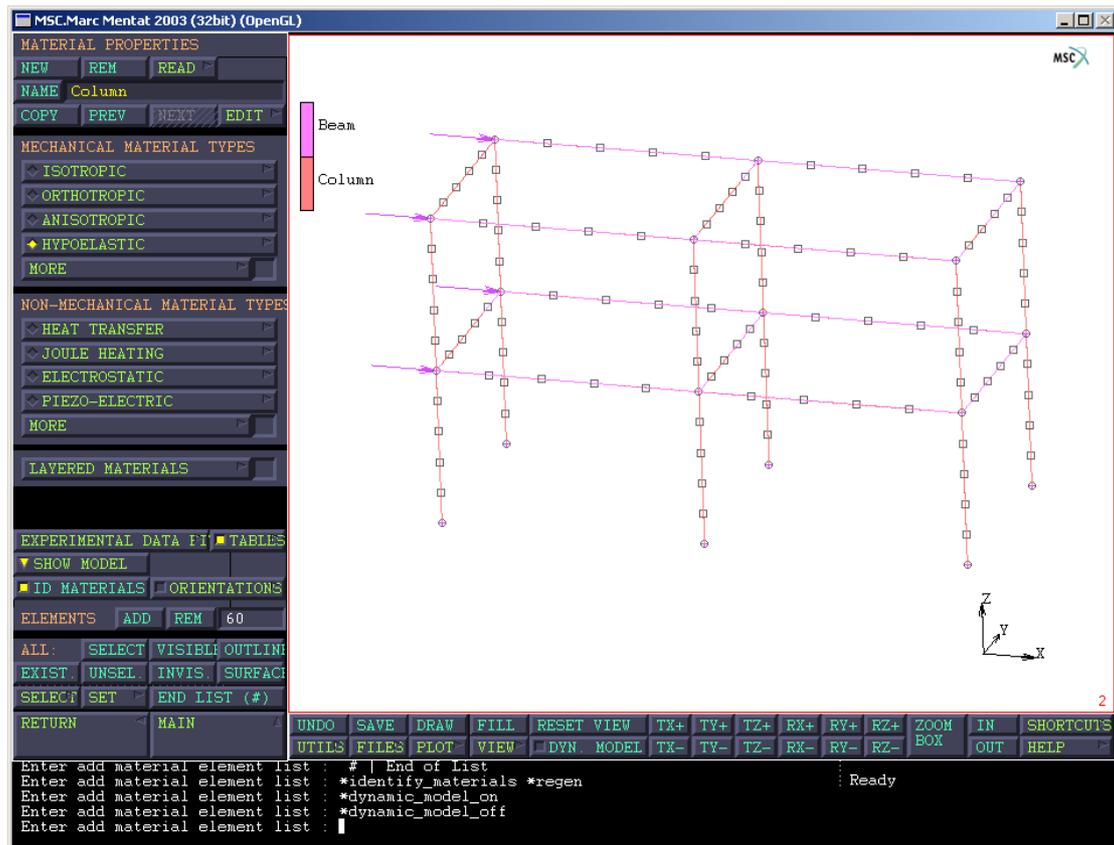


图 12 定义柱子材料信息

(8)下面要赋予几何信息。这部分工作比较复杂，关键牵涉到单元局部坐标系的问题。选择主菜单 MAIN MENU-> GEOMETRIC PROPERTIES，建立新几何信息名称为 Beam，类型为 3-D->ELASTIC BEAM，输入截面的截面积和对应于局部坐标系  $x$  轴，局部坐标系  $y$  轴的转动惯量。并输入局部坐标系  $x$  轴对应整体坐标系的矢量方向。对于本问题而言，取梁单元的局部坐标系  $x$  轴为垂直向上，与整体坐标系的  $z$  轴平行，所以局部坐标系  $x$  轴的矢量方向为(0 0 1) (图 13)。

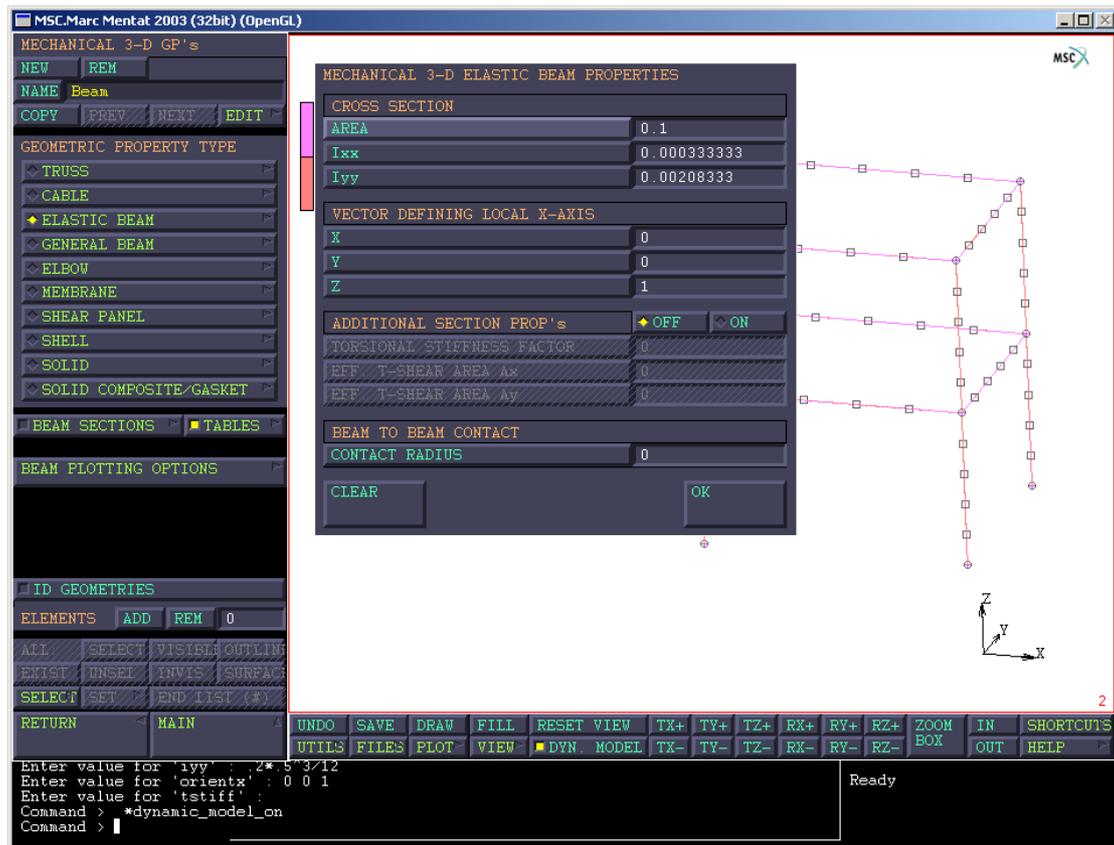


图 13 定义梁截面几何信息

(9)将刚才输入的梁截面信息添加给所有的梁单元，选择 ELEMENTS-> ADD，选取相应单元。

(10)类似的，建立新的几何信息，名称为 Column，类型为 3-D->ELASTIC BEAM，输入截面的几何信息如图 14。这时取柱子的局部坐标系  $x$  轴方向和整体坐标系  $x$  轴方向相同，所以其局部坐标系  $x$  轴的矢量方向为(1 0 0)，选择 ELEMENTS-> ADD，将几何信息添加给相应的单元。

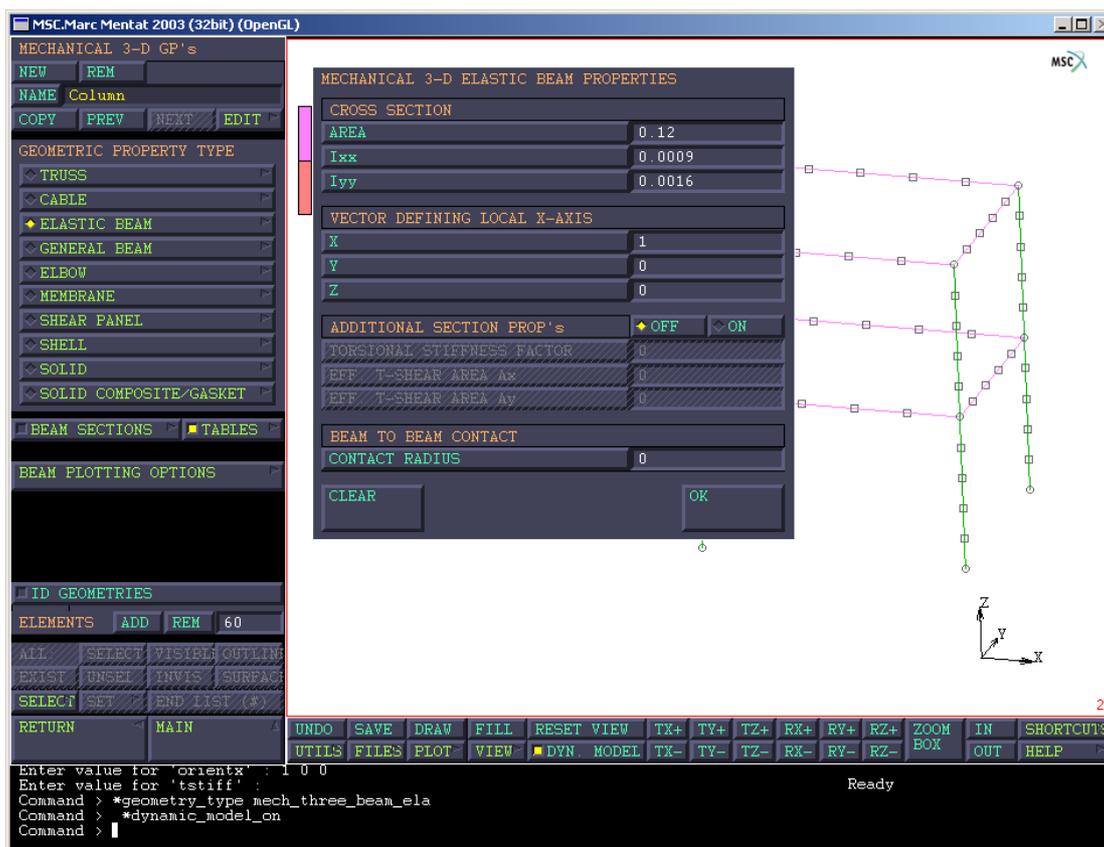


图 14 定义柱子截面几何信息

(11) 其他包括输入荷载，定义工况等，与一般 MSC.MARC 相同。

(12) 最后编写 matcode.txt 文件，输入相应的截面塑性铰信息

Matcode.txt 文件内容

内容	说明
2	第 1 行，定义一共有几个截面，这个模型里面一共有 2 个截面：1：梁。2：柱子
! 截面 01，梁 3.00D+09, 1.00d+15, 1.00d+15, 5.00E+12, 3.49E+13,1.0e8,0.02,1000,0.8, -0.01, 1.05,1.0 3.99E+13	逐个输入截面信息，第 1 行，注释 第 2 行， $N$ 第 3 行， $V_x$ 第 4 行， $V_y$ 第 5 行， $M_x$ 第 6 行， $M_y$ 第 7 行， $T$
! 截面 02，柱 3.60E+09, 1.00d+15, 1.00d+15, 1.35E+13, 2.33E+13,1.6e8,0.10,50,0.2, -0.05, 1.05,1.0 3.58E+13	逐个输入截面信息，第 1 行，注释 第 2 行， $N$ 第 3 行， $V_x$ 第 4 行， $V_y$ 第 5 行， $M_x$ 第 6 行， $M_y$ 第 7 行， $T$

主要参考文献和程序:

- [1] THUFIBER <http://www.luxinzheng.net/research/THUFIBER.html>
- [2] IDARC <http://civil.eng.buffalo.edu/idarc2d50/>
- [3] DRAIN-2D <http://nisee.berkeley.edu/elibrary/getpkg?id=DRAIN2DX>
- [4] Ibarra LF, Krawinkler H. (2006). Global Collapse of Frame Structures under Seismic Excitations, PEER Report 2006/06, Page 29-42.