第十四章 有限元方法在起重机结构分析中的应用

第一节 有限元方法简介

第二节 有限元分析程序ANSYS简介

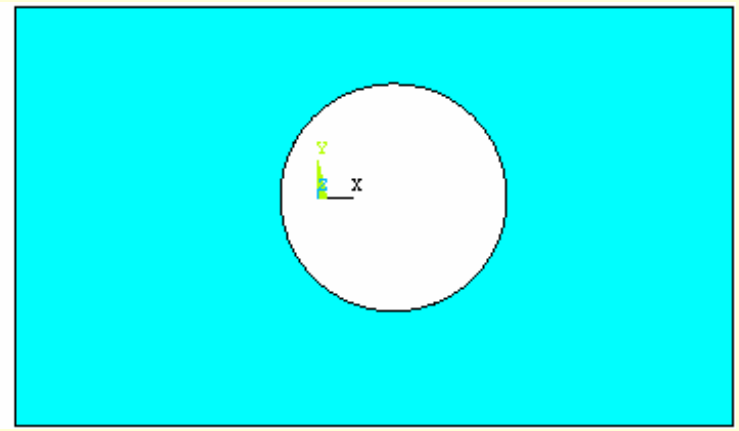
第三节 有限元分析实例——

龙门起重机金属结构有限元分析

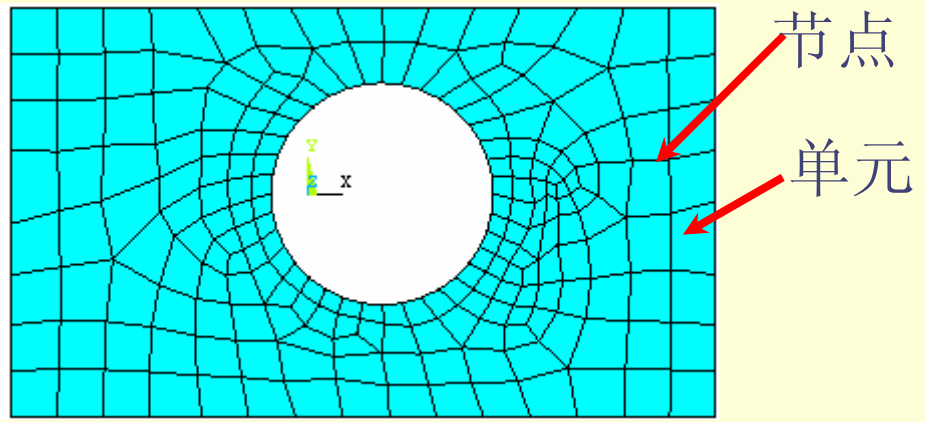
第一节 有限元方法简介

1. 有限元法的概念

有限元法（FEM，Finite Element Method)就是把物理结构分割成有限个区域,这些区域称为单元。每个单元中有有限个节点,单元间通过节点相连。对每一个单元建立作用力方程，组集成整个结构的系统方程,求解该系统方程，得到结构的近似解。



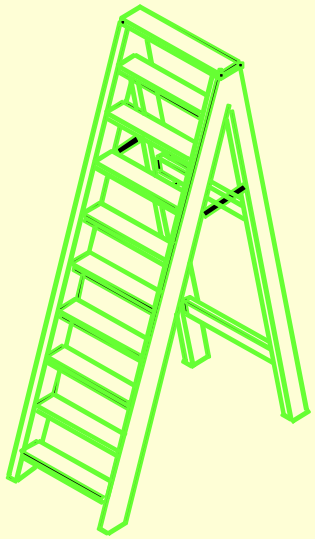
真实结构



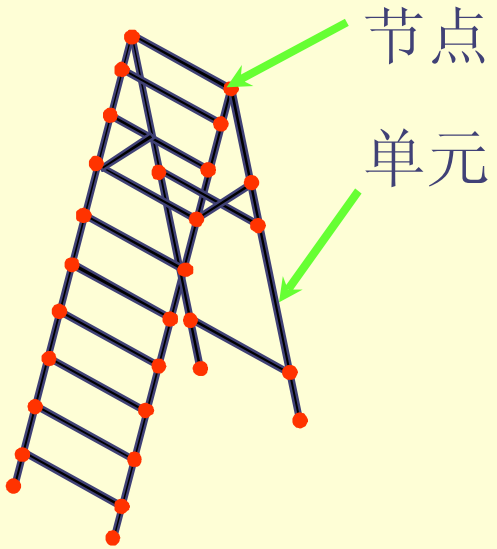
有限元模型

有限元方法用来解决实际工程需要解决而理论分析又无法解决的复杂问题。

有限元模型由一些简单形状的单元组成，单元之间通过节点连接，并通过结点传递内力.

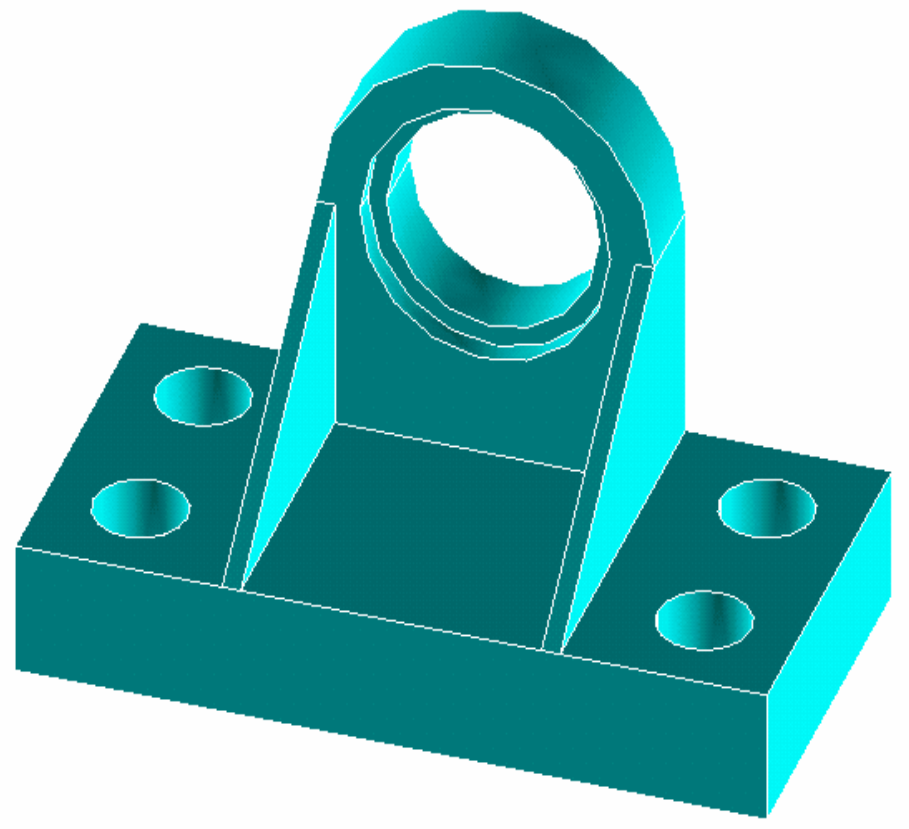


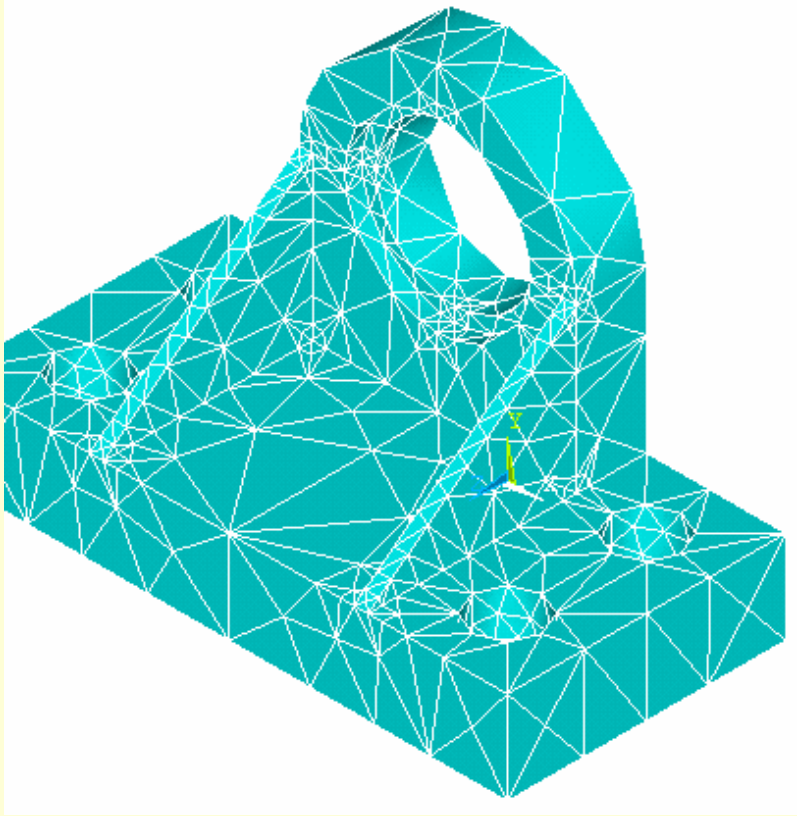
真实结构



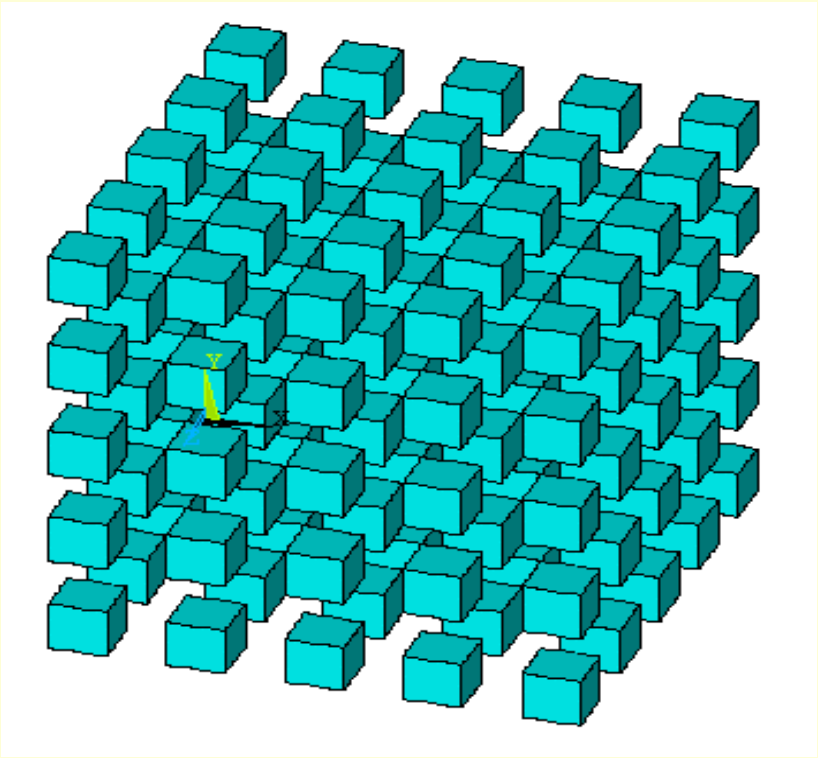
有限元模型

有限元方法涉及力学原理、数学方法和计算机程序设计等几方面。

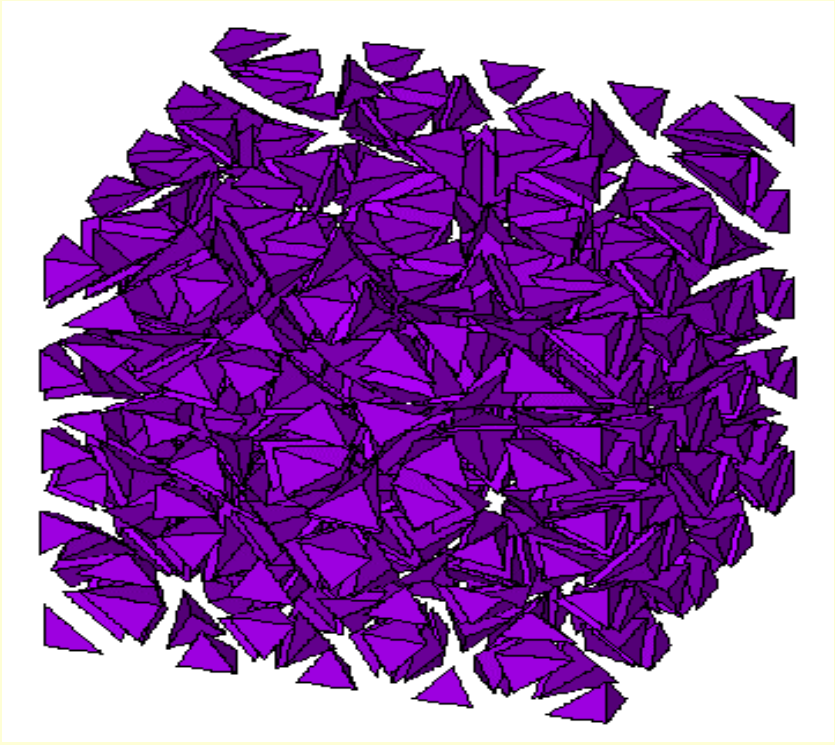




轴承座实际结构与有限元模型



块单元网格



四面体单元网格

2．有限元法的发展概况

- 有限元法的思想最早出现于20世纪40年代。
- 1960年，Clough教授在论文中首次使用“有限元法”一词。
- 20世纪70年代以后，随着计算机和软件技术的发展，有限元法也随之迅速地发展。
- 目前，有限元法已广泛应用于固体力学、流体力学、热传导、电磁学、声学、生物力学等各个领域。

常用有限元分析软件：

- 德国：ASKA
- 英国：PAFEC
- 法国：SYSTUS
- 美国：NASTRAN 、ADINA、ANSYS、SAP、ABQUS、 BERSAFE、BOSOR、COSMOS、ELAS、MARC和STARDYNE等。

有限元方法及软件发展趋势：

- 从单纯的结构力学计算发展到求解多物理场问题
- 由求解线性工程问题进展到分析非线性问题
- 增强可视化的前置建模和后置数据处理功能
- 与CAD软件的无缝集成
- 在Wintel平台上的发展

3．有限元法的计算步骤

⑴连续体离散化

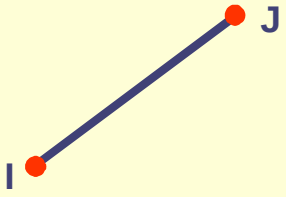
- 选择合适的单元。

常用单元：杆单元，梁单元，三角形单元，矩形单元，四边形单元，曲边四边形单元，四面体单元，六面体单元以及曲面六面体单元等。

- 进行单元划分（即有限元网络划分）
- 施加载荷及约束

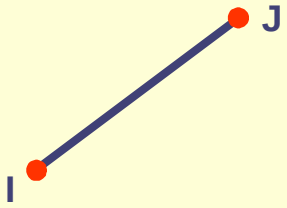
常用单元

节点自由度随连接该节点的 单元类型 变化。



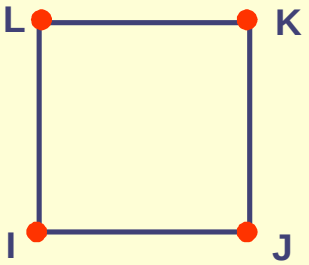
三维杆单元 (铰接)

UX, UY, UZ



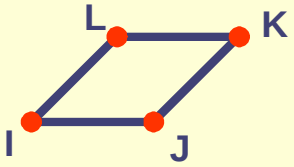
三维梁单元

UX, UY, UZ,
ROTX, ROTY, ROTZ



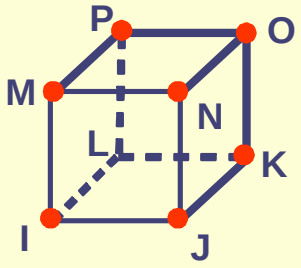
二维或轴对称实体单元

UX, UY



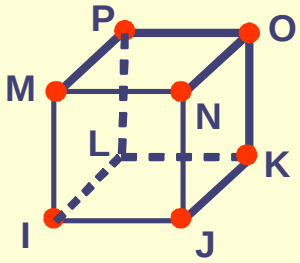
三维四边形壳单元

UX, UY, UZ,
ROTX, ROTY, ROTZ



三维实体结构单元

UX, UY, UZ



三维实体热单元

TEMP

(2)单元分析

建立各单元节点位移和节点力之间的关系式。

- 位移分量列阵

$$\{\delta\}^e=[u_i \ v_i \ u_j \ v_j \ u_m \ v_m]^T$$

- 节点力分量列阵

$$\{F\}^e=[F_{ix} \ F_{iy} \ F_{jx} \ F_{jy} \ F_{mx} \ F_{my}]^T$$

- 节点位移与节点力之间的关系

$$\{F\}^e=[k]^e\{\delta\}^e$$

式中：$[k]^e$——单元刚度矩阵。

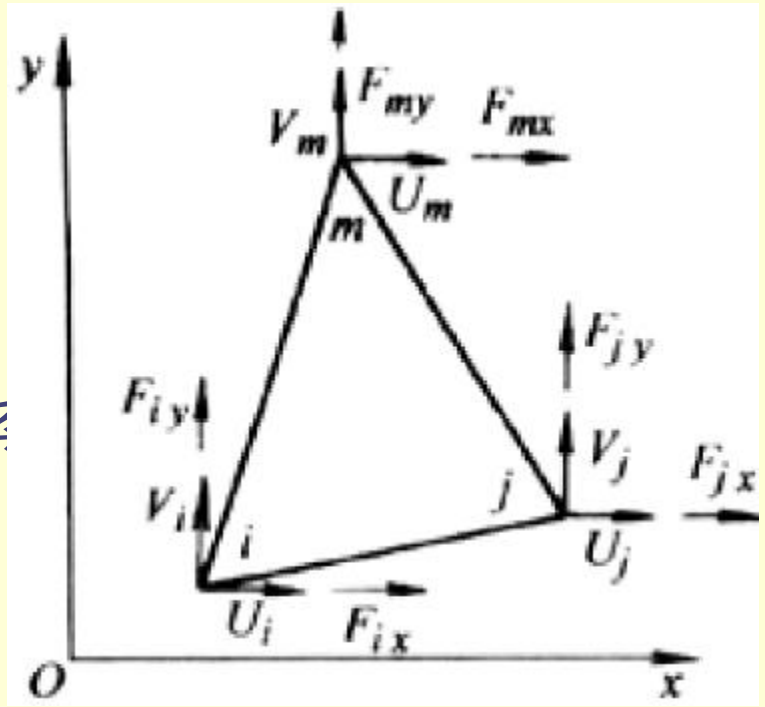


图　三角形平面单元

(3)整体分析

利用节点的力平衡和节点变形协调条件来建立整个连续体的节点力和节点位移的关系式。

$$[K]\{\delta\}=\{R\}$$

式中：[K]——整体刚度矩阵；

$\{\delta\}$——全部结点位移组成的列阵；

{R}——全部结点荷载组成的列阵。

第二节 有限元分析程序ANSYS简介

- ANSYS软件是美国ANSYS公司研制的大型通用有限元分析软件。
- 能够进行包括结构、热、声、流体、电磁场等学科的研究。
- 在核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、
  土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等领域有着广泛的应用。

1.ANSYS的功能

- 创建有限元模型（前处理）
- 施加载荷进行求解（有限元分析）
- 查看分析结果（后处理）
- 进行优化设计
- 做数值模拟实验

2.ANSYS的分析类型

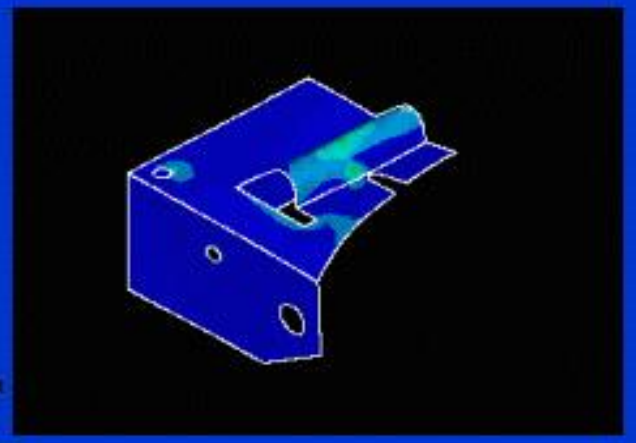
- 结构分析
- 热分析
- 电磁场分析
- 声学分析
- 压电分析
- 流体动力分析
- 多场耦合分析
- 设计灵敏度及优化分析

ANSYS 结构分析 概览

结构分析用于确定结构的变形、应变、应力及反作用力等.

结构分析的类型:

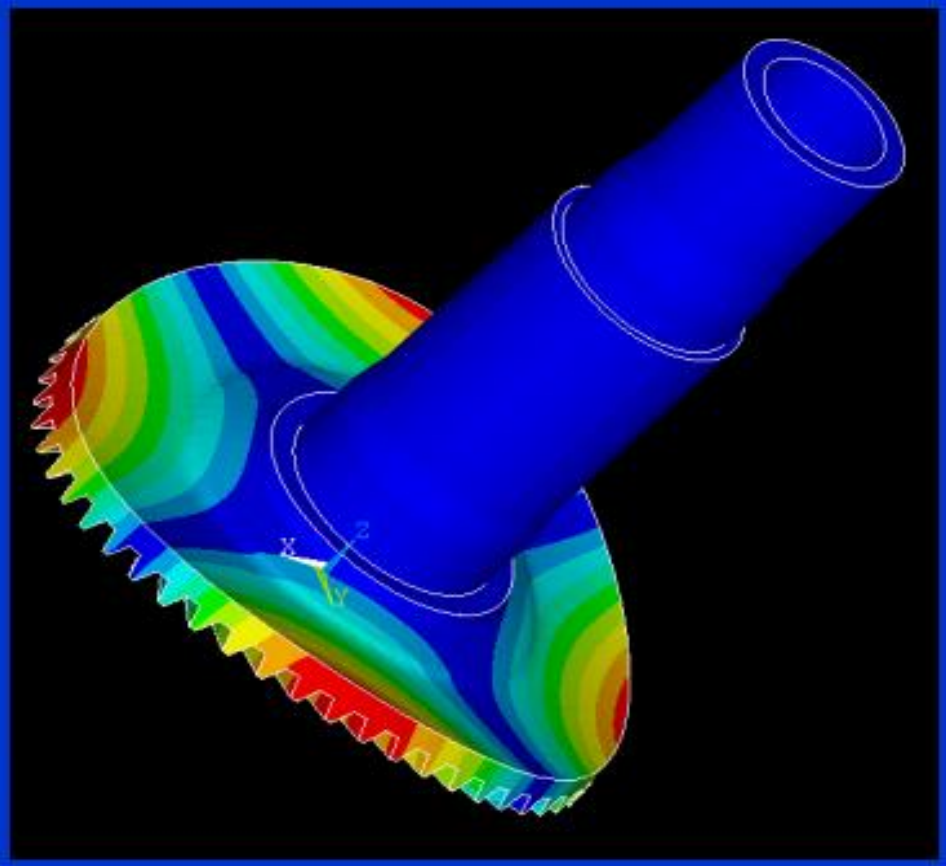
- 静力分析 - 用于静态载荷. 可以考虑结构的线性及非线性行为，例如：大变形、大应变、应力刚化、接触、塑性、超弹及蠕变等.



- 模态分析 - 计算线性结构的自振频率及振形. 谱分析 是模态分析的扩展，用于计算由于随机振动引起的结构应力和应变 (也叫作 响应谱或 PSD).

ANSYS 结构分析 概览(续)

- 谐响应分析 - 确定线性结构对随时间按正弦曲线变化的载荷的响应.
- 瞬态动力学分析 - 确定结构对随时间任意变化的载荷的响应. 可以考虑与静力分析相同的结构非线性行为.
- 特征屈曲分析 - 用于计算线性屈曲载荷并确定屈曲模态形状. (结合瞬态动力学分析可以实现非线性屈曲分析.)
- 专项分析: 断裂分析, 复合材料分析, 疲劳分析

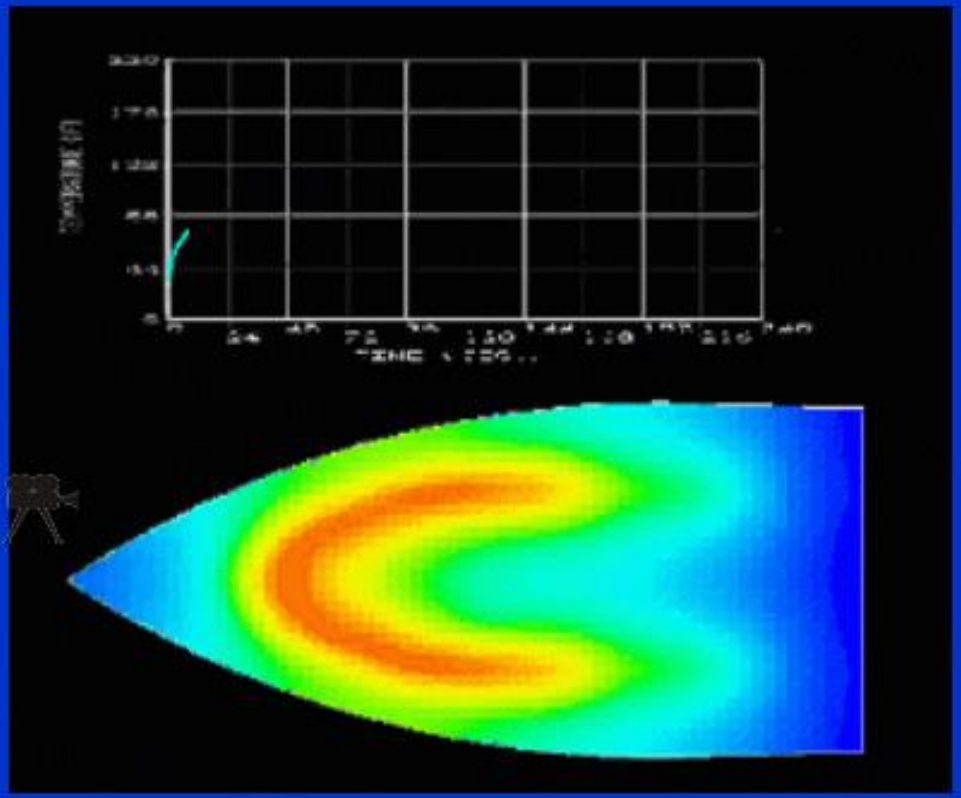


Courtesy: Sikorsky Aircraft

ANSYS热分析概览

ANSYS 热分析计算物体的稳态或瞬态温度分布，以及热量的获取或损失、热梯度、热通量等.

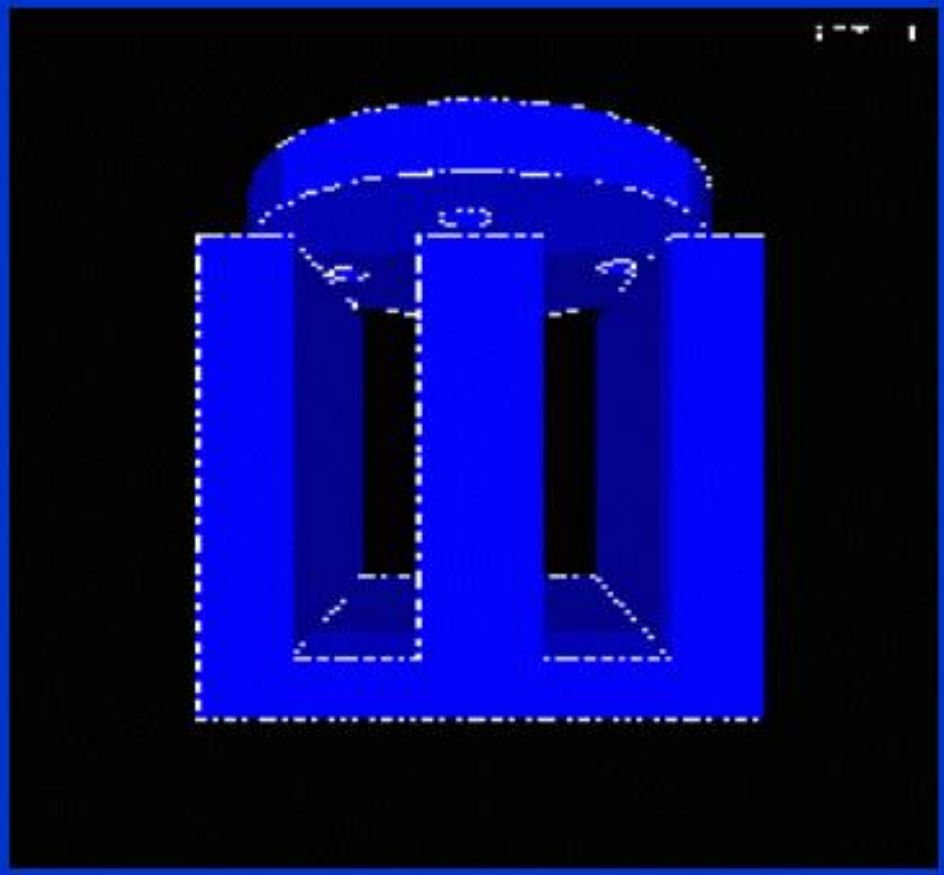
- 热分析之后往往进行结构分析,计算由于热膨胀或收缩不均匀引起的应力.
- ANSYS功能:
  - ---相变 (熔化及凝固), 内热源 (例如电阻发热等)
  - ---三种热传递方式 (热传导、热对流、热辐射)



ANSYS电磁分析概览

磁场分析 用于计算磁场.

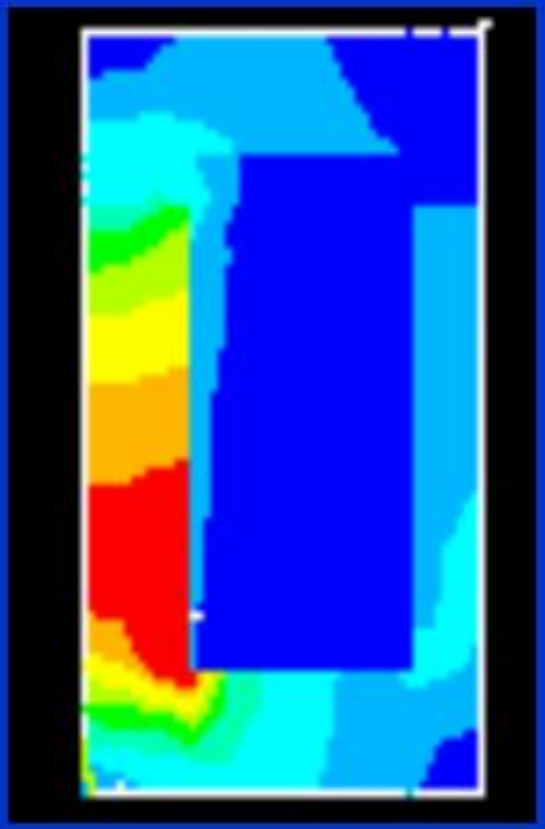
- 磁场分析中考虑的物理量是磁通量密度、磁场密度、磁力、磁力矩、阻抗、电感、涡流、能耗及磁通量泄漏等.
- 磁场可由电流、永磁体、外加磁场等产生.



ANSYS电磁分析概览(续)

磁场分析的类型:

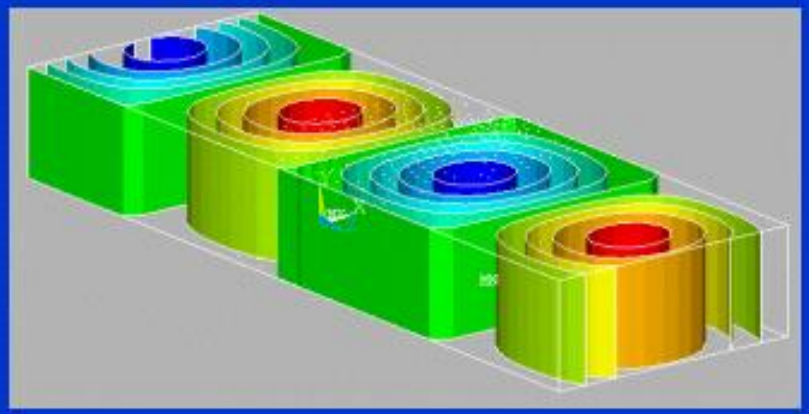
- 静磁场分析 - 计算直流电（DC)或永磁体产生的磁场.
- 交变磁场分析 - 计算由于交流电(AC)产生的磁场.
- 瞬态磁场分析- 计算随时间随机变化的电流或外界引起的磁场.



ANSYS电磁分析概览(续)

电场分析 用于计算电阻或电容系统的电场. 典型的物理量有电流密度、电荷密度、电场及电阻热等.

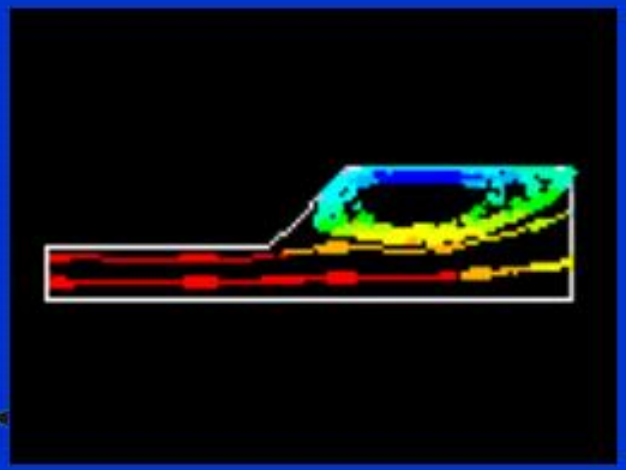
高频电磁场分析 用于微波及RF无源组件，波导、雷达系统、同轴连接器等分析.

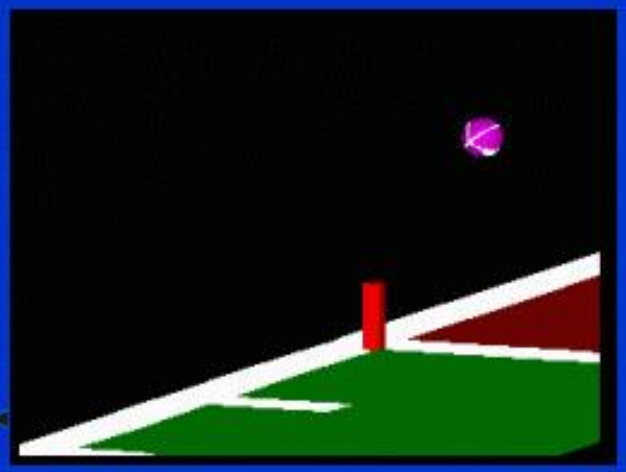


ANSYS 流体分析 概览

流体分析 用于确定流体的流动及热行为. 流体分析分以下几类:

- **CFD** - **ANSYS/FLOTRAN** 提供强大的计算流体动力学分析功能，包括不可压缩或可压缩流体、层流及湍流，以及多组份流等.
- 声学分析 - 考虑流体介质与周围固体的相互作用,进行声波传递或水下结构的动力学分析等.
- 容器内流体 分析 - 考虑容器内的非流动流体的影响. 可以确定由于晃动引起的静水压力.
- 流体动力学耦合分析 - 在考虑流体约束质量的动力响应基础上，在结构动力学分析中使用流体耦合单元.





ANSYS 耦合场分析概览

耦合场分析 考虑两个或多个物理场之间的相互作用。如果两个物理场之间相互影响，单独求解一个物理场是不可能得到正确结果的，因此你需要一个能够将两个物理场组合到一起求解的分析软件。

例如： 在压电力分析中，需要同时求解电压分布（电场分析）和应变（结构分析）.

其他需要耦合场分析的典型情况有：

- 热—应力分析
- 流体—结构相互作用
- 感应加热（电磁—热），感应振荡

两根热膨胀系数不同的棒焊接在一起，图示为加热后的变形.

第三节 有限元分析实例

——龙门起重机金属结构有限元分析

计算模型分析

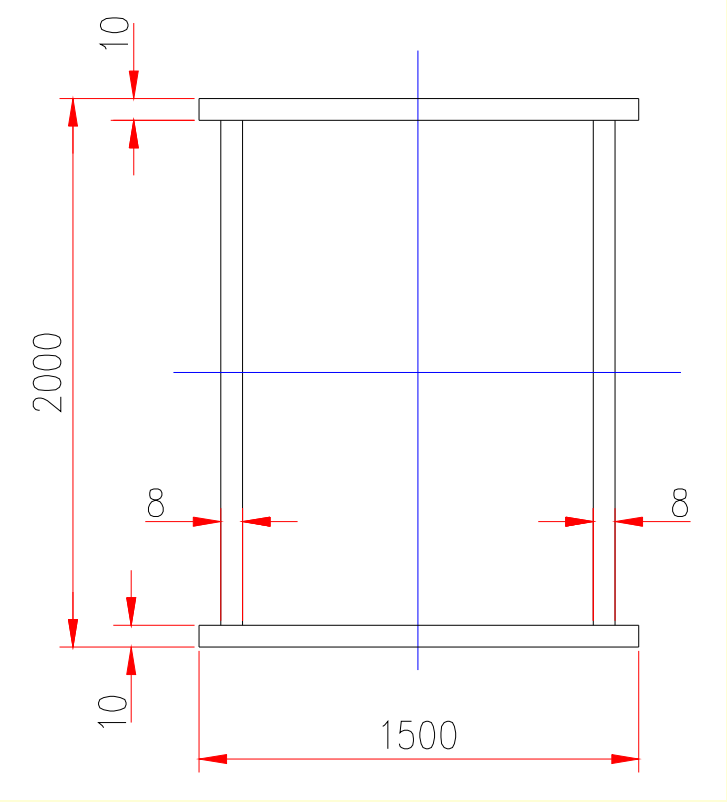
- **结构**：按实际结构建模,但对受力不大的次要部分可以进行简化 。
- **载荷**：根据《起重机设计规范》GB3811-83中有关规定，确定如下计算工况。

分析类型		计算载荷
强度	小车在跨中	$\varphi_4 P_G$、$\varphi_4 G_{xc}$、 $\varphi_2 P_Q$、P_H、$P_{W,i}$、P_S
	小车在悬臂端	
刚度	小车在跨中	P_Q、 G_{xc}
	小车在悬臂端	

- **约束**：将支座视为铰支座。

轨道式集装箱龙门起重机主要参数

起重量：50t
跨度：30m
有效悬臂长：7.5m
起升高度：12m



主梁截面尺寸

单元类型选择

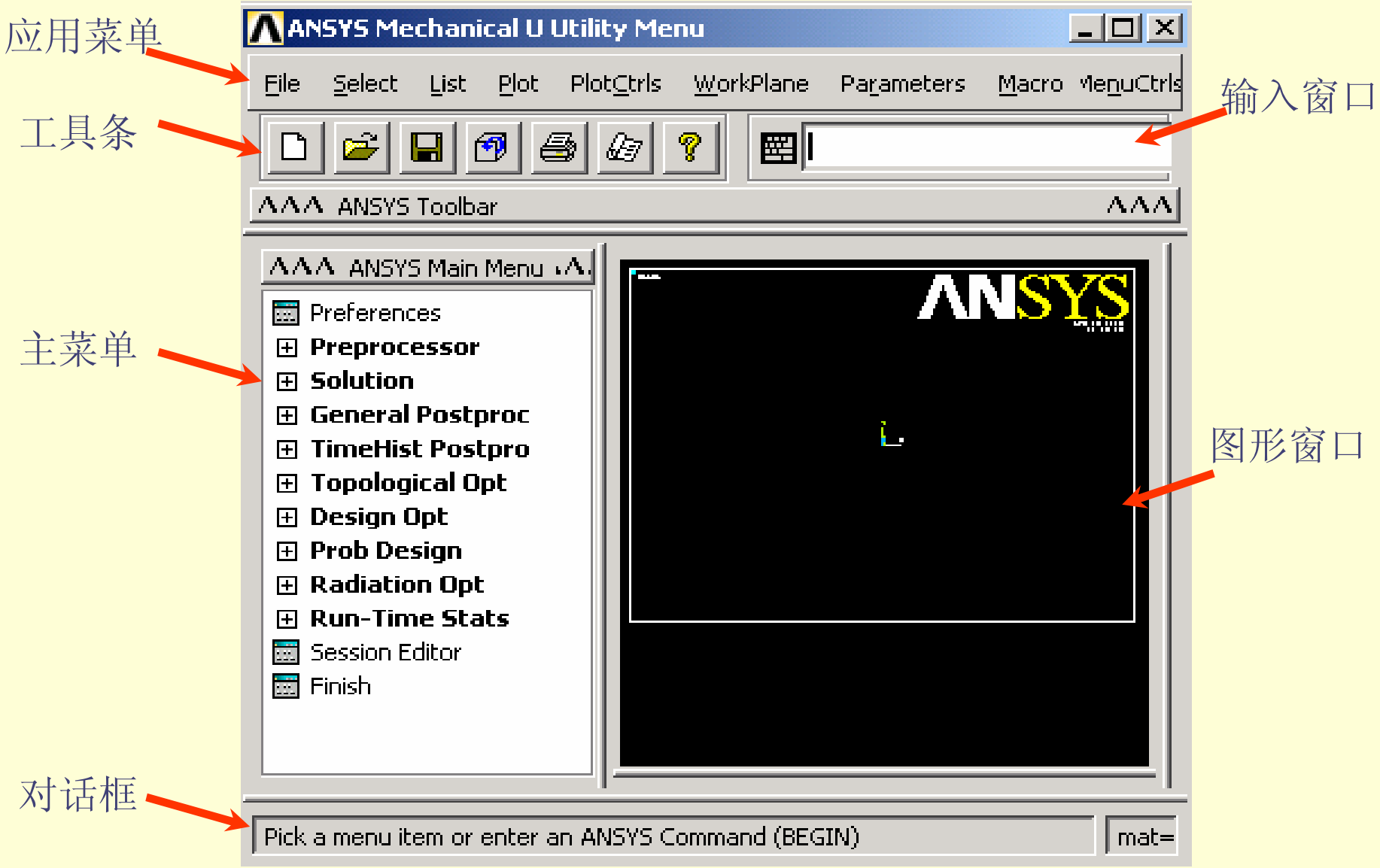
ANSYS中有100多种单元。当板的长度与厚度之比大于20时应选用ANSYS中的壳单元（Shell）。

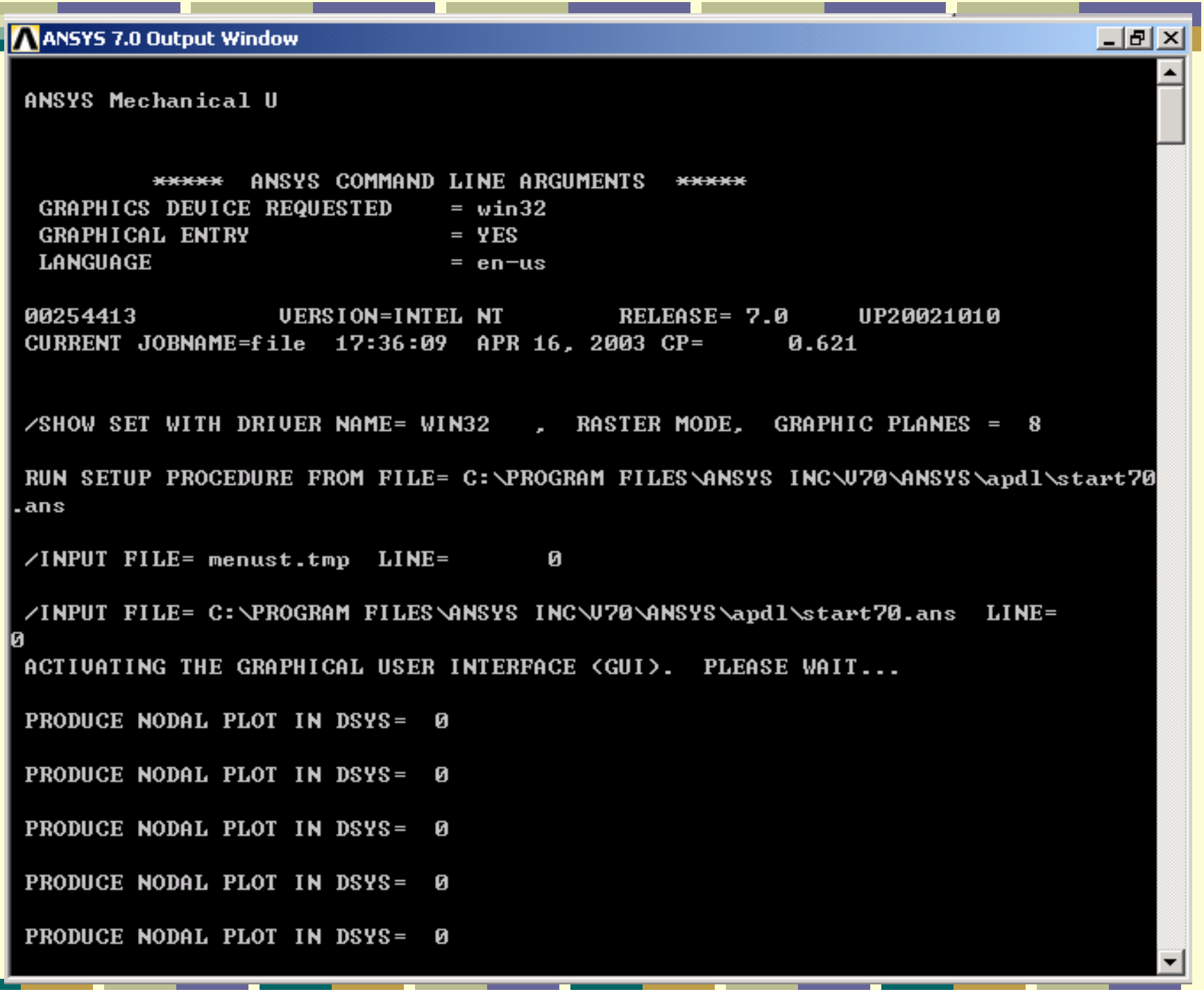
ANSYS中Shell单元的类型：

- Shell41：采用薄膜理论。忽略弯曲和横向剪切，只包含薄膜效应。
- Shell63：是“ 薄”壳单元。包含弯曲和薄膜效应但忽略横向剪切变形。
- Shell43,143,181,91,93,99：是“ 厚”壳单元。包含弯曲、薄膜和横向剪切效应。

对所分析结构，应选用Shell63。

ANSYS的用户界面

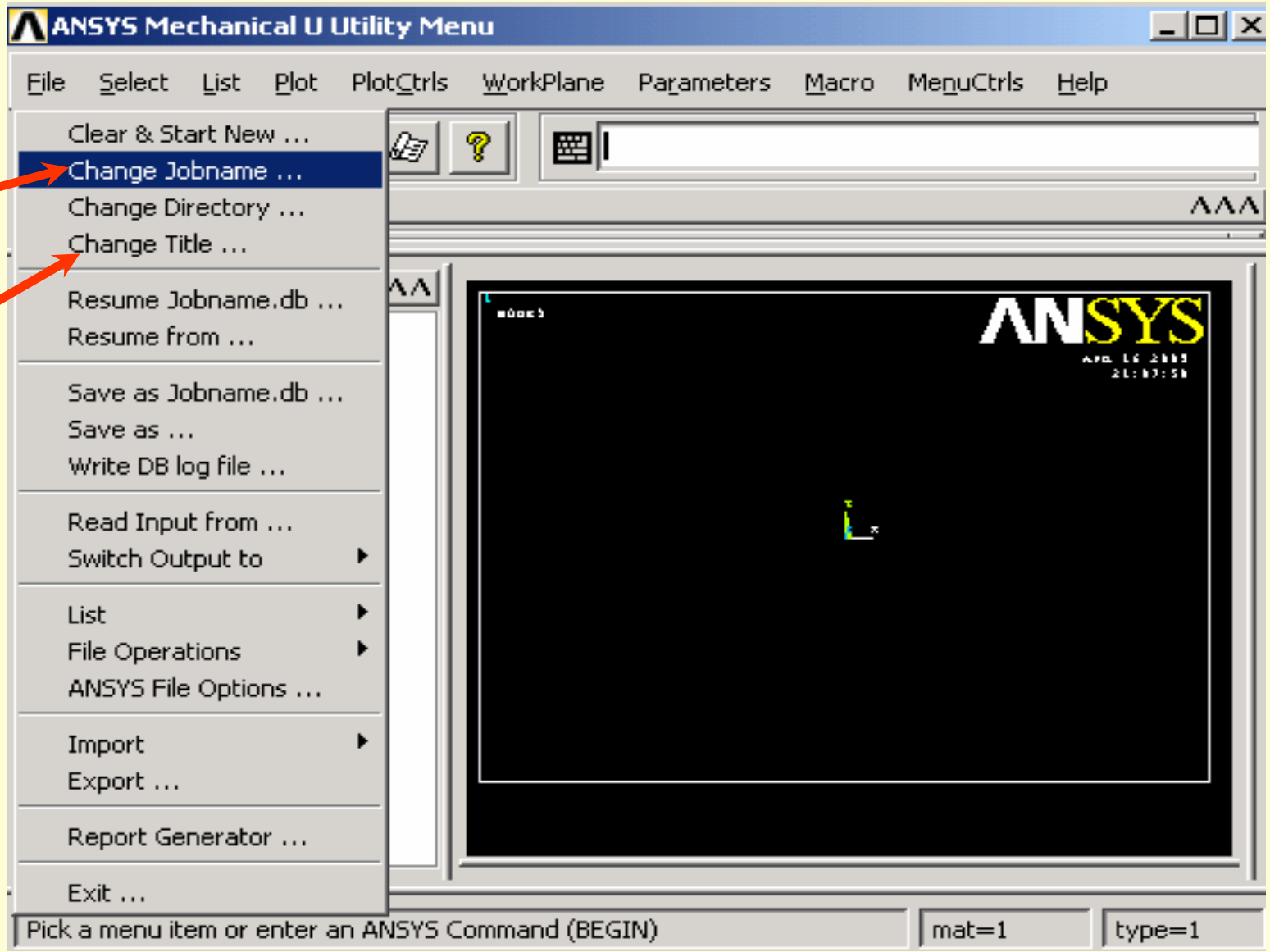




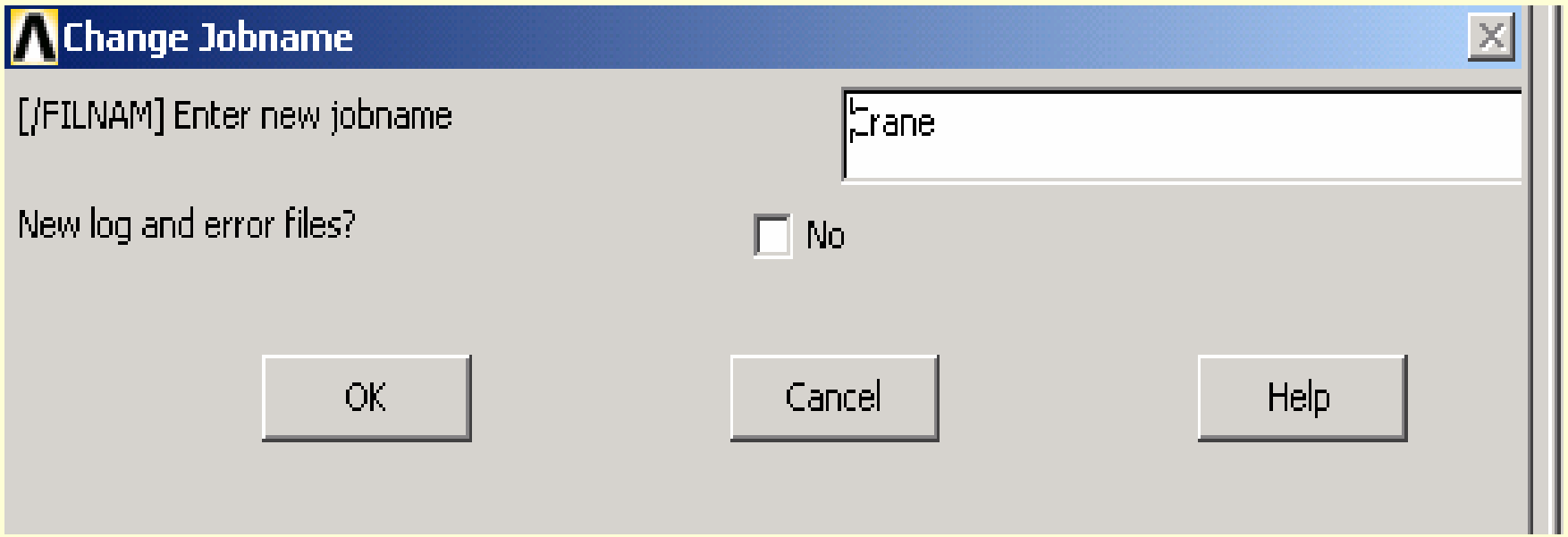
1. 定义文件名、设置分析标题

定义文件名

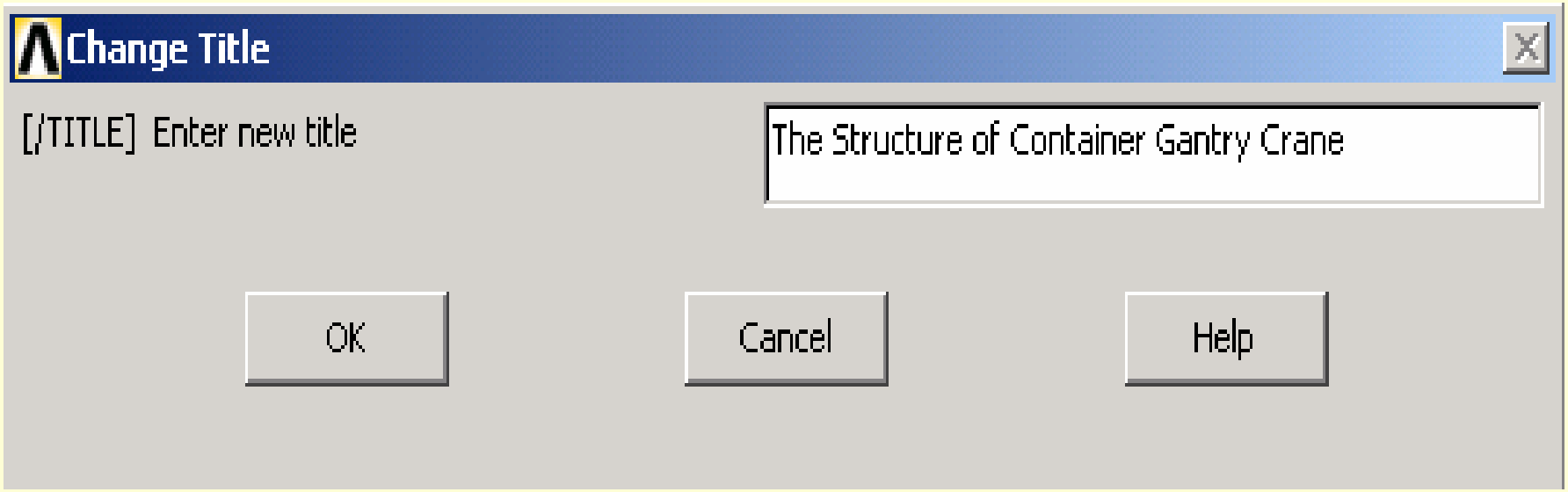
设置分析标题

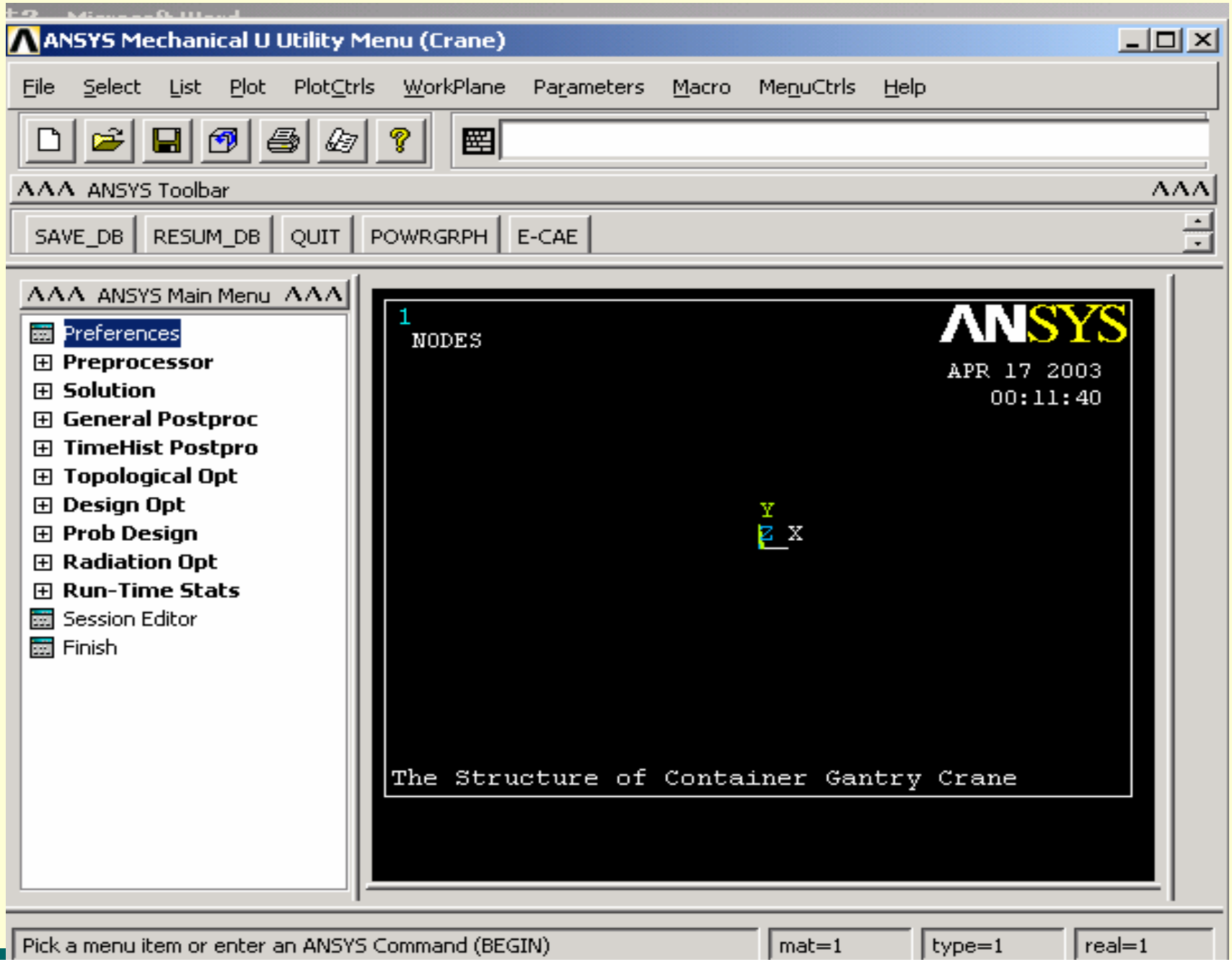


定义文件名



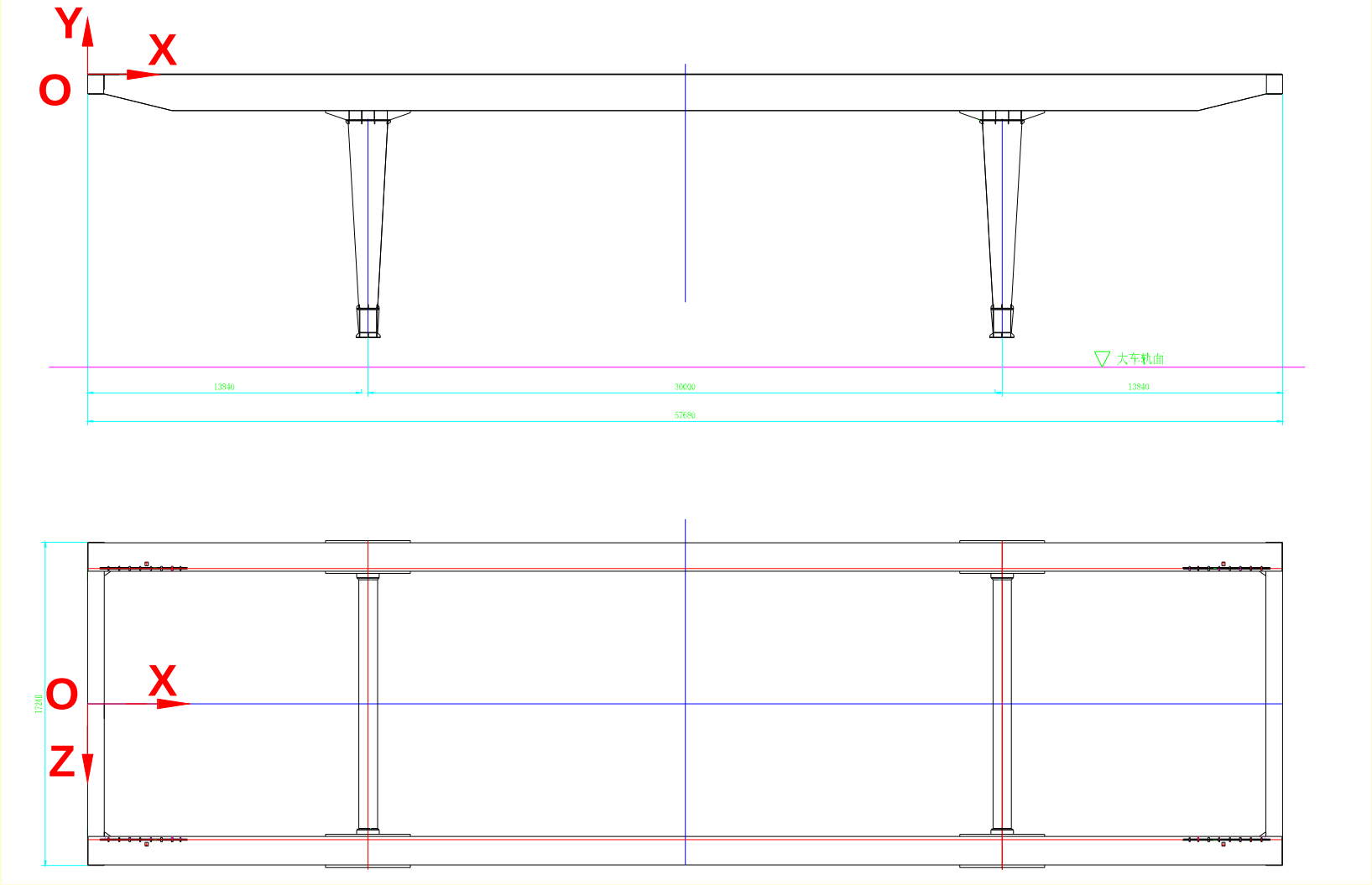
设置分析标题



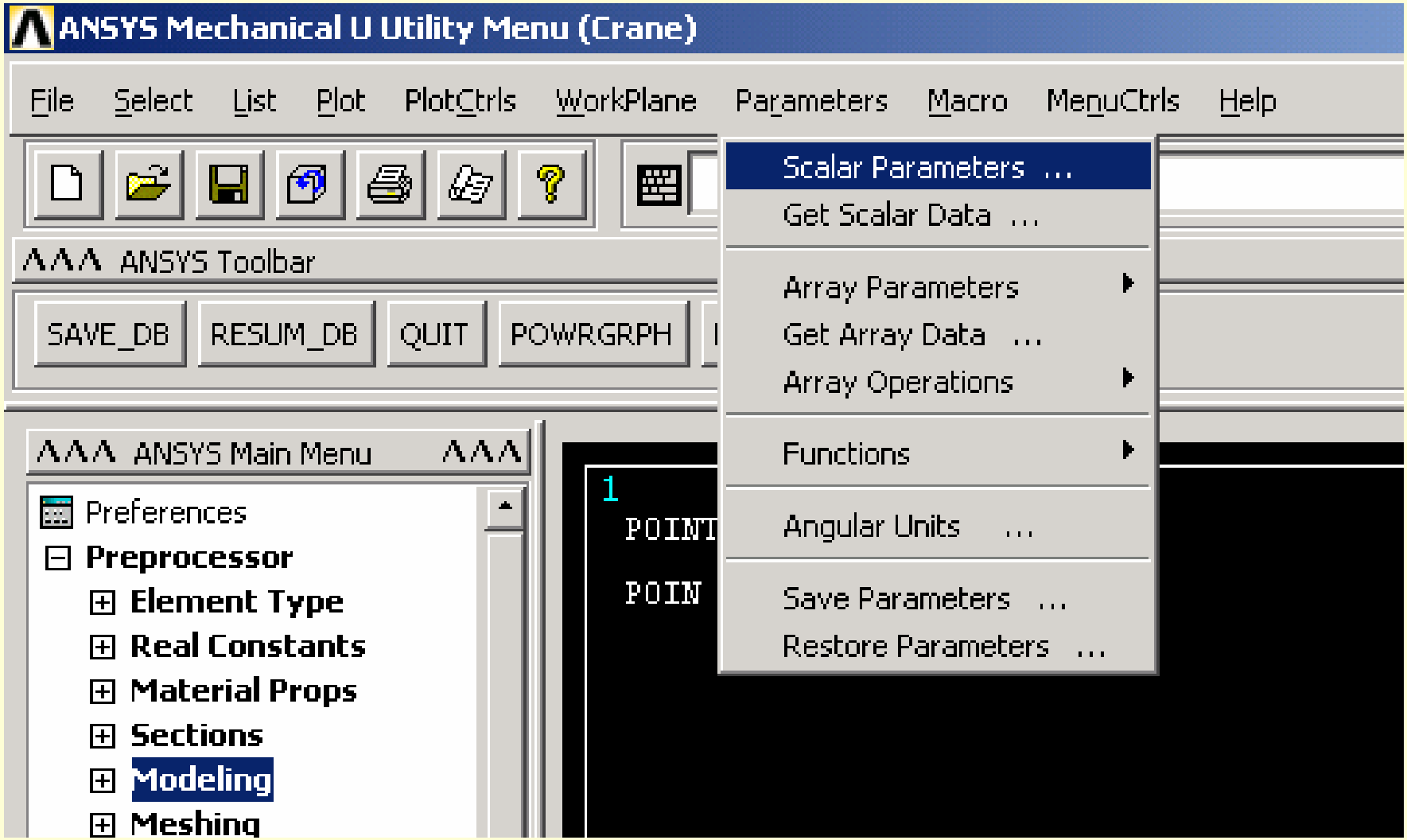


2. 定义参数表

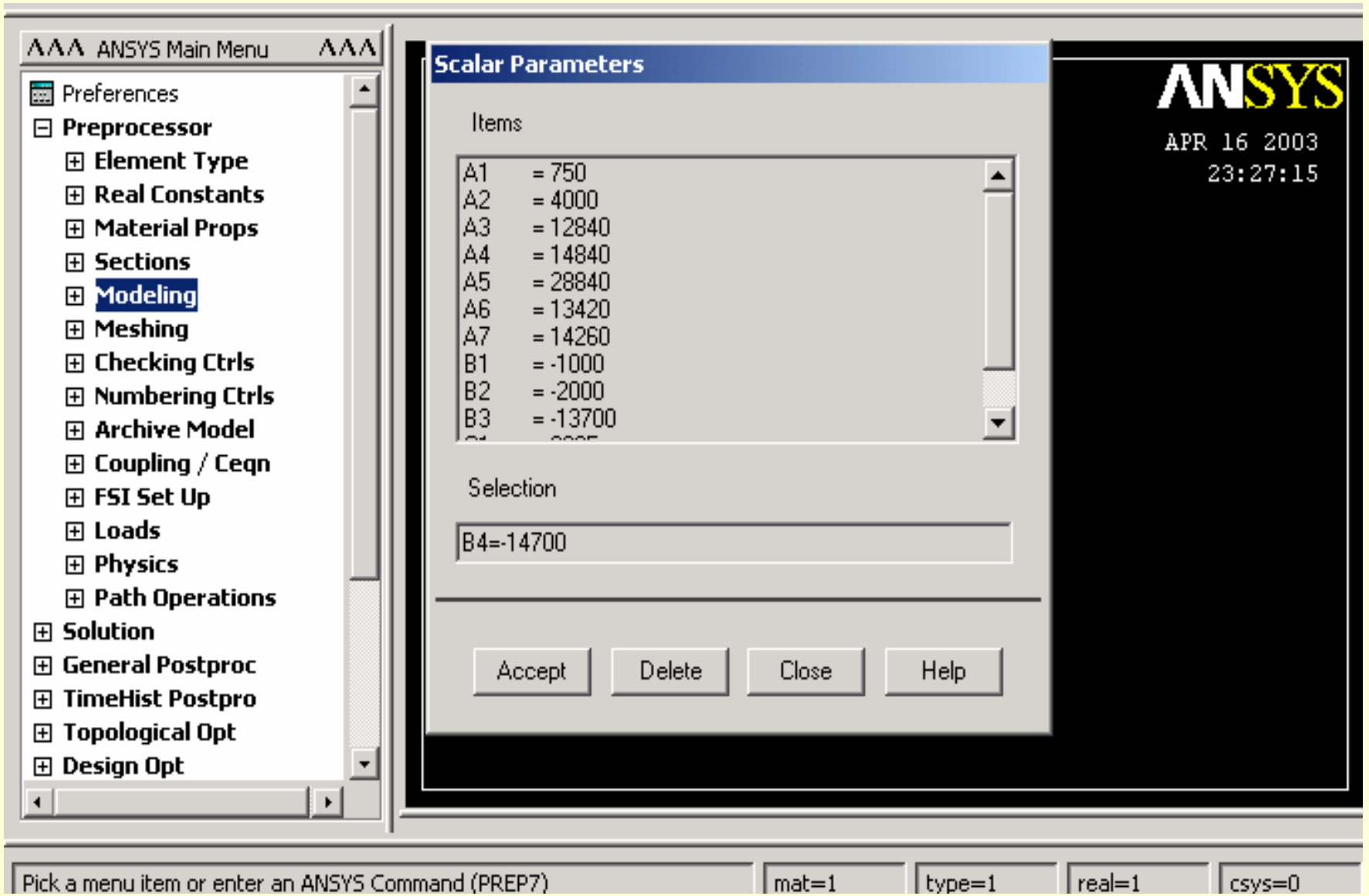
- 确定整体坐标位置



定义标量参数

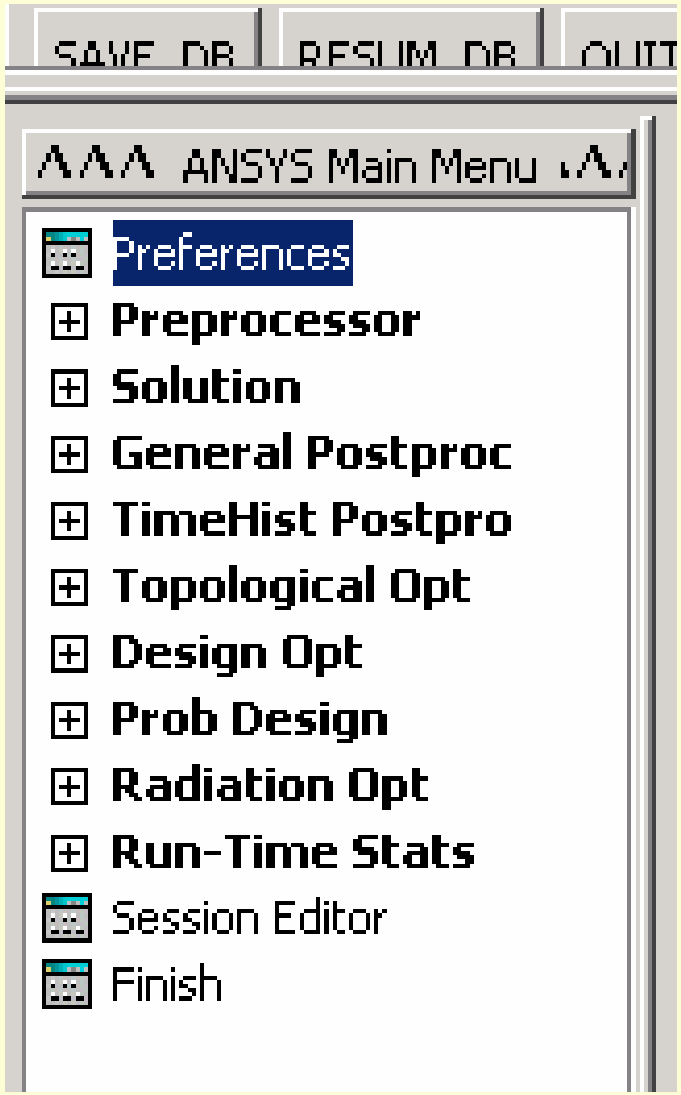


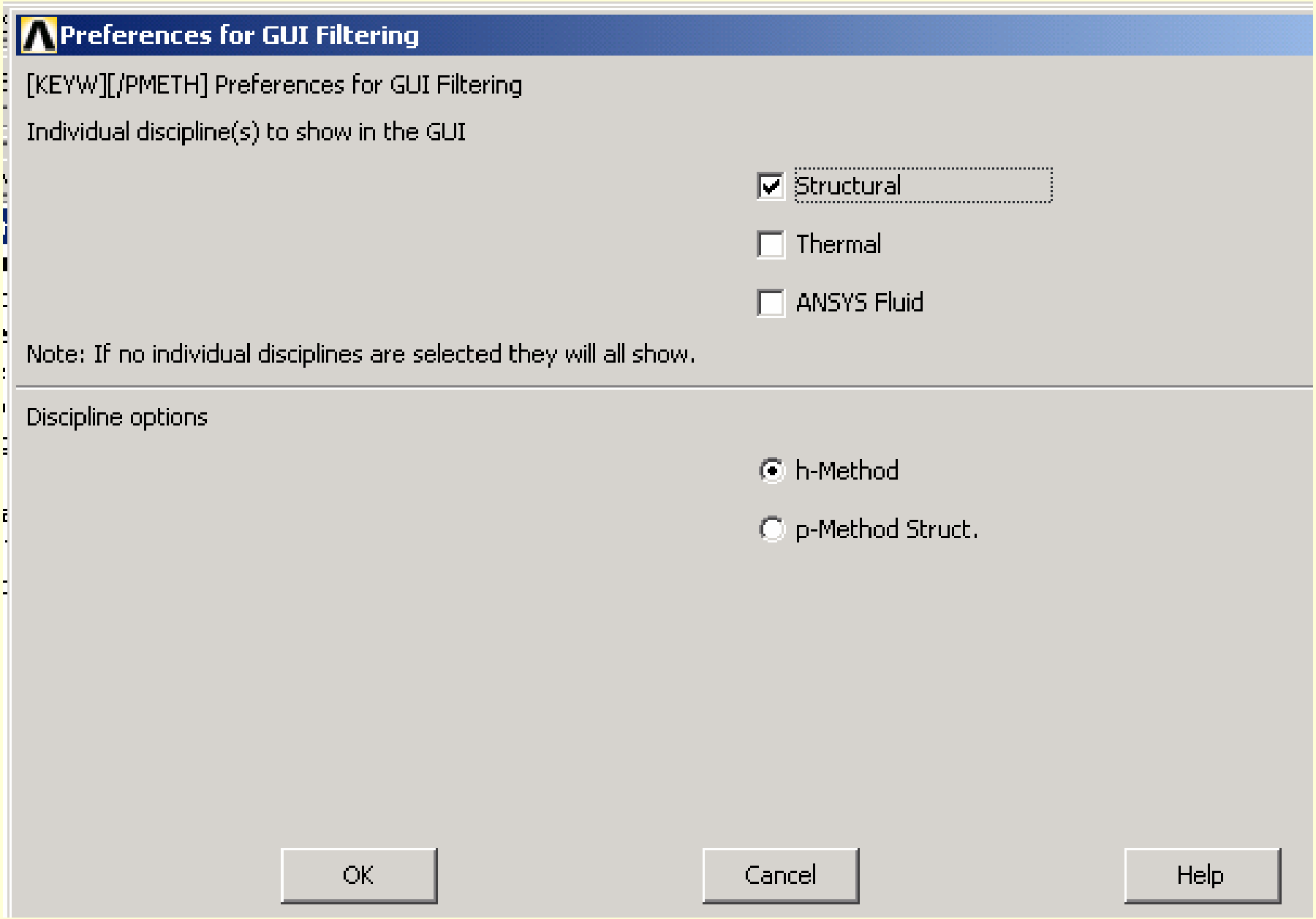
定义标量参数



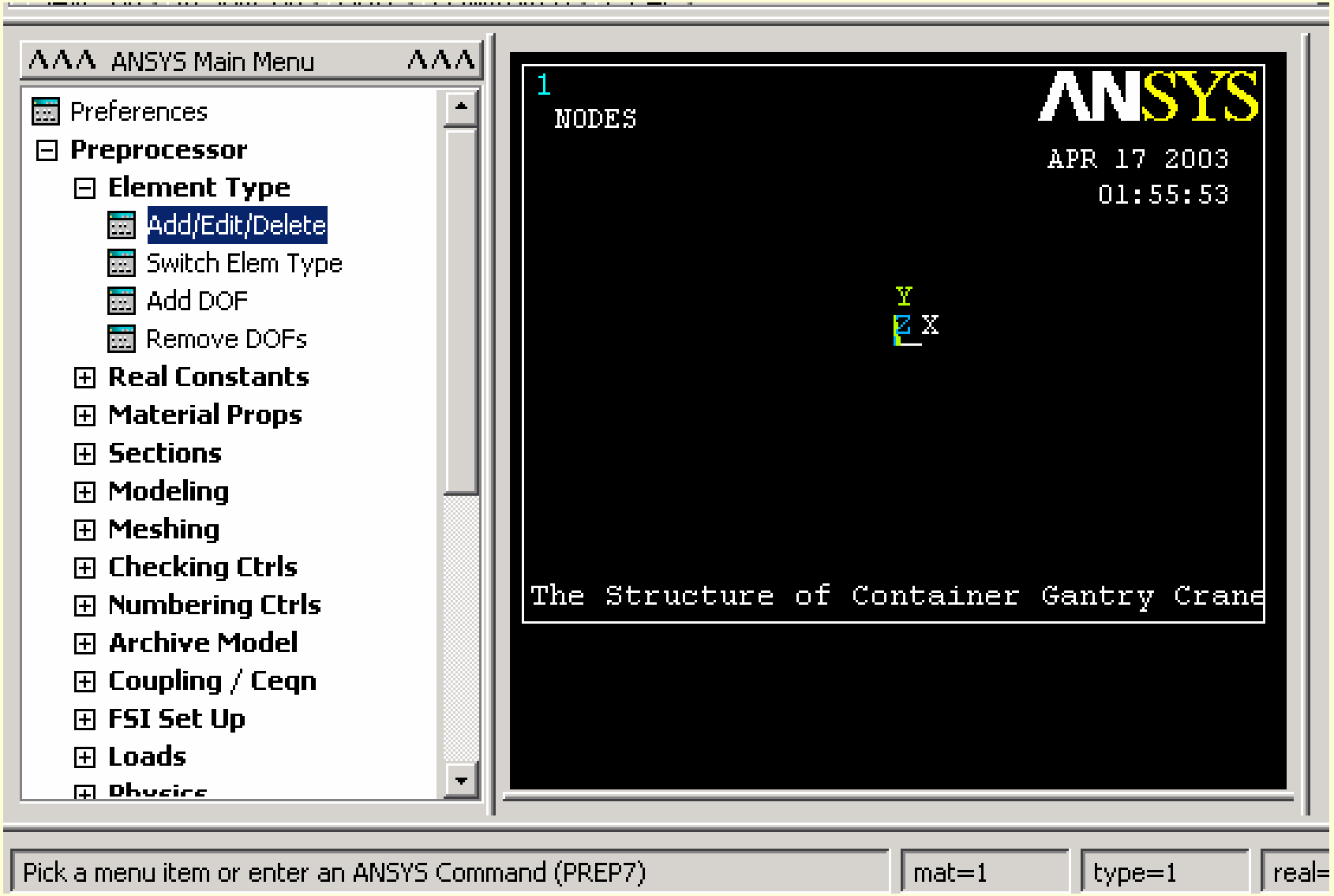
3. 定义单元类型

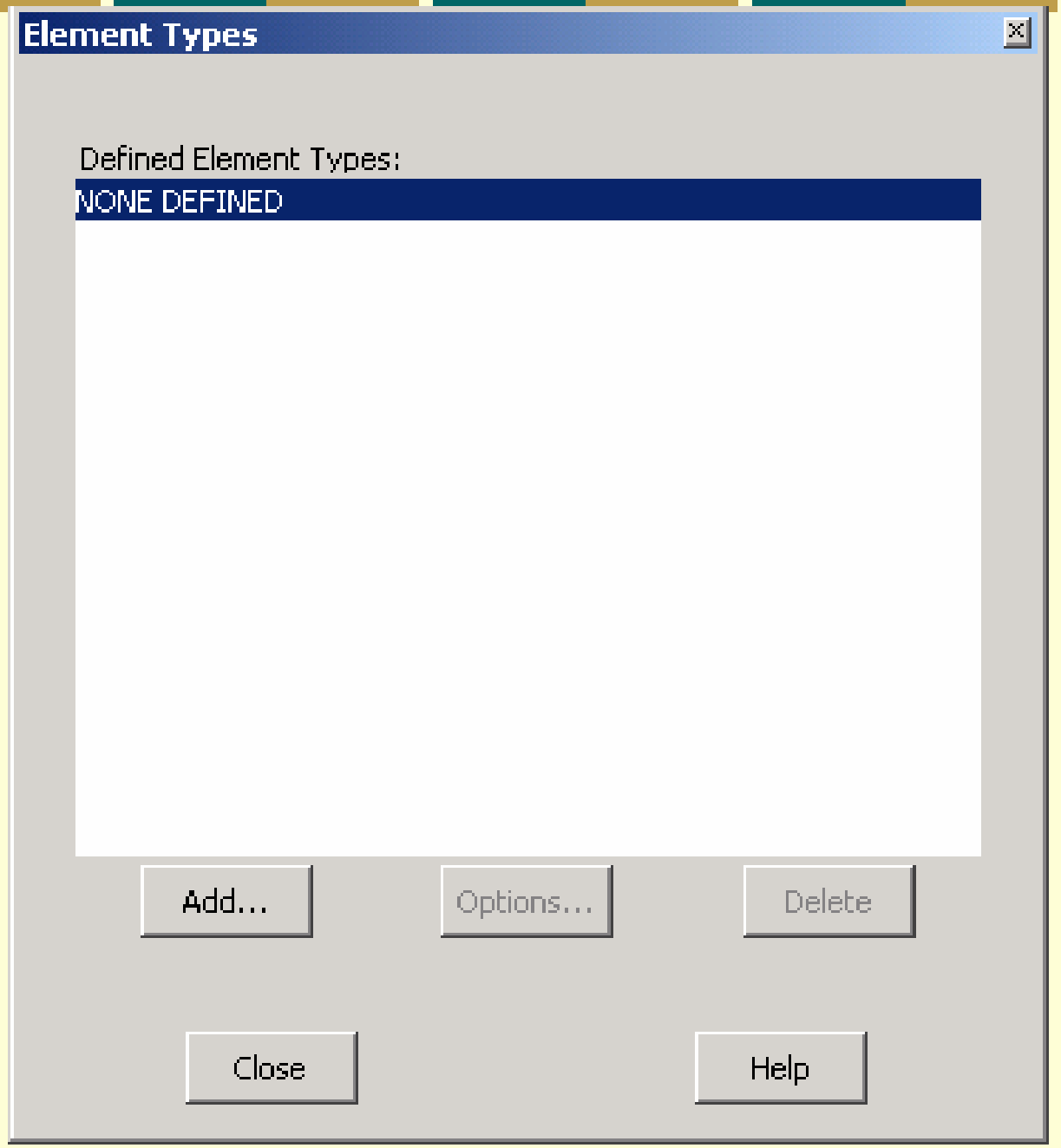
- 设置分析类型

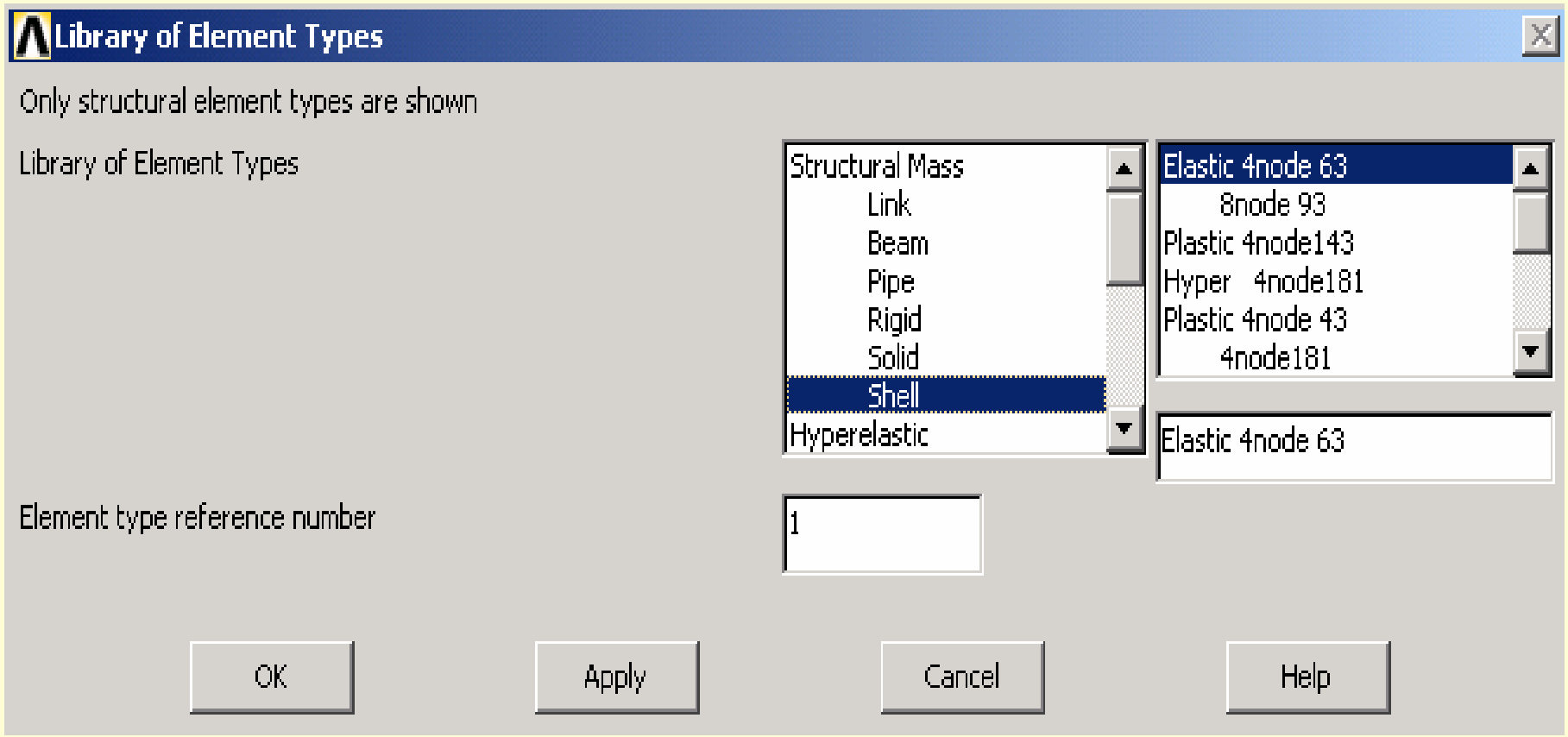


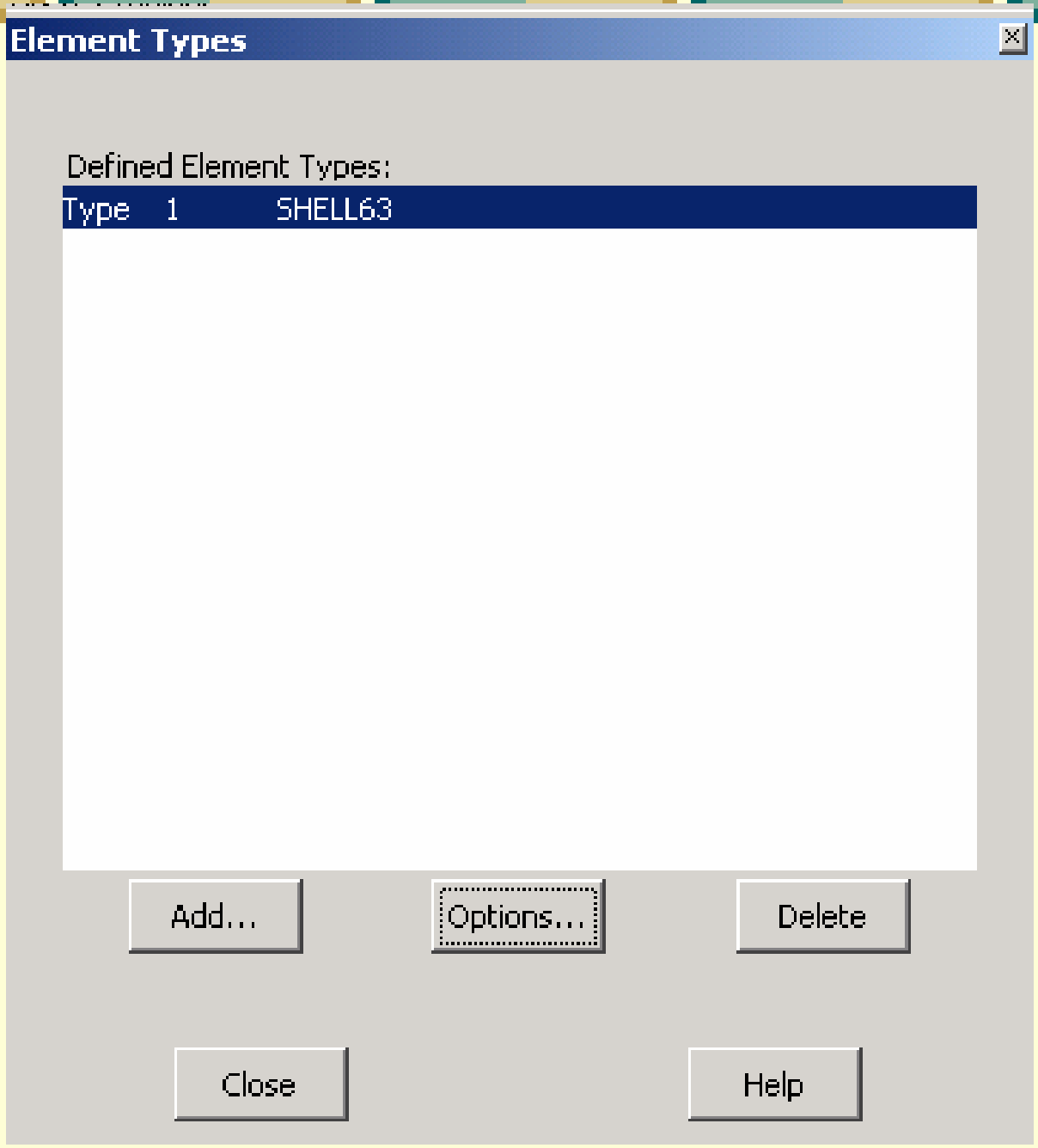


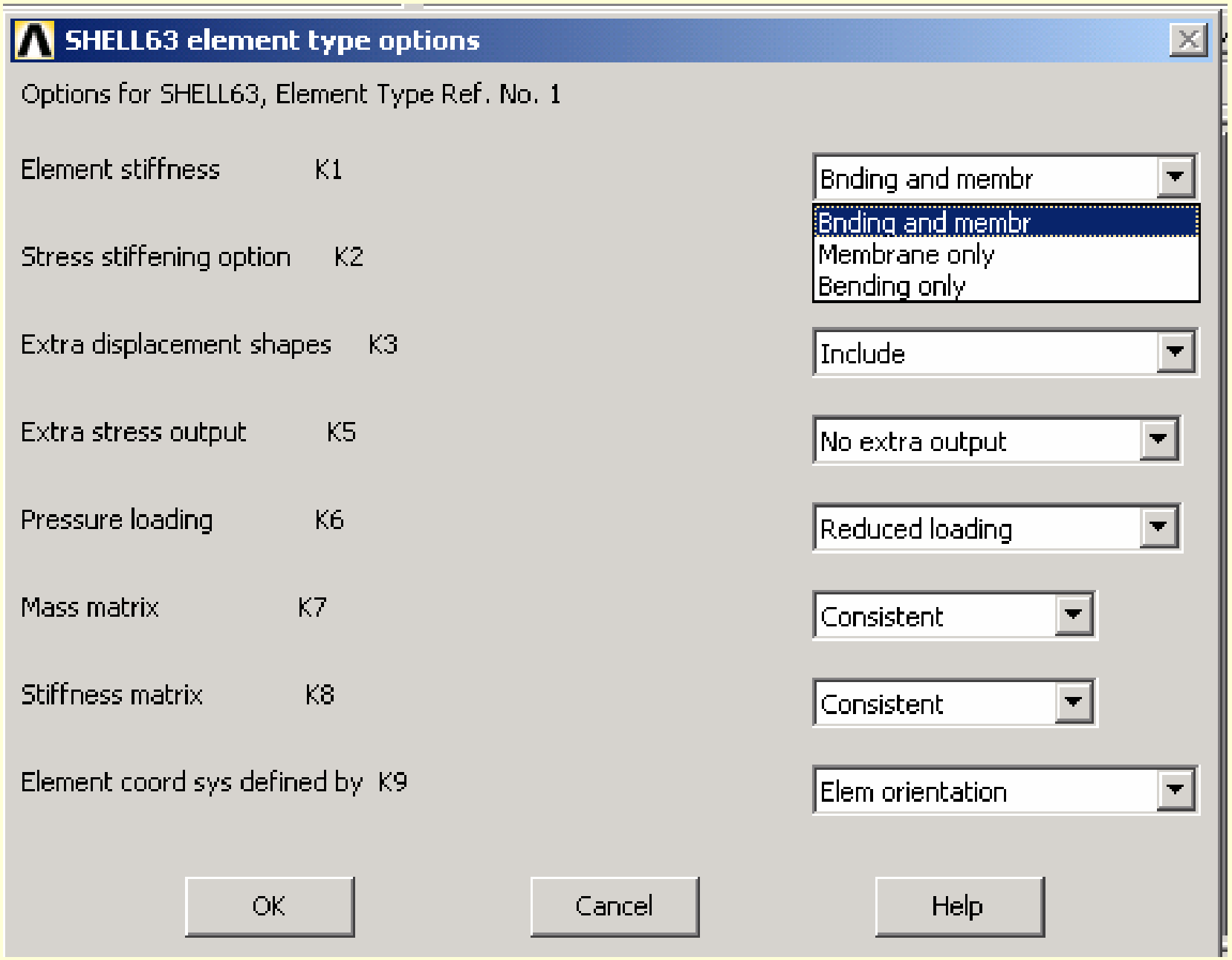
定义单元类型



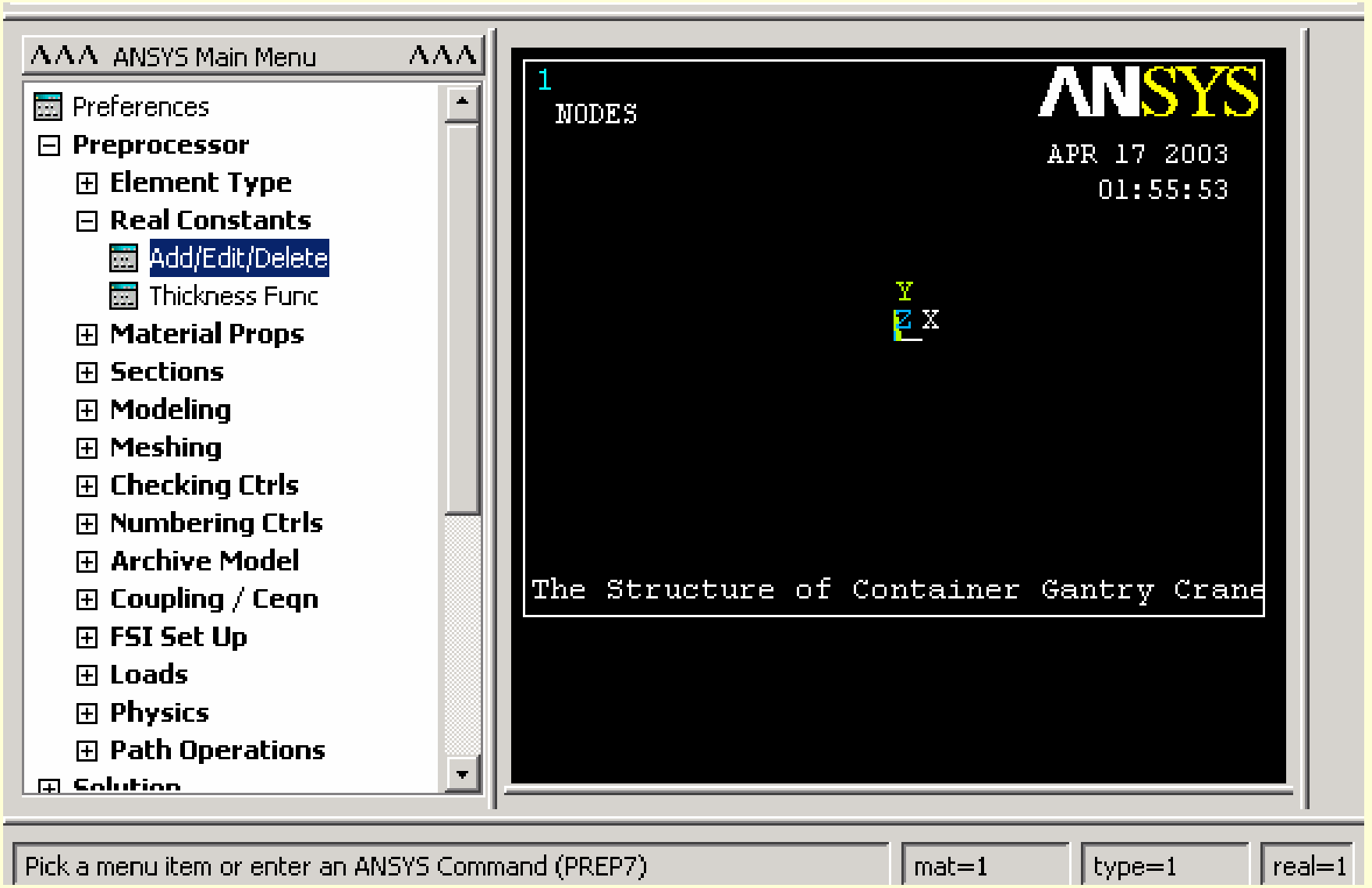


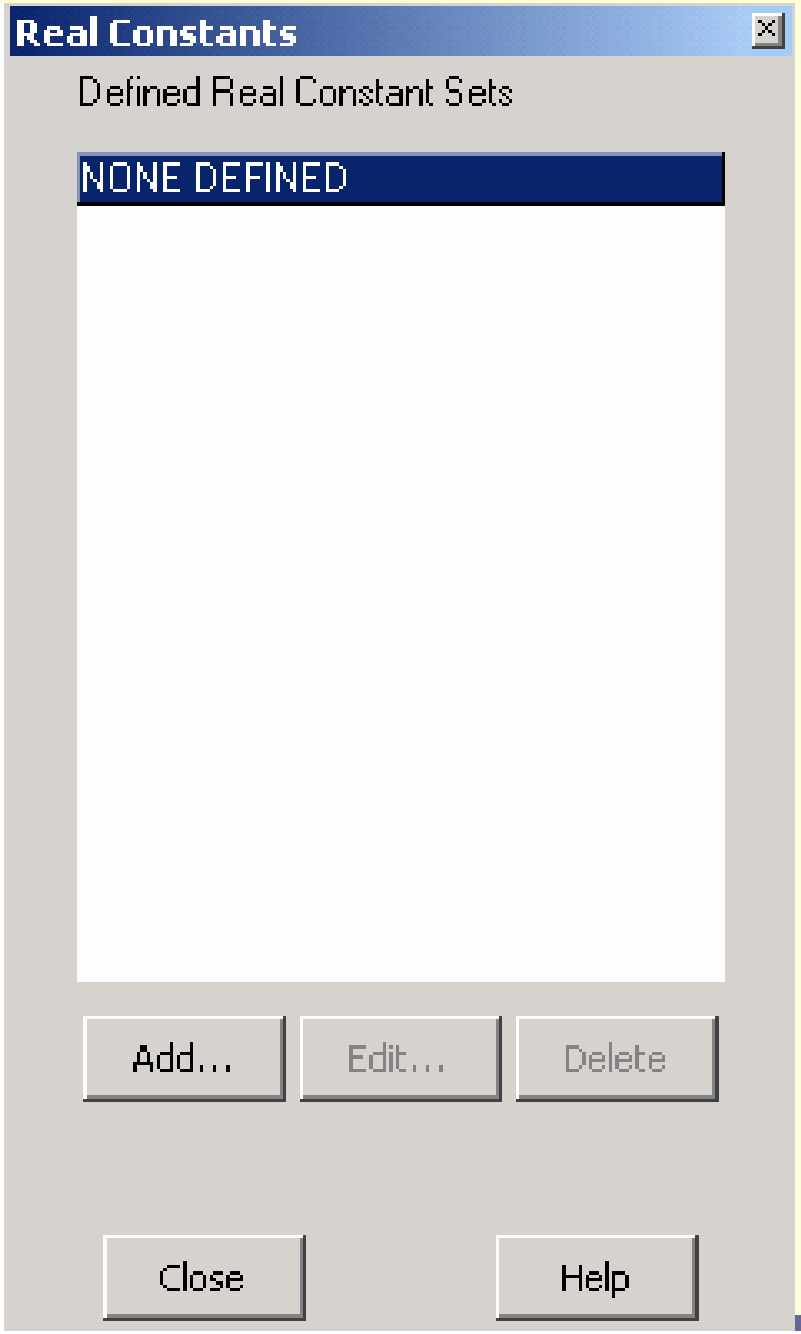


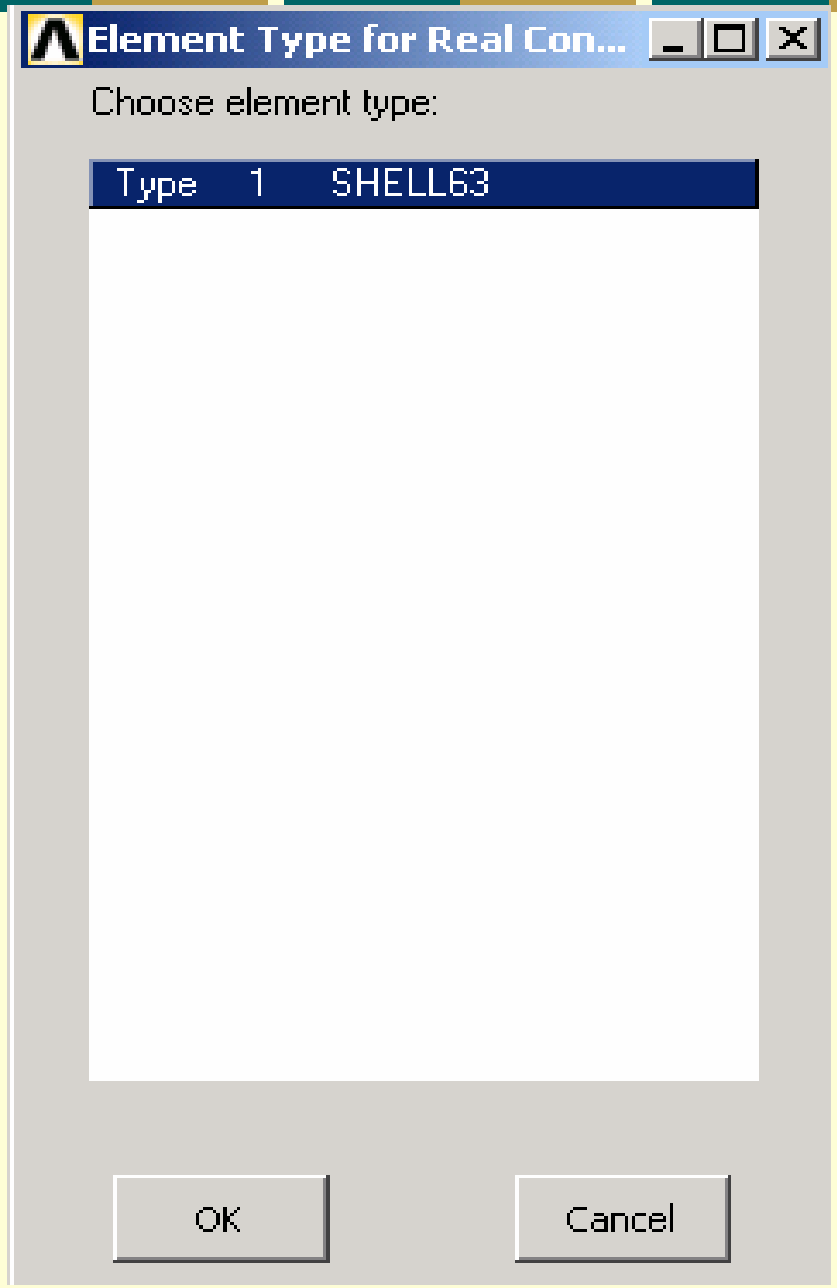


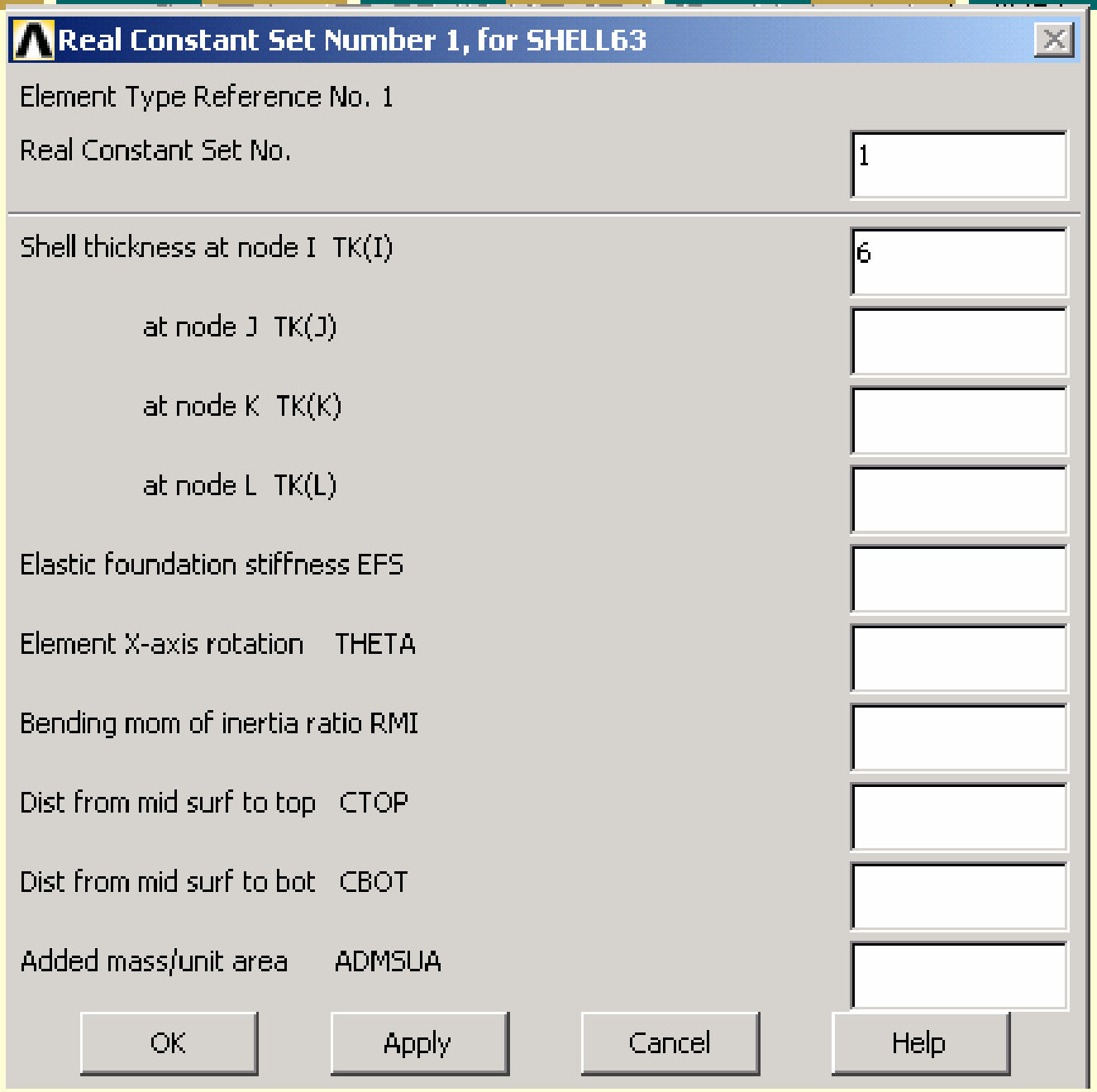


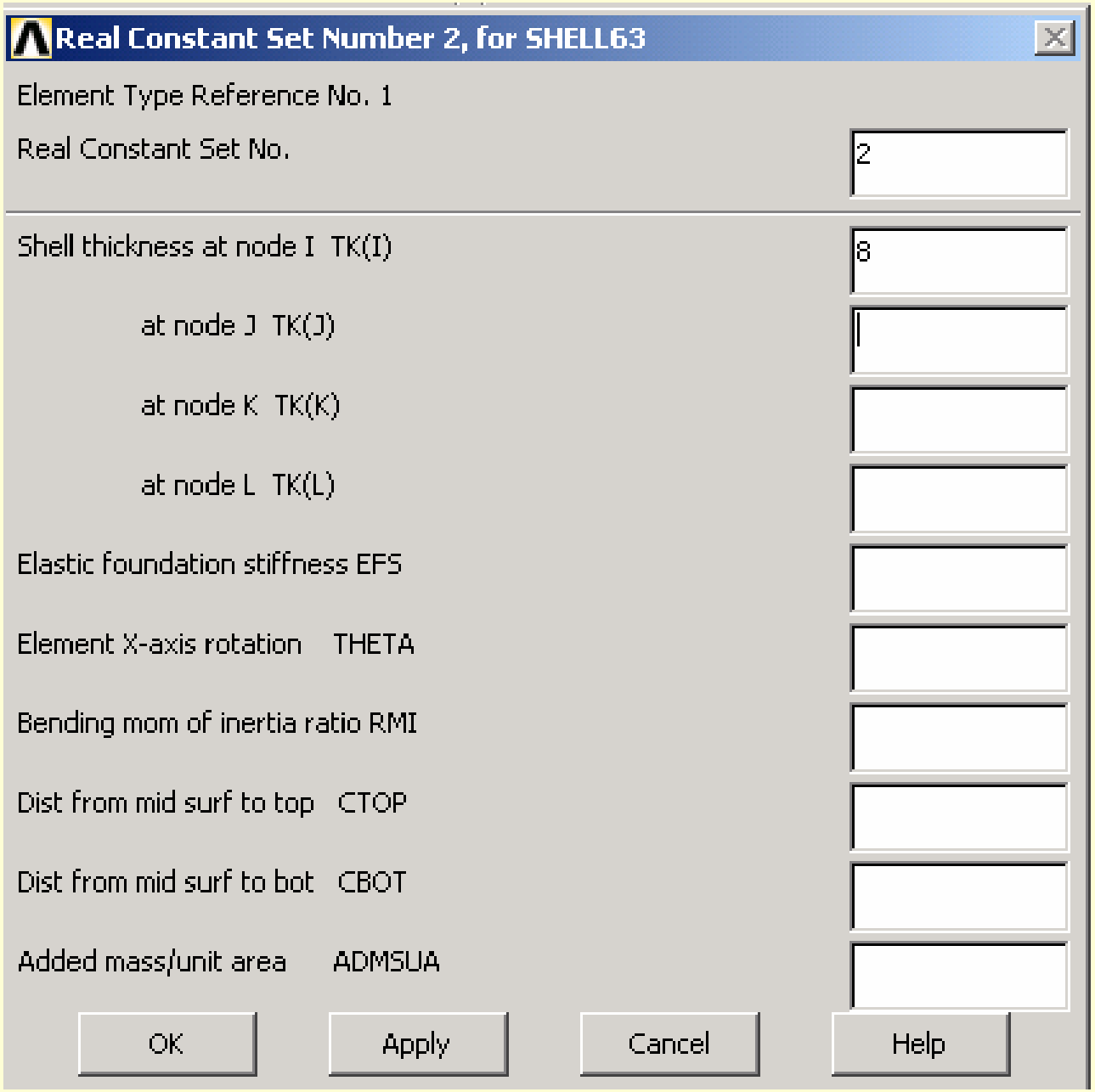
4. 定义实常数

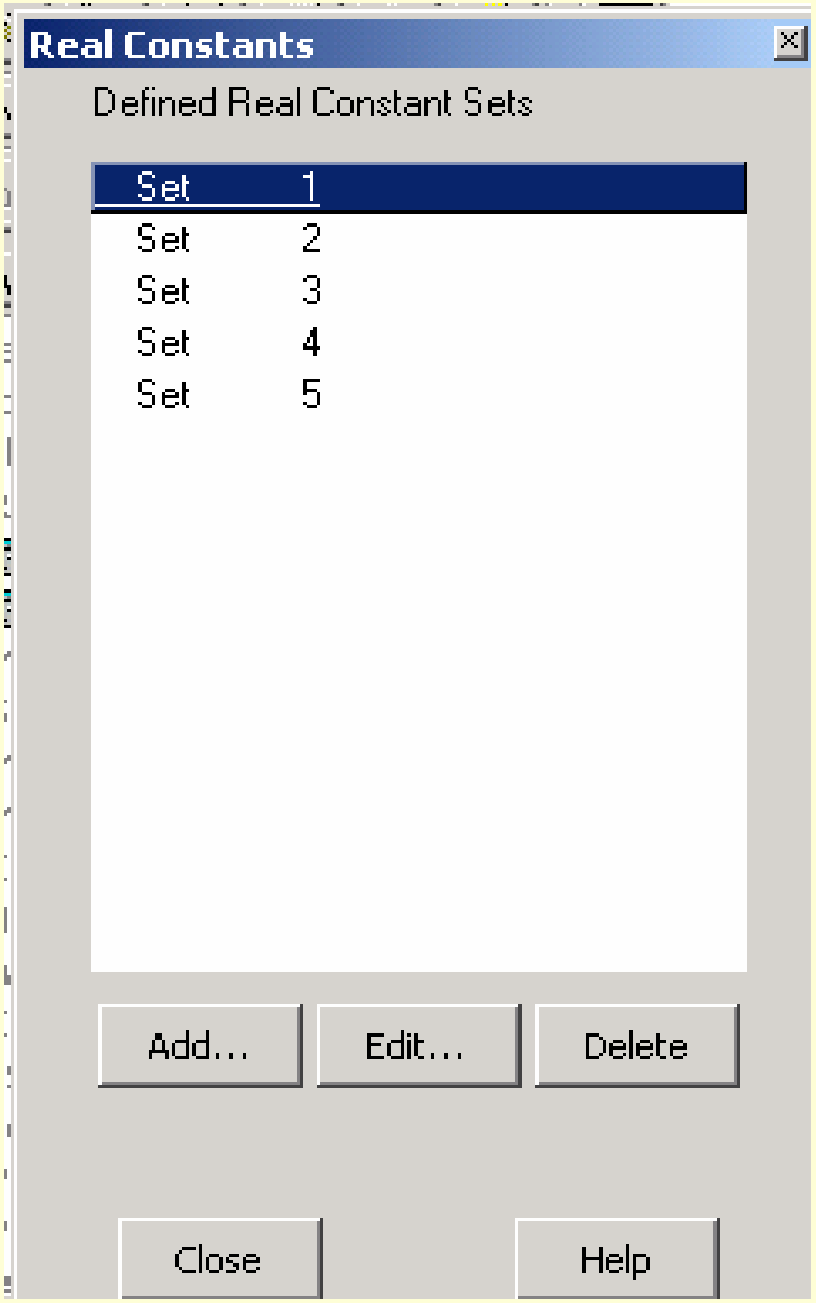




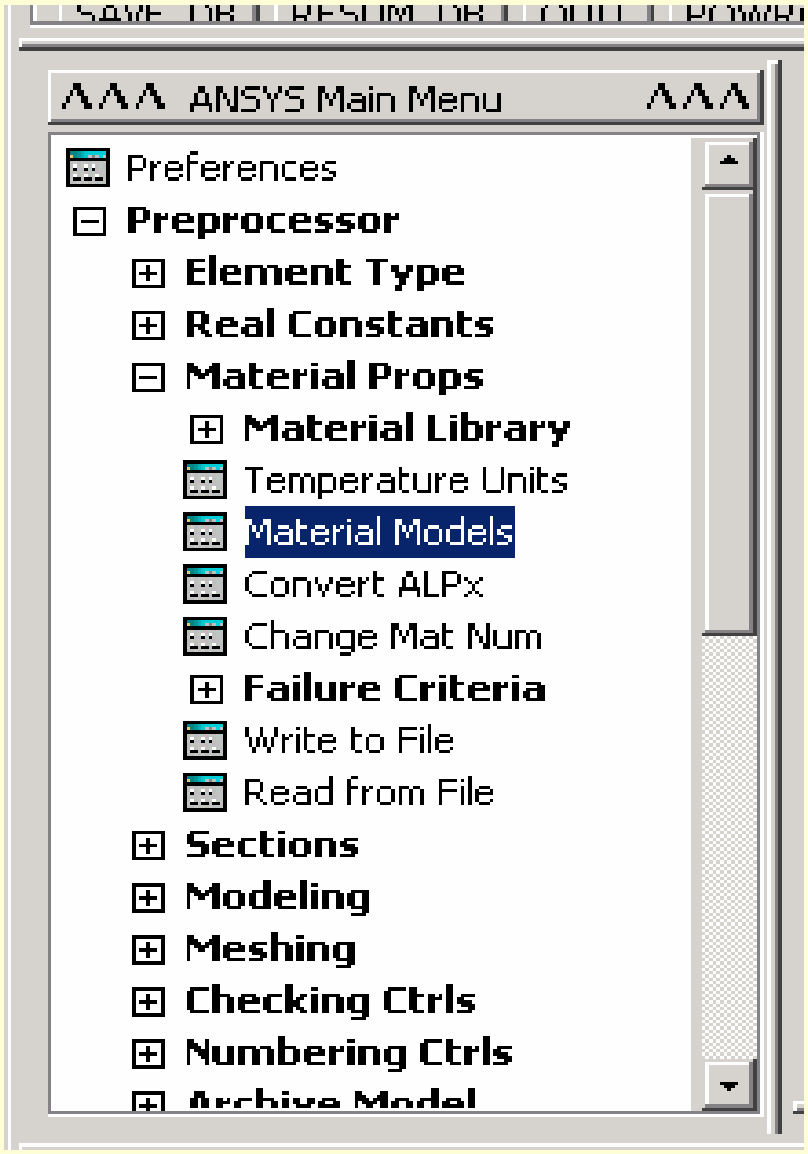


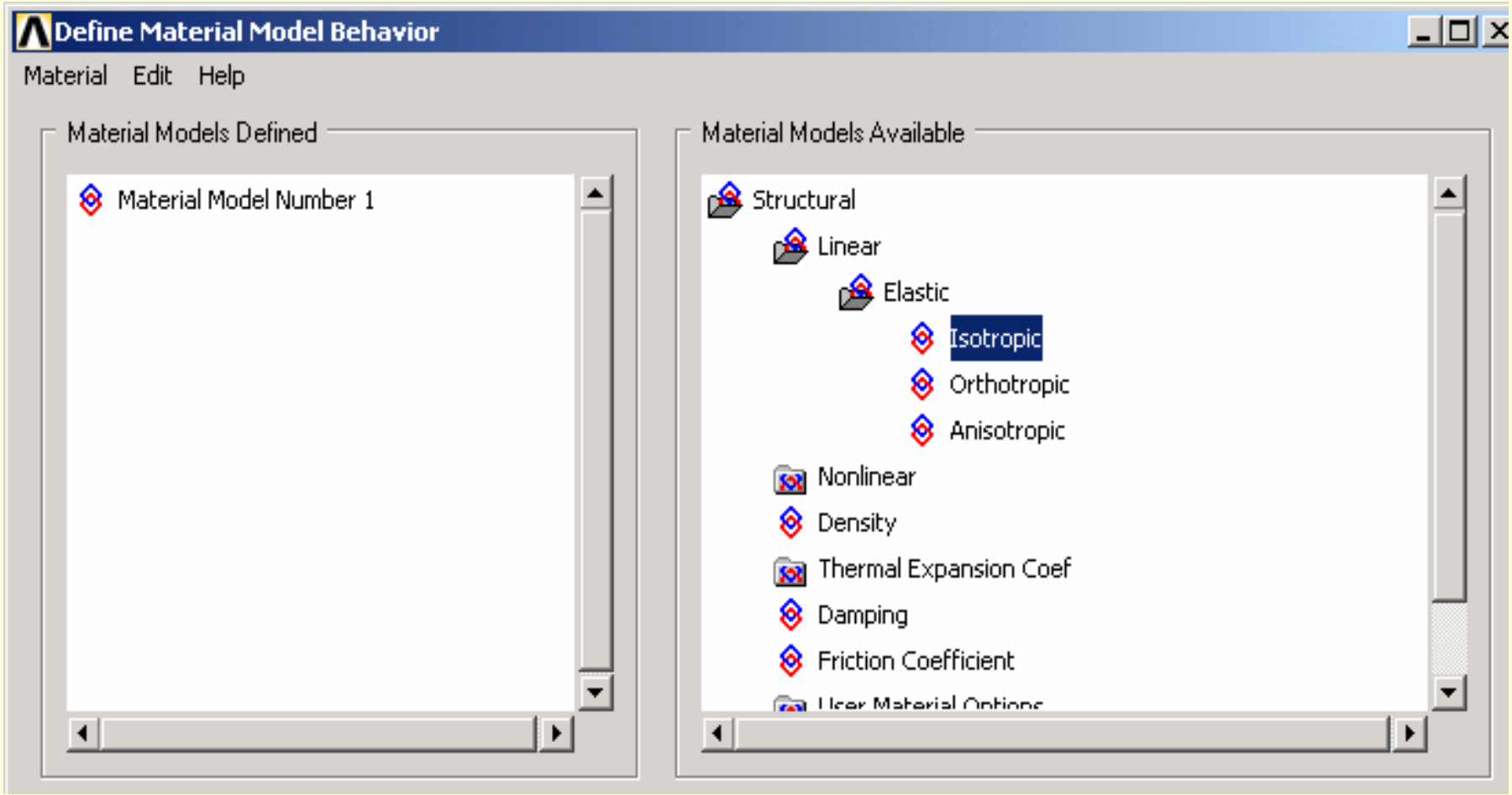


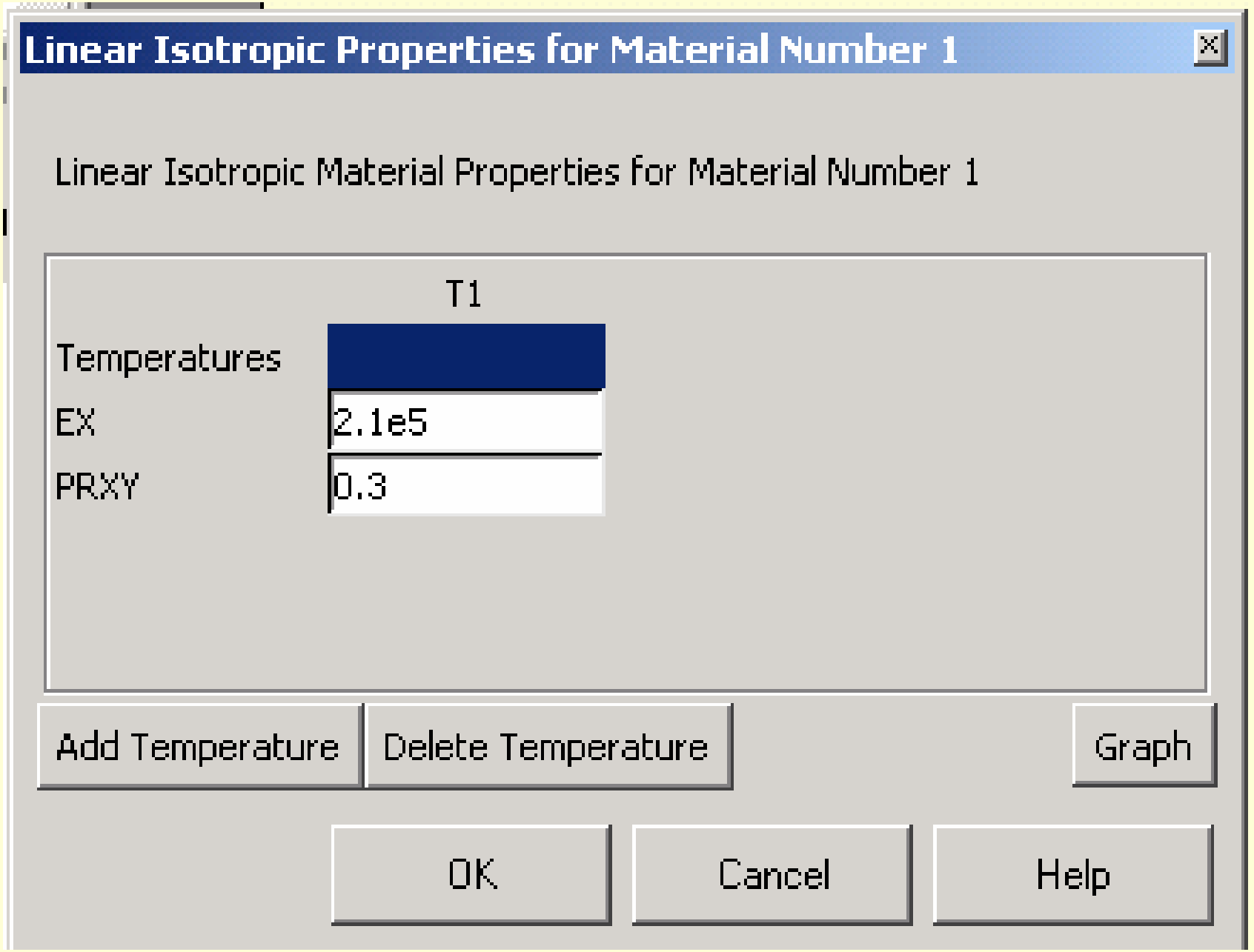


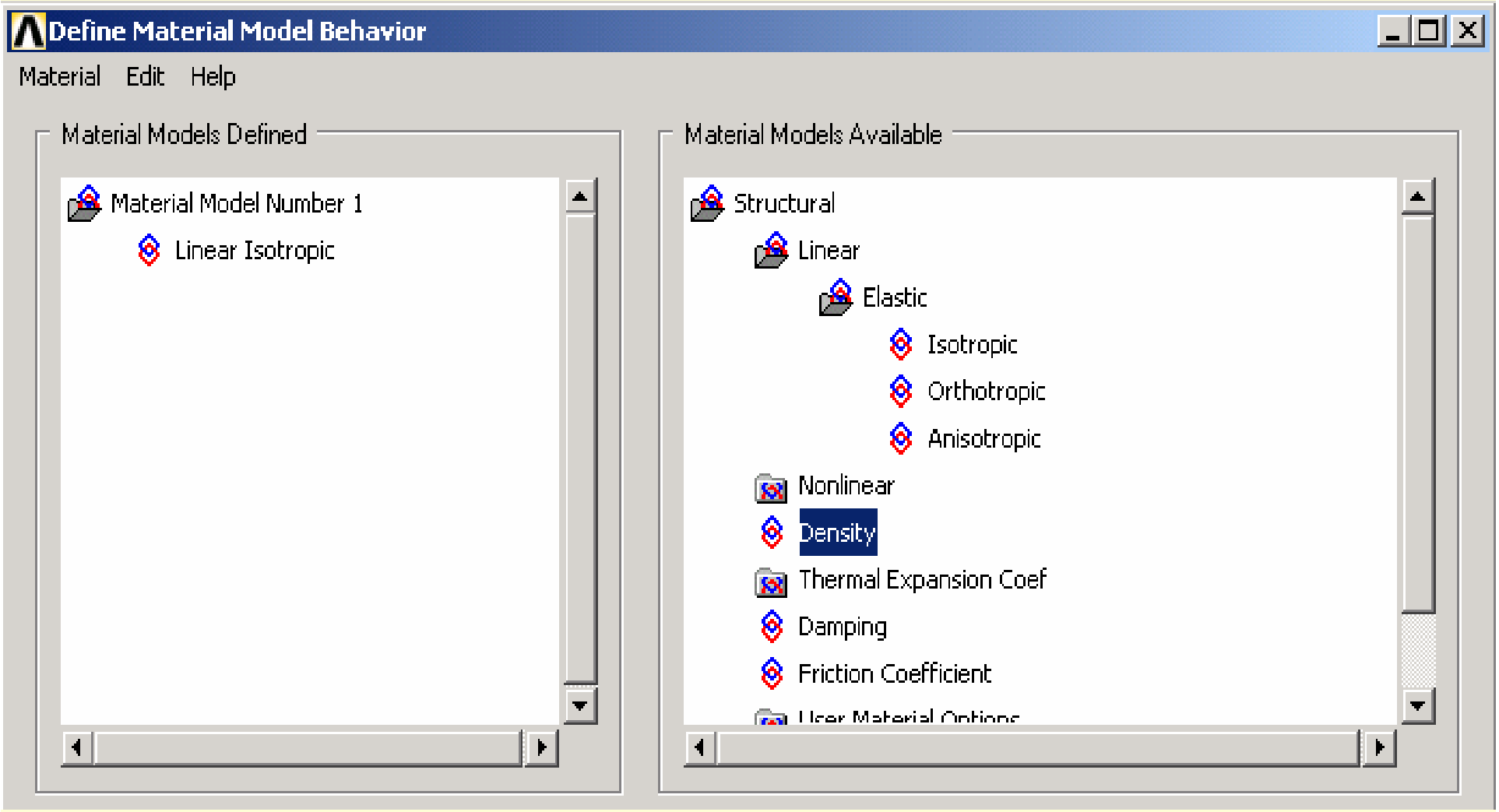


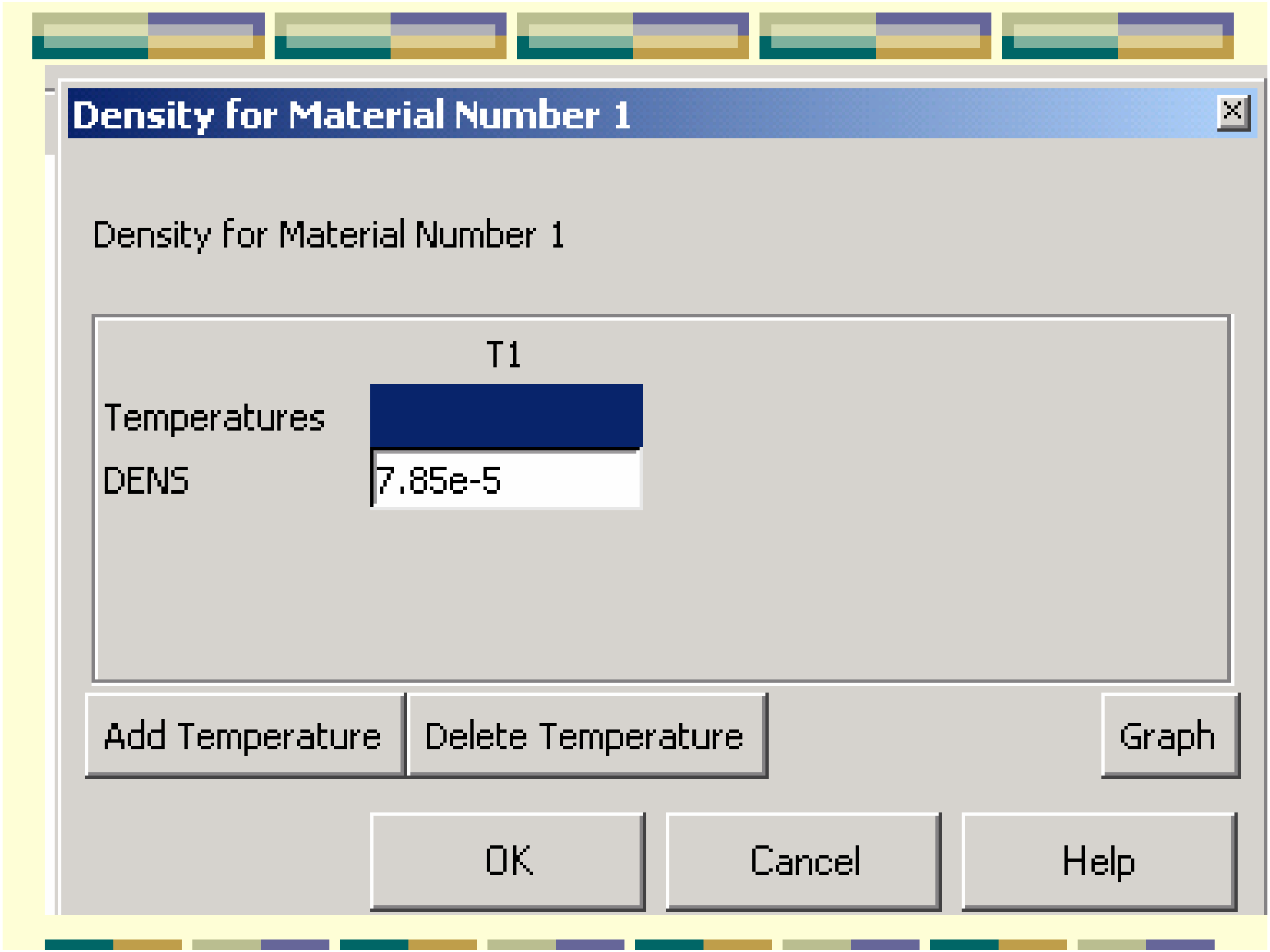
5. 定义材料特性



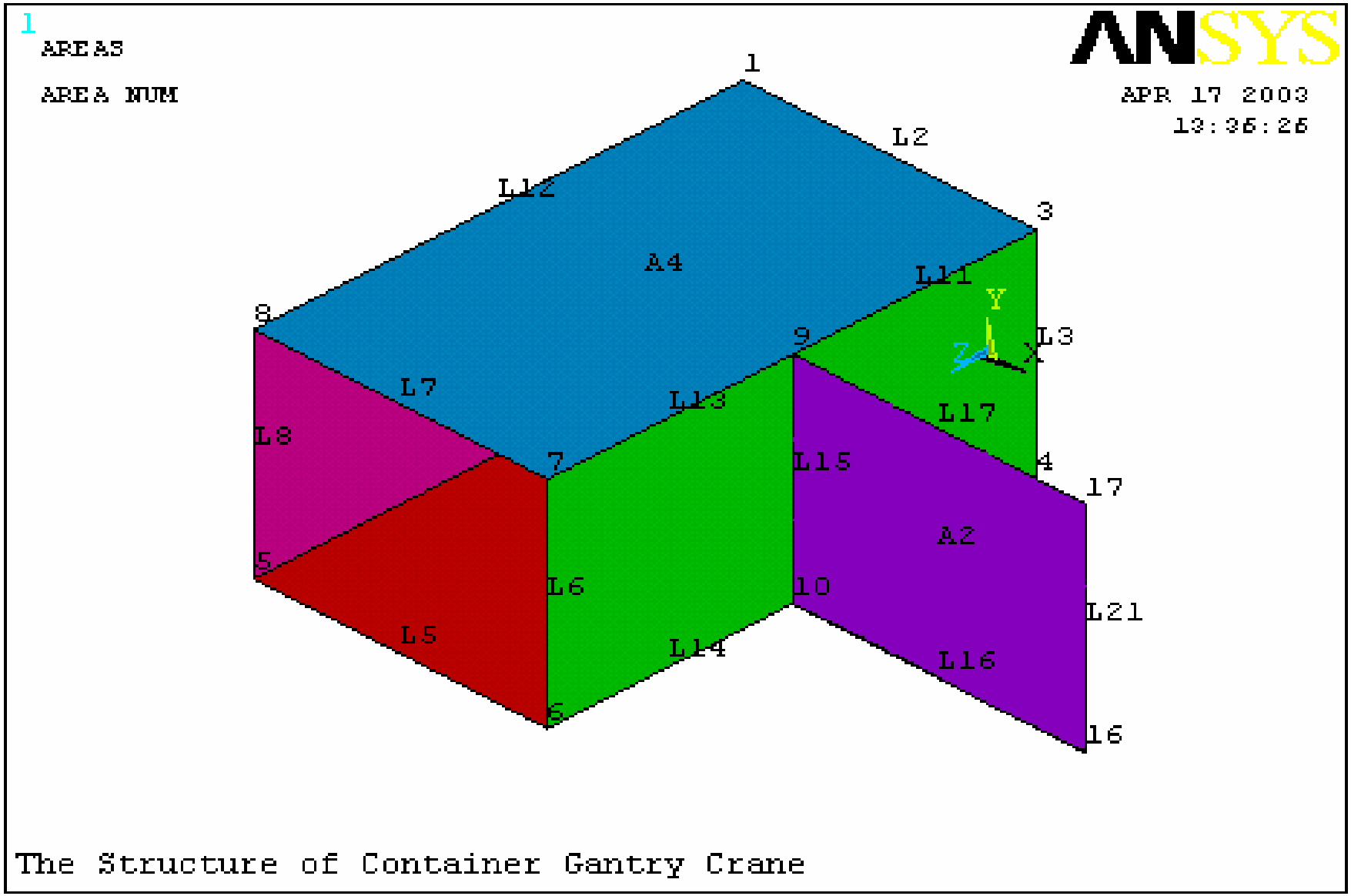


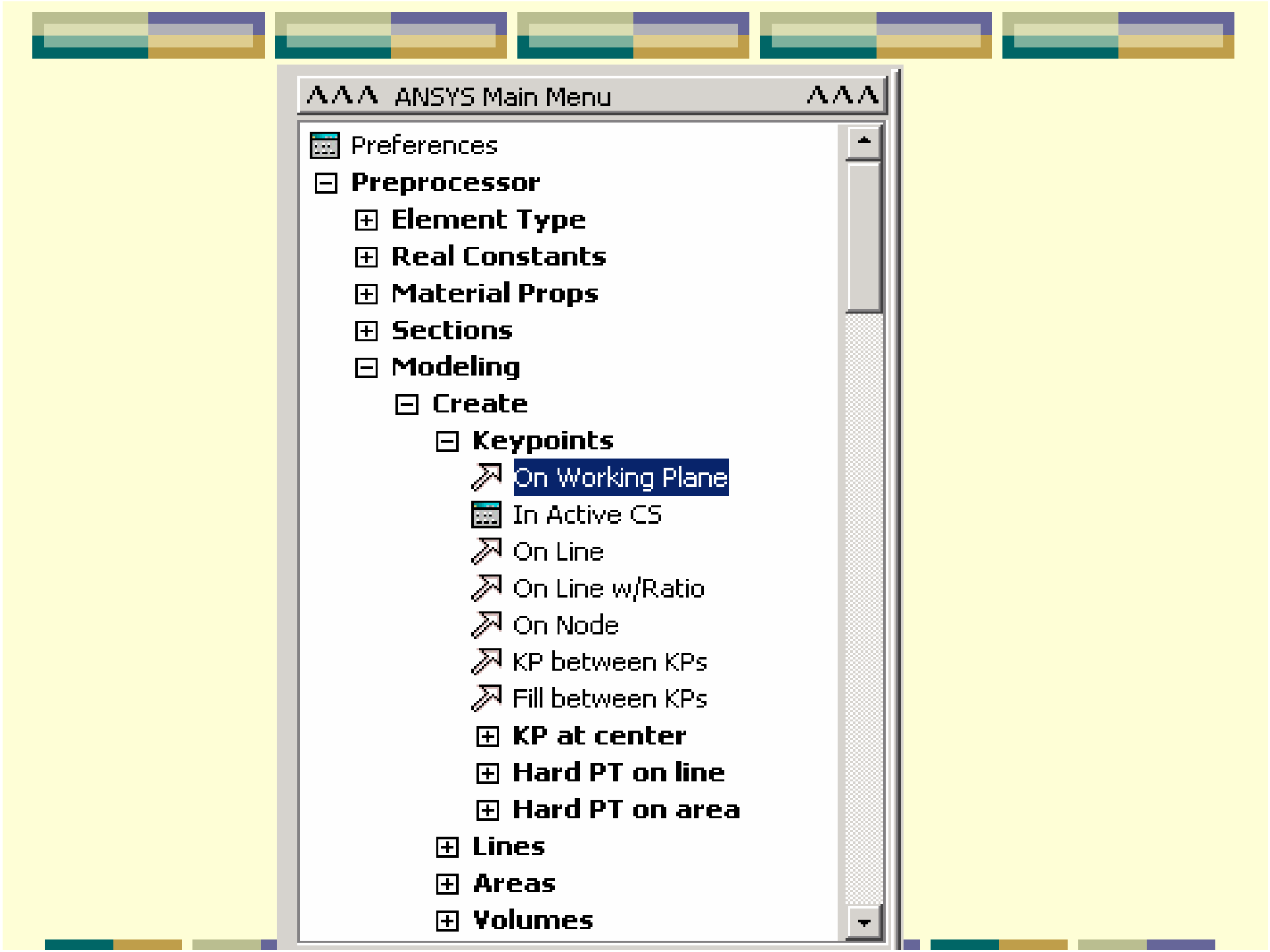


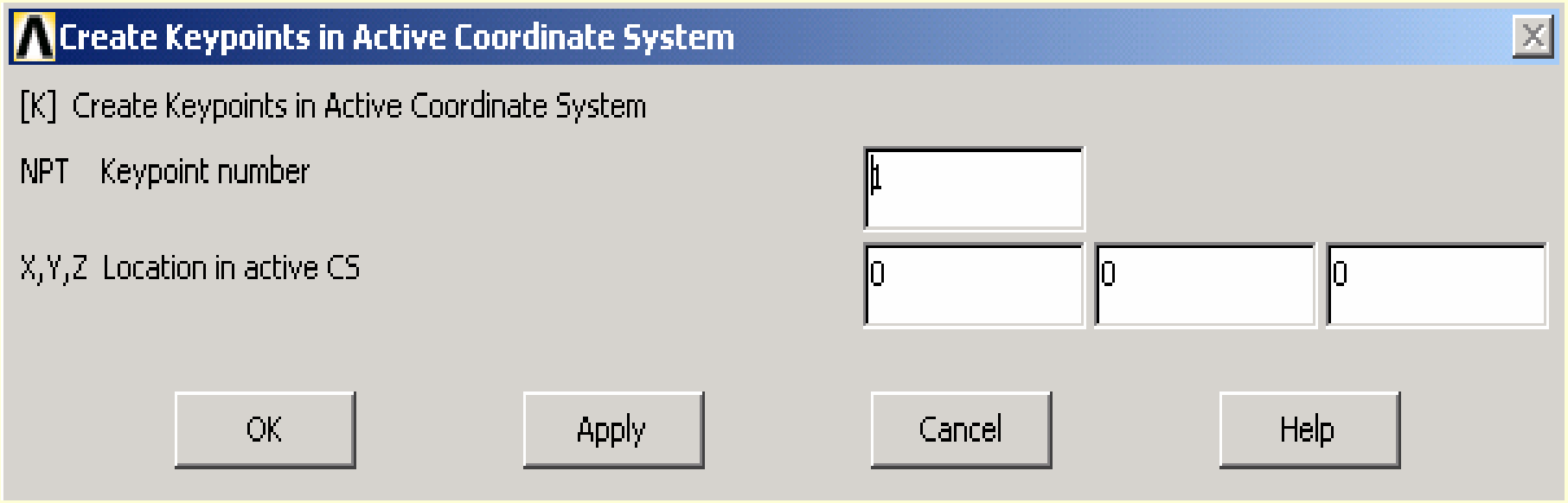


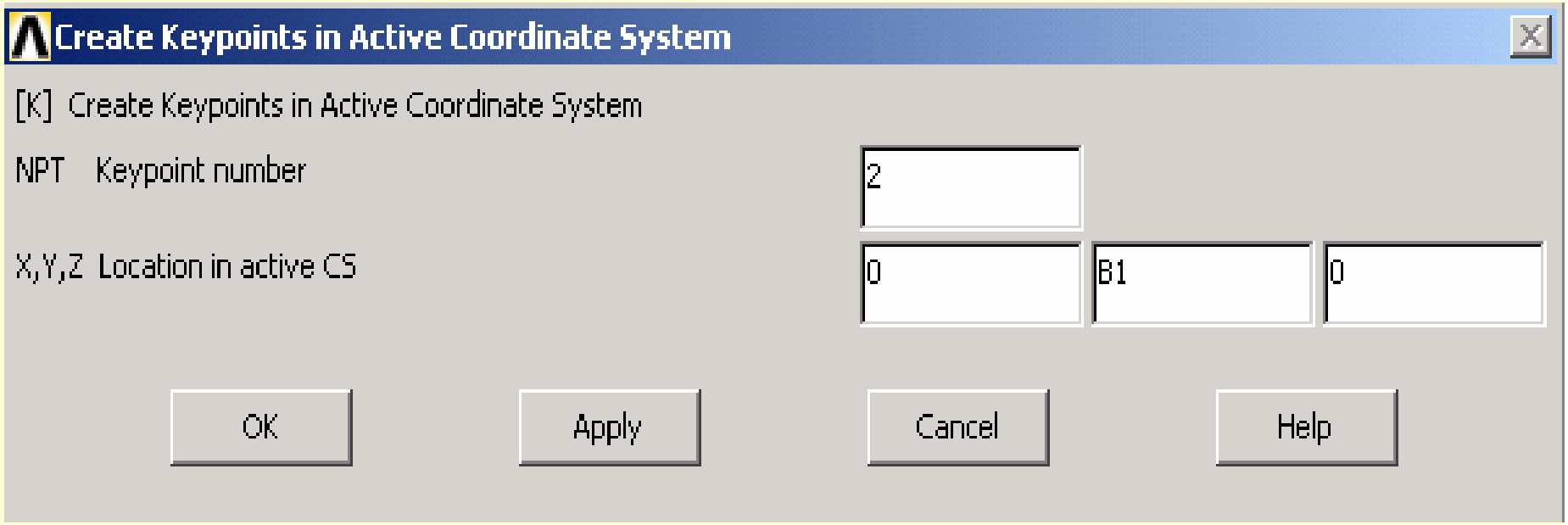


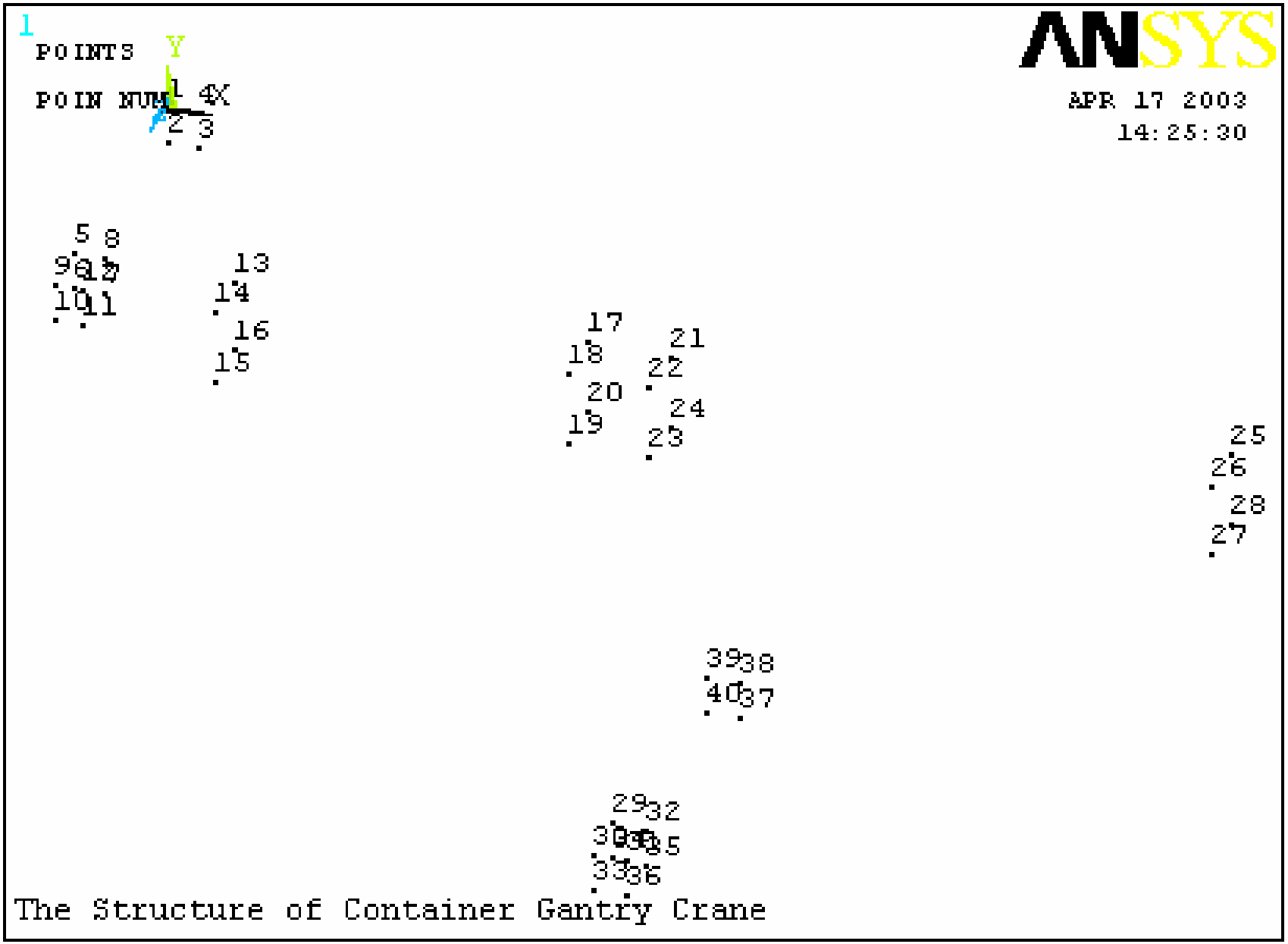
6. 创建关键点



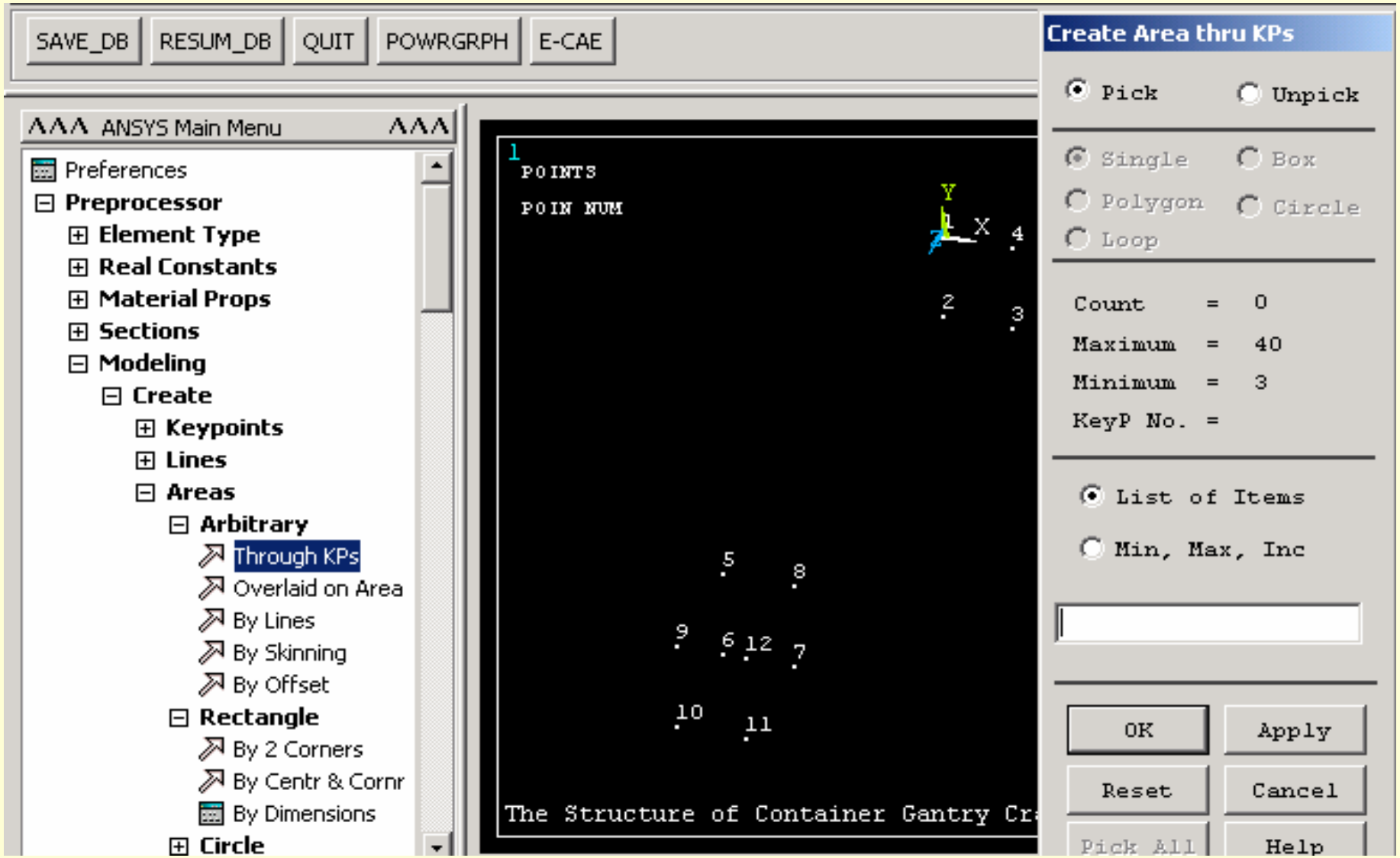


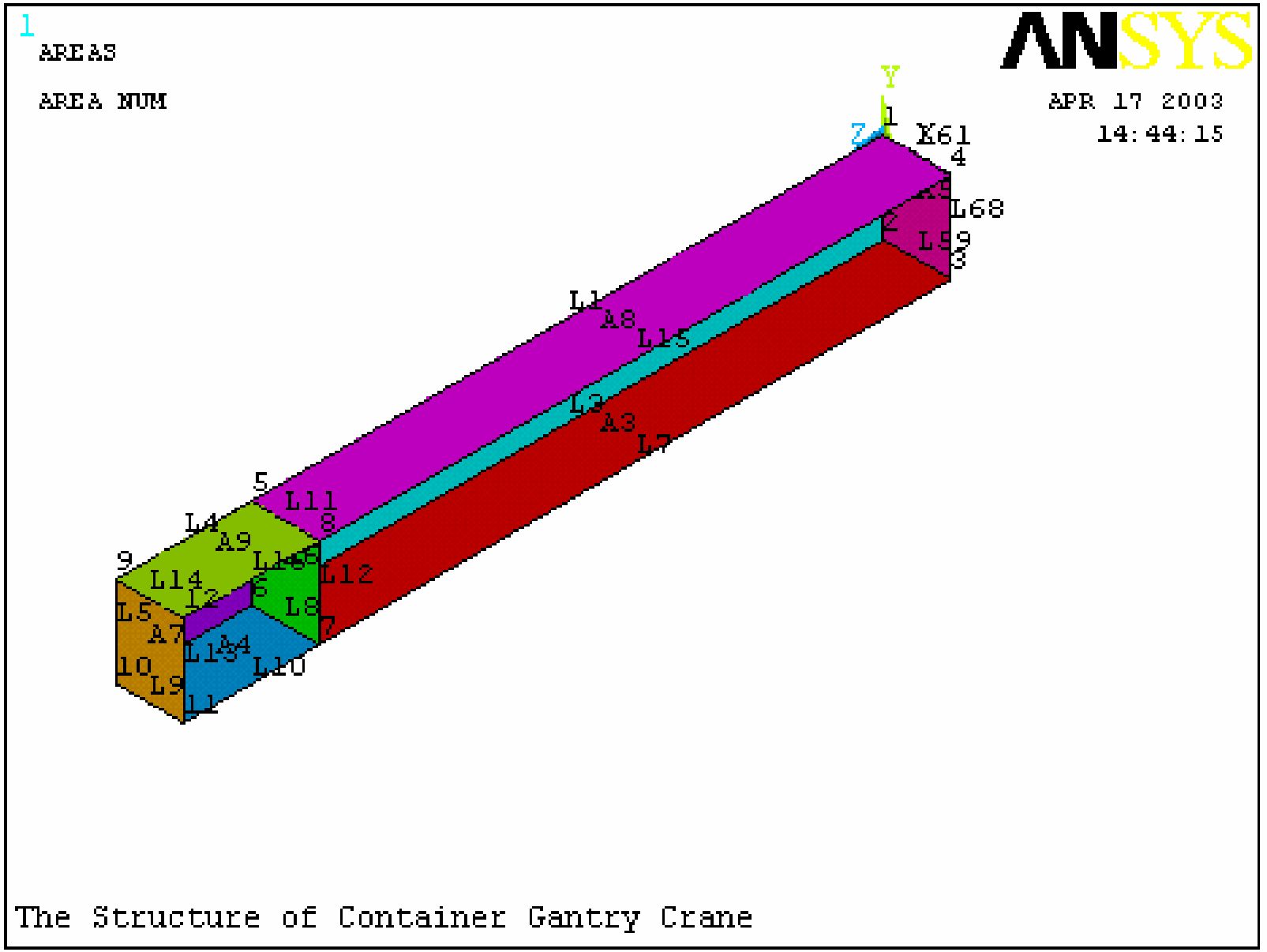


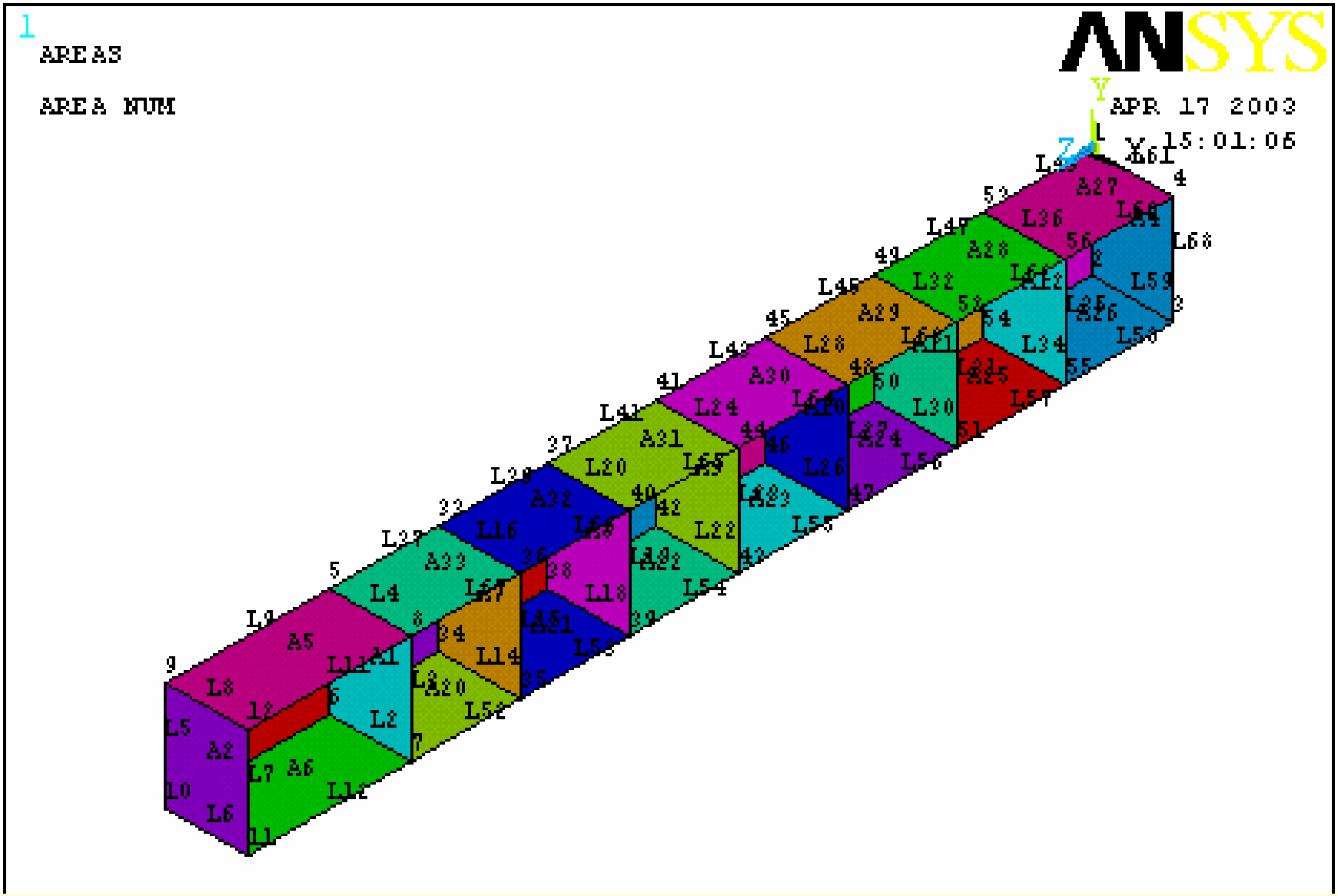


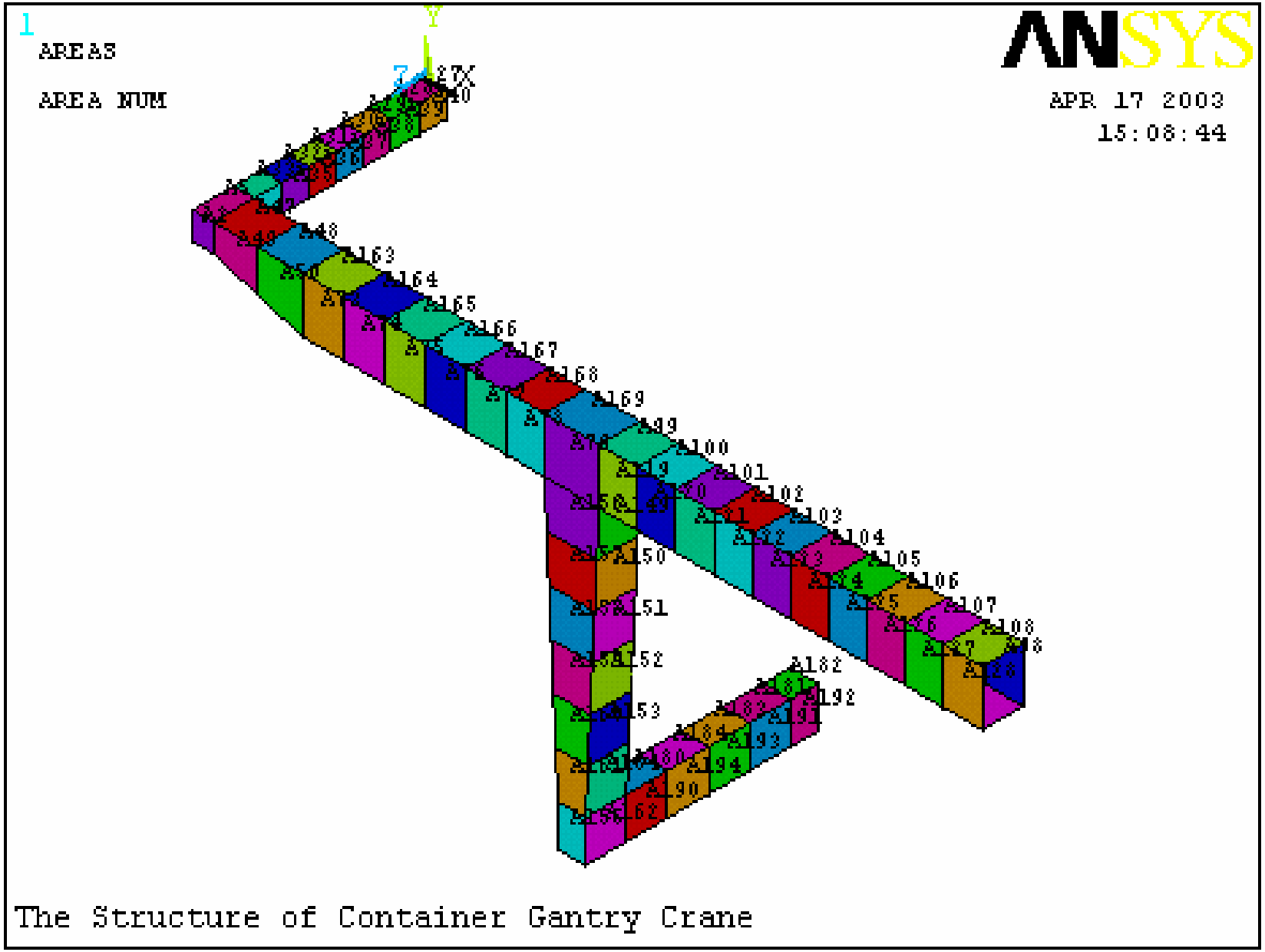


7. 创建面

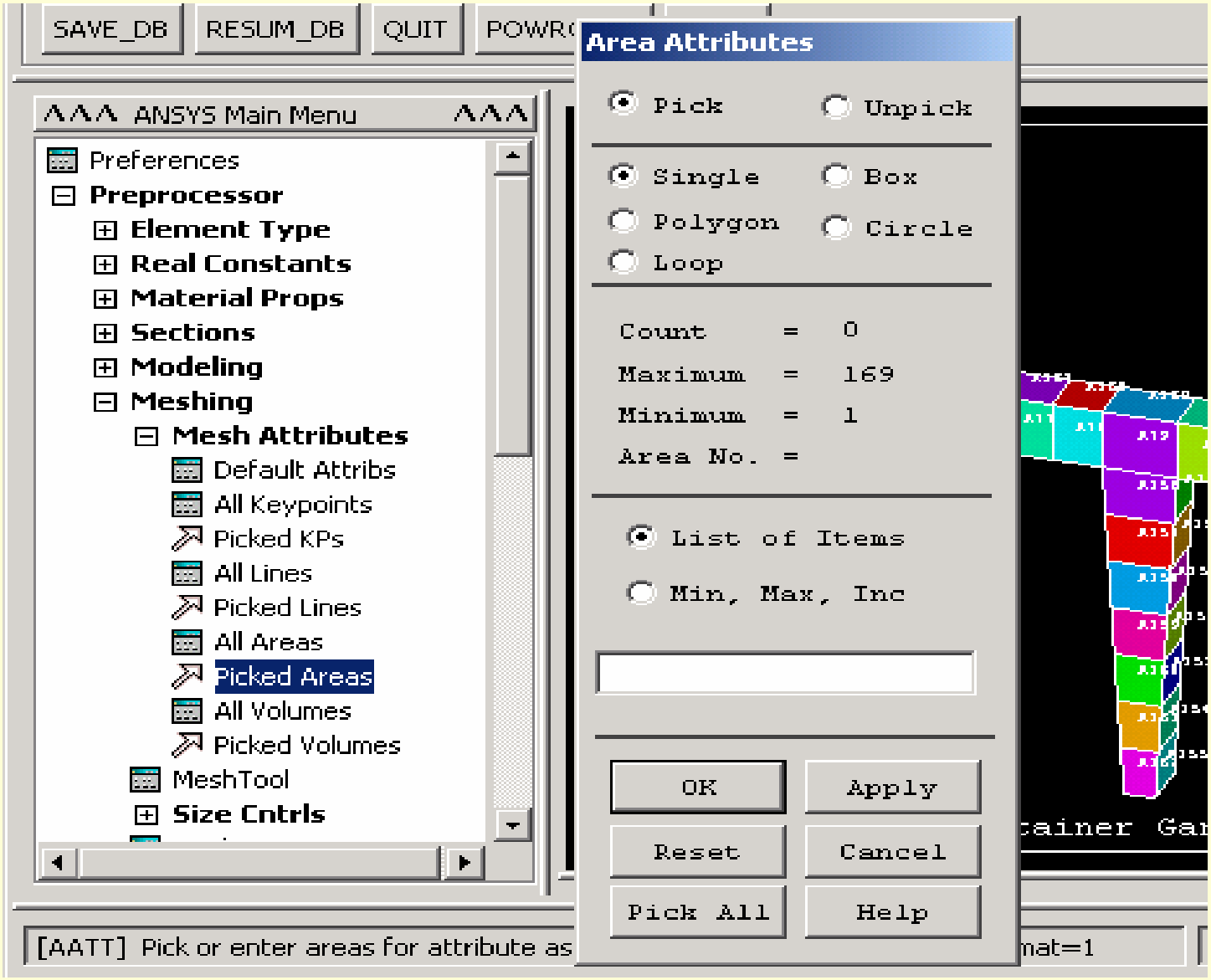


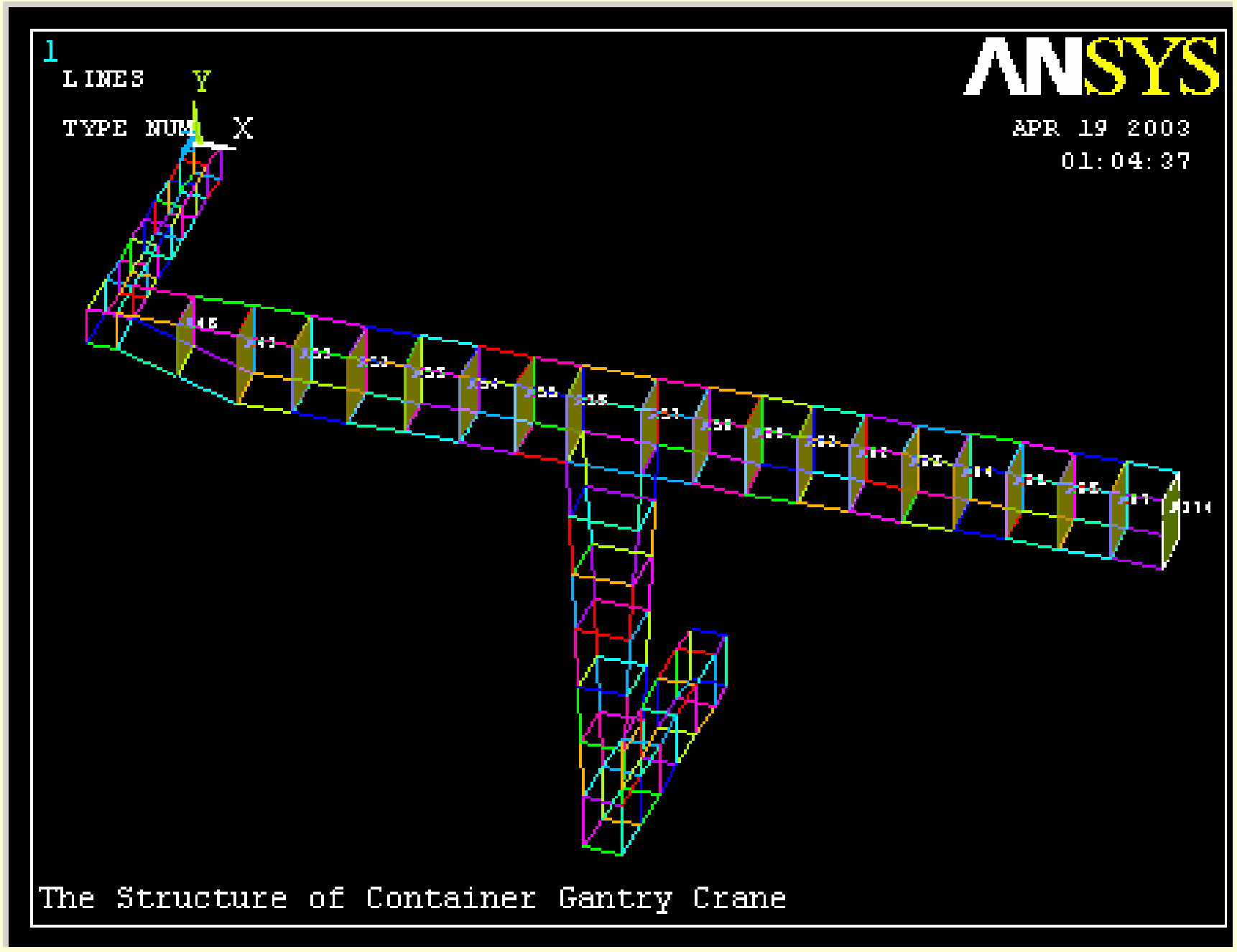


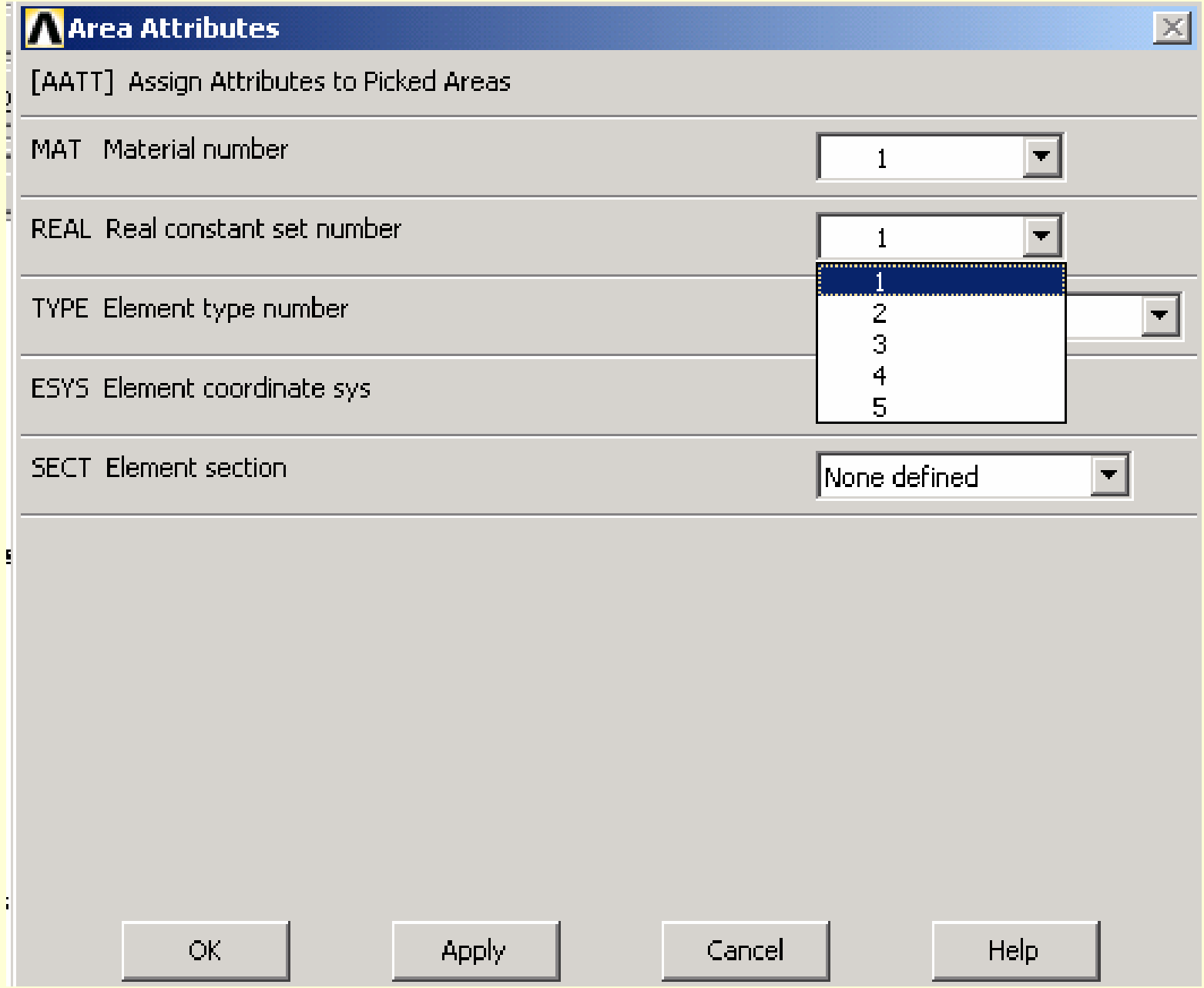




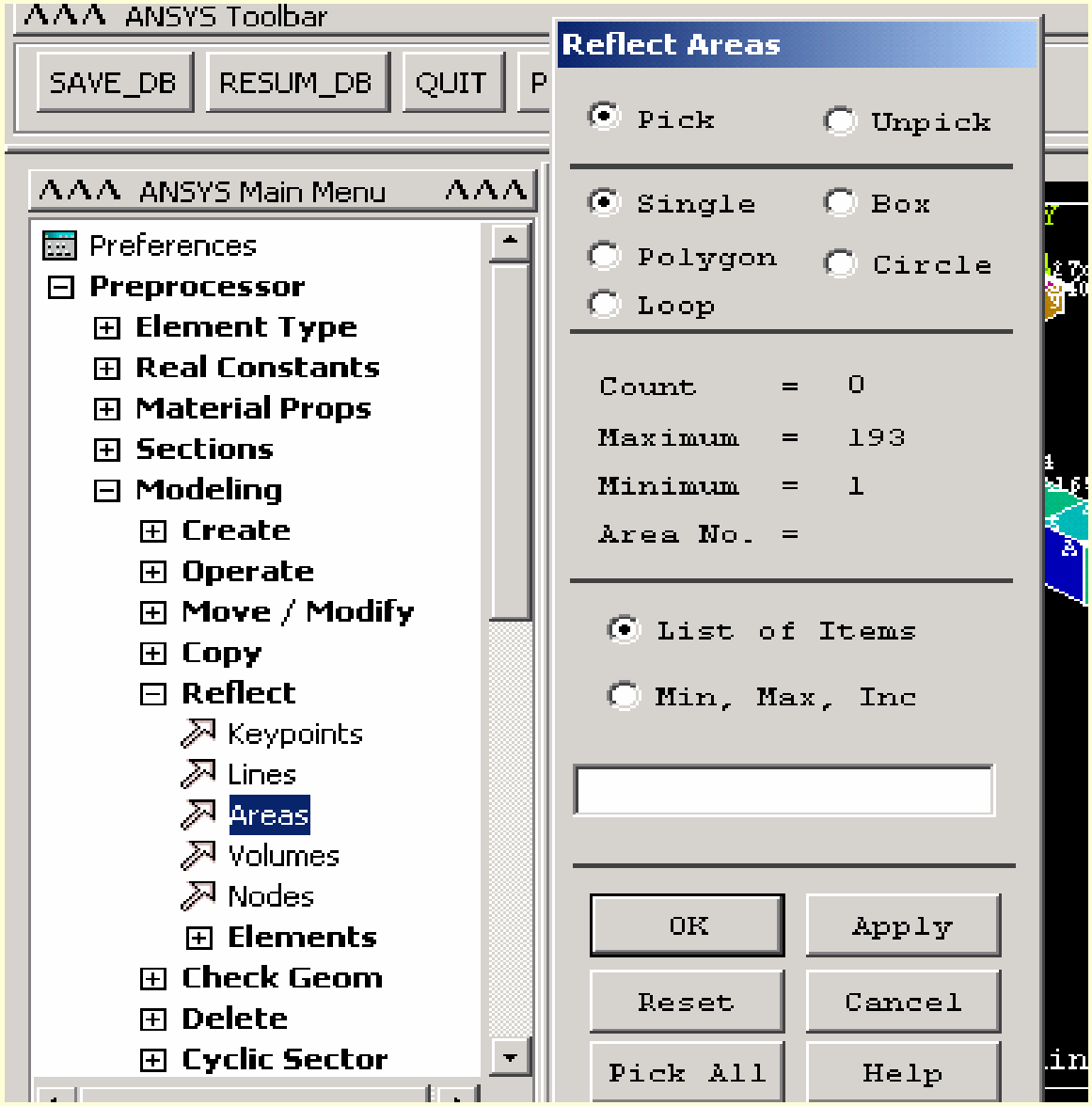
8. 设置板厚

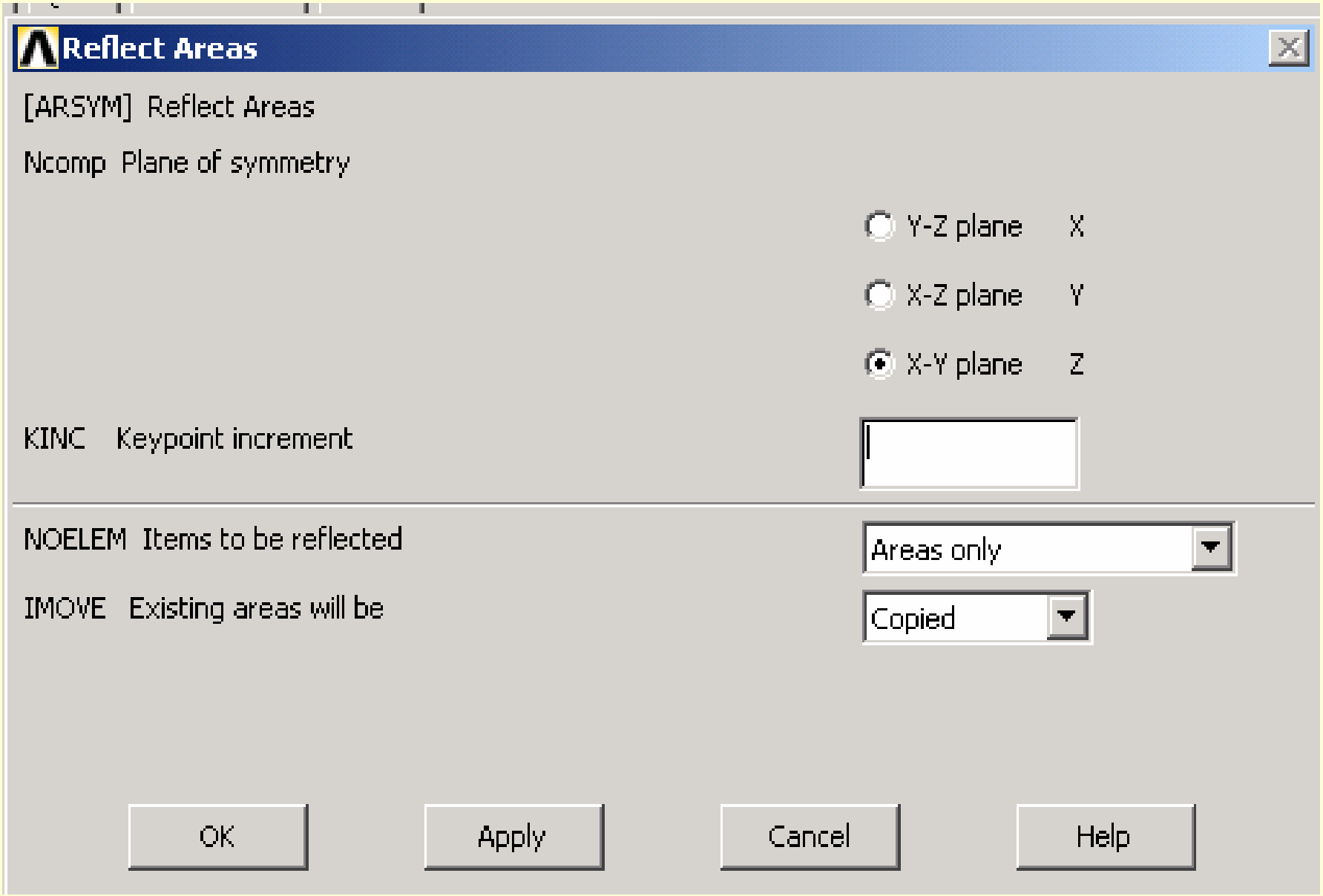


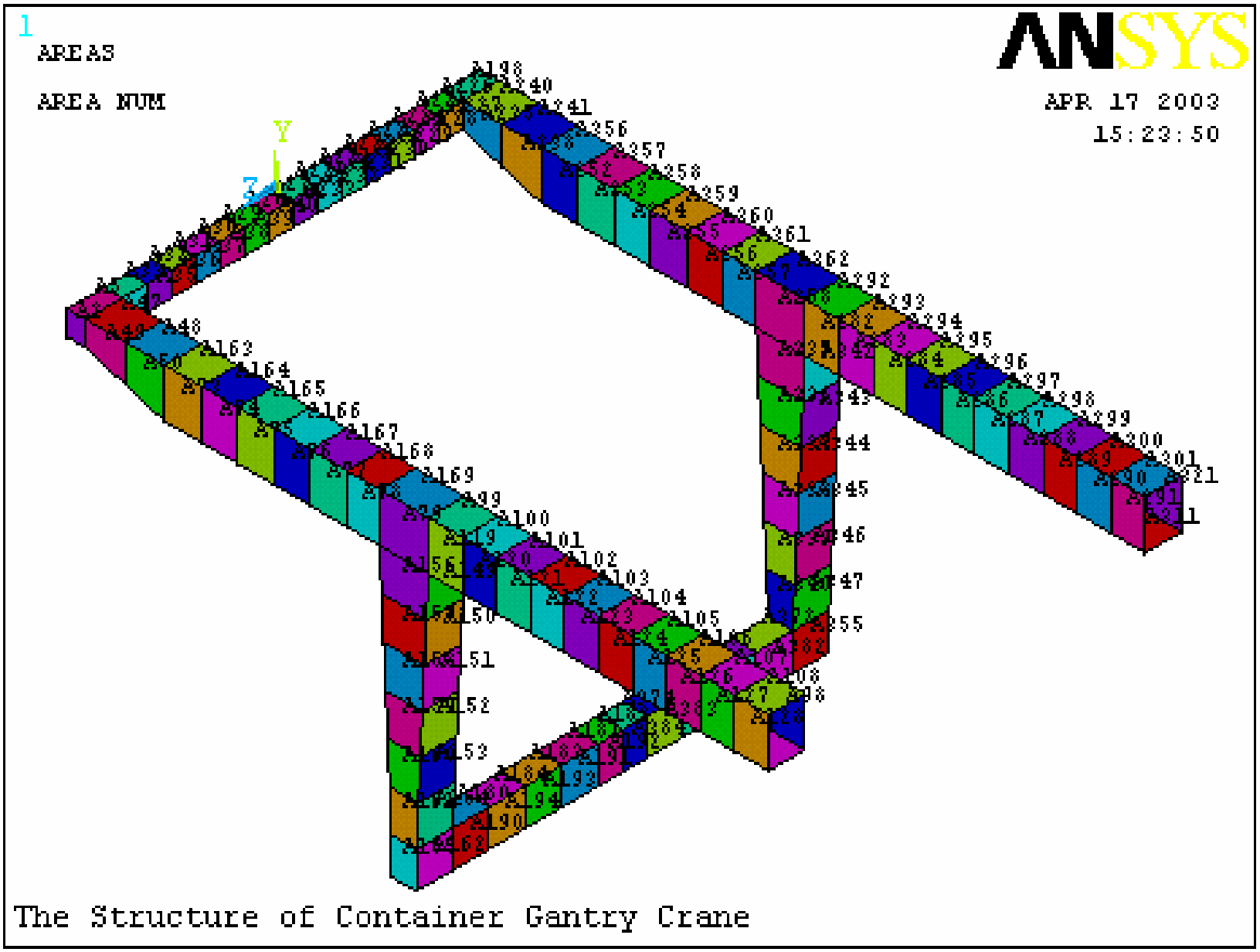




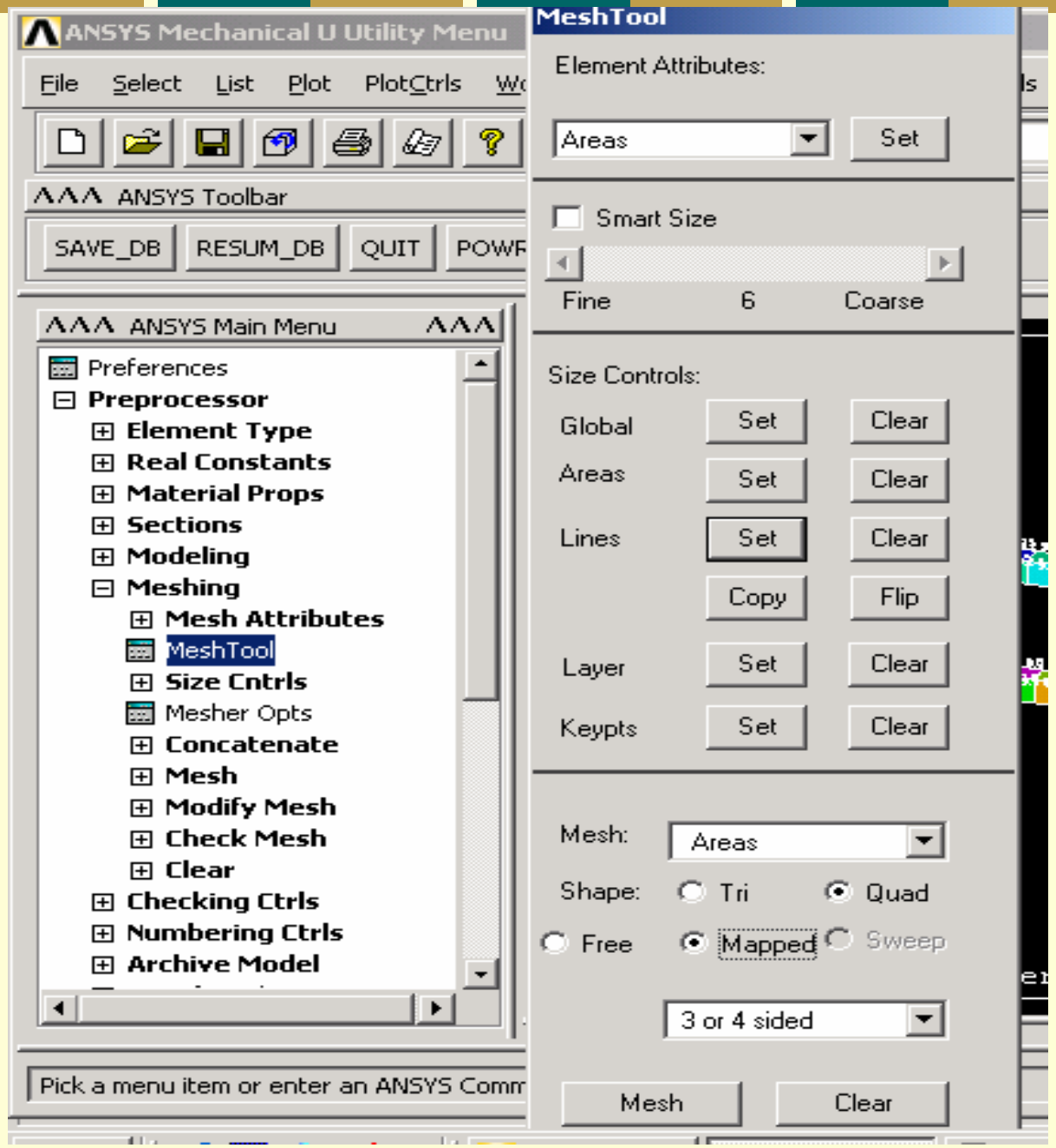
9. 创建整体结构

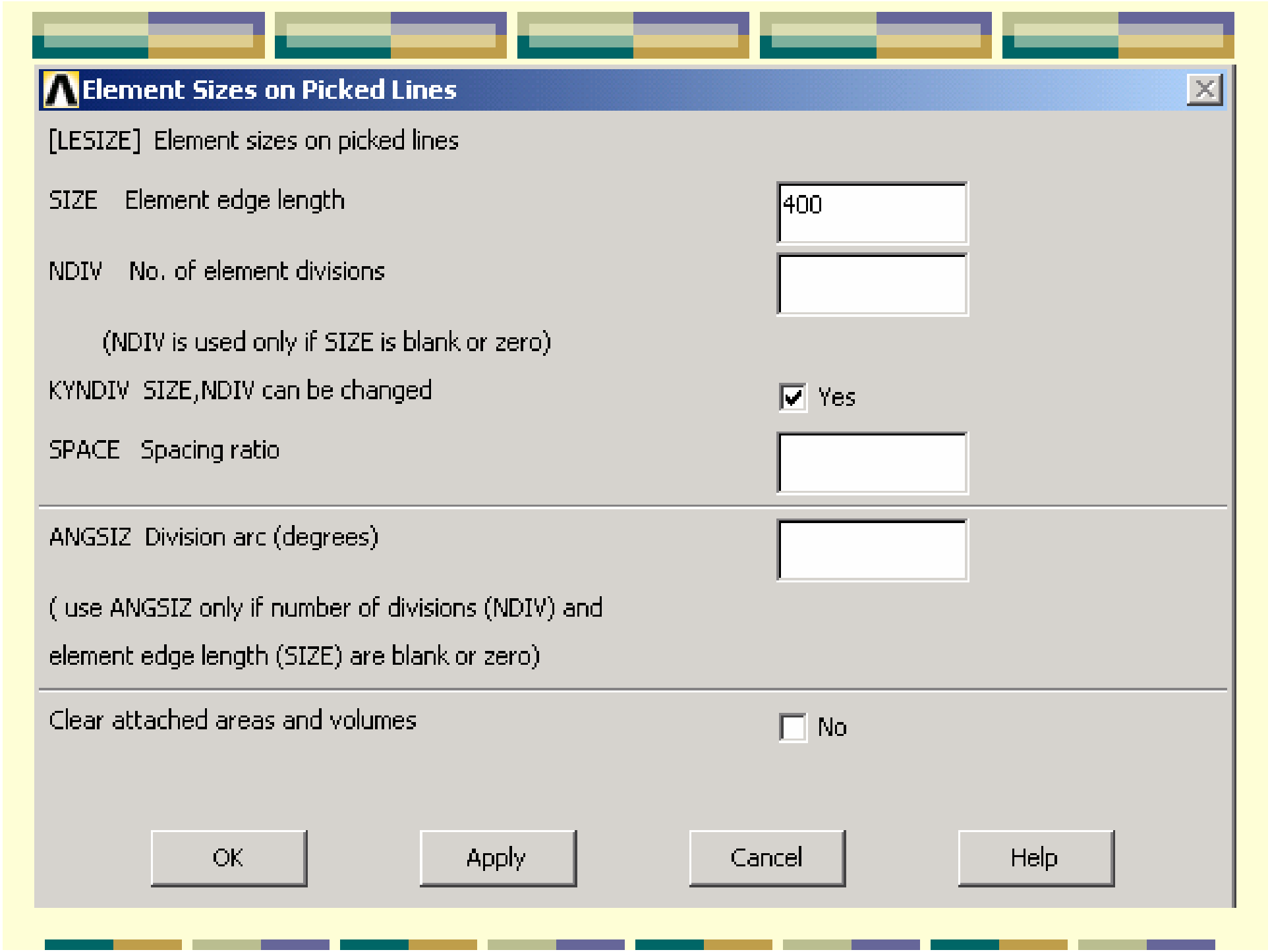


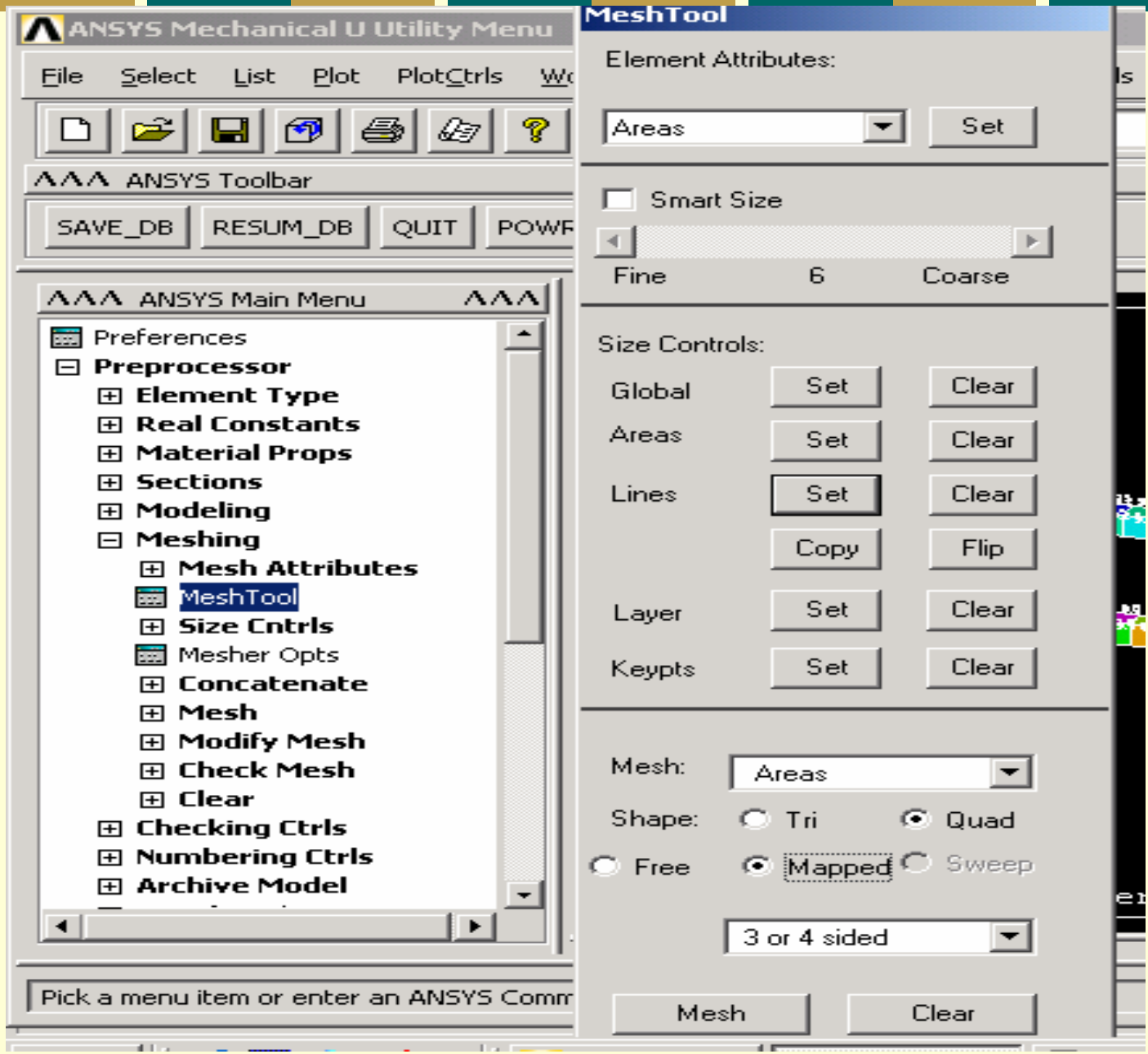


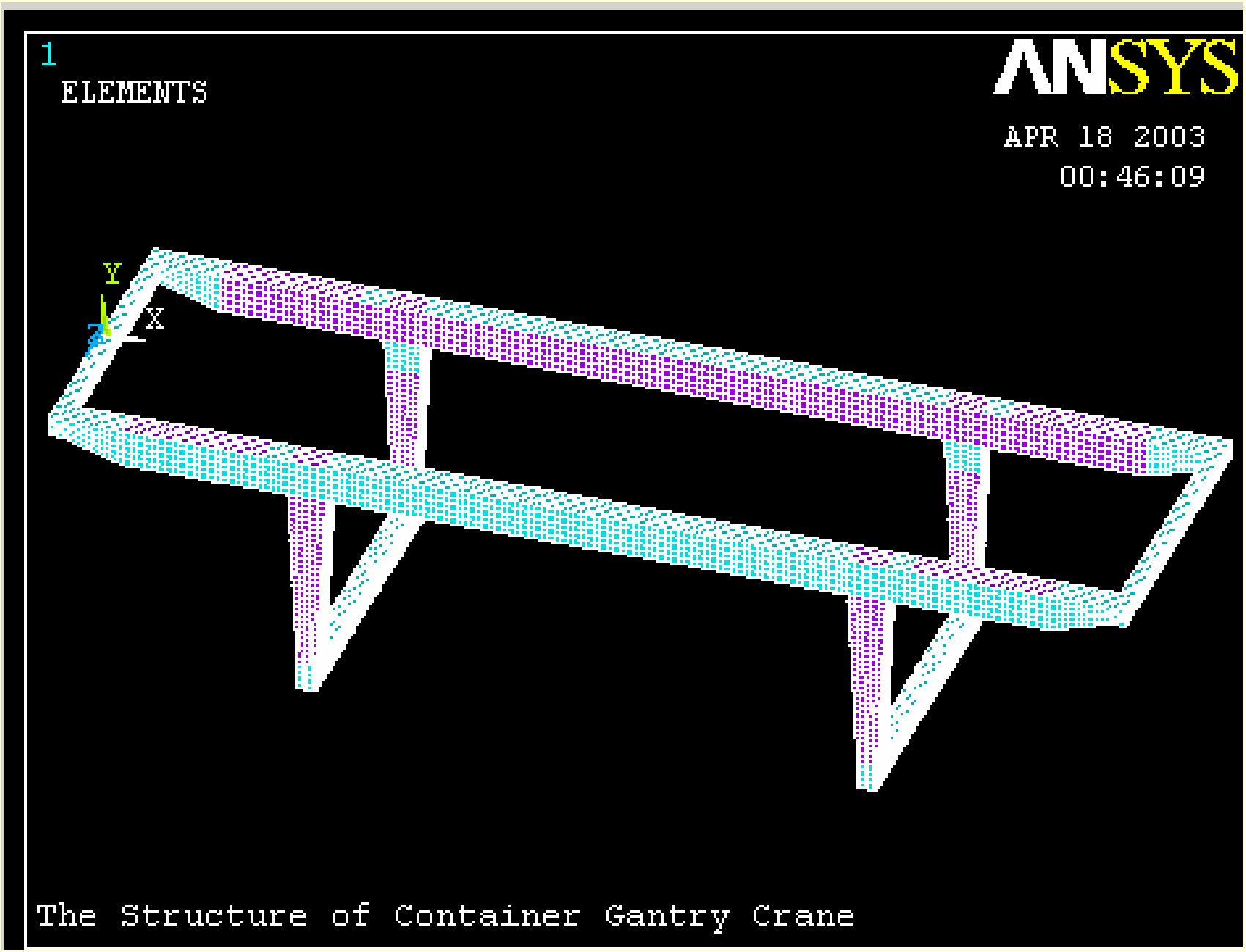


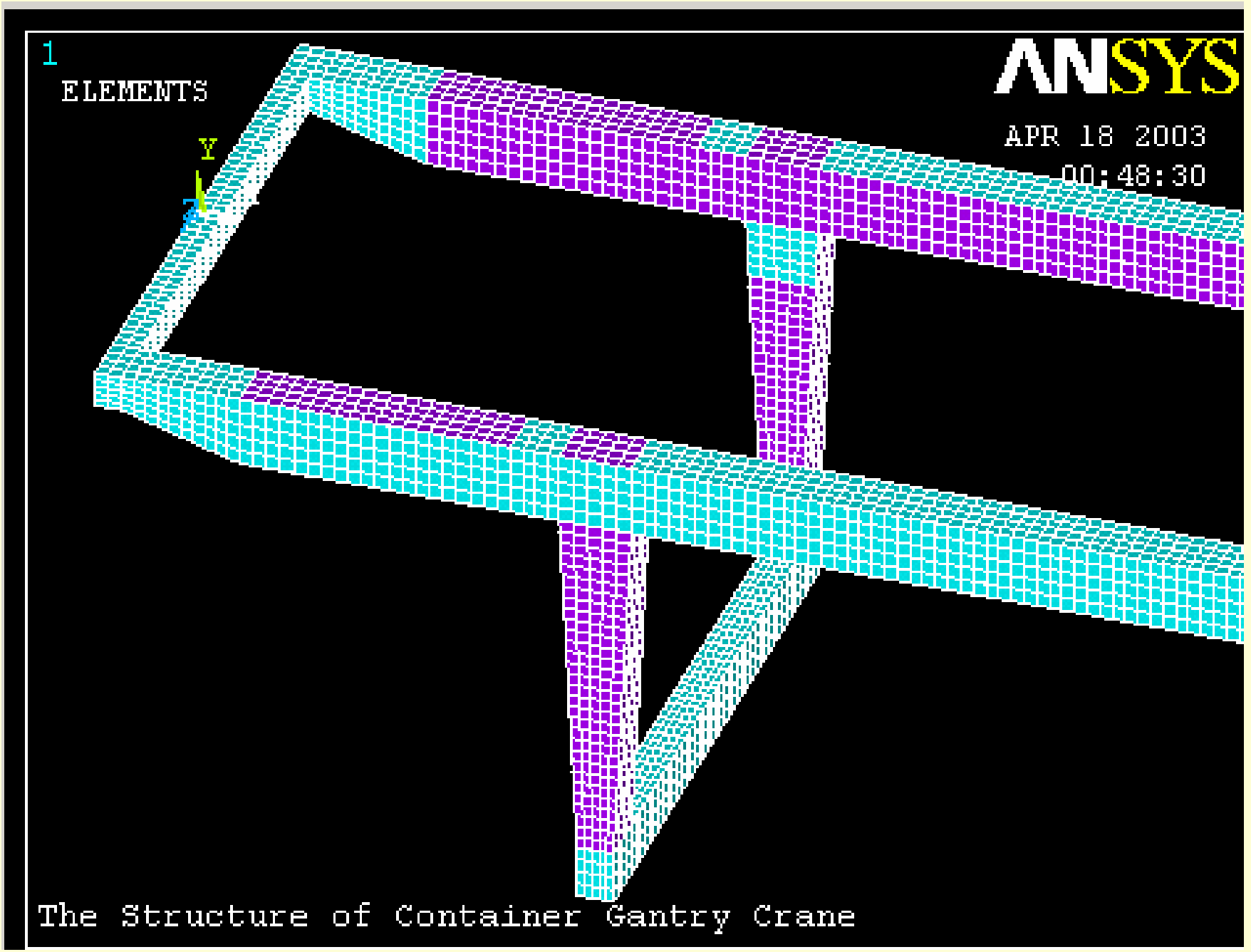
10. 划分网络

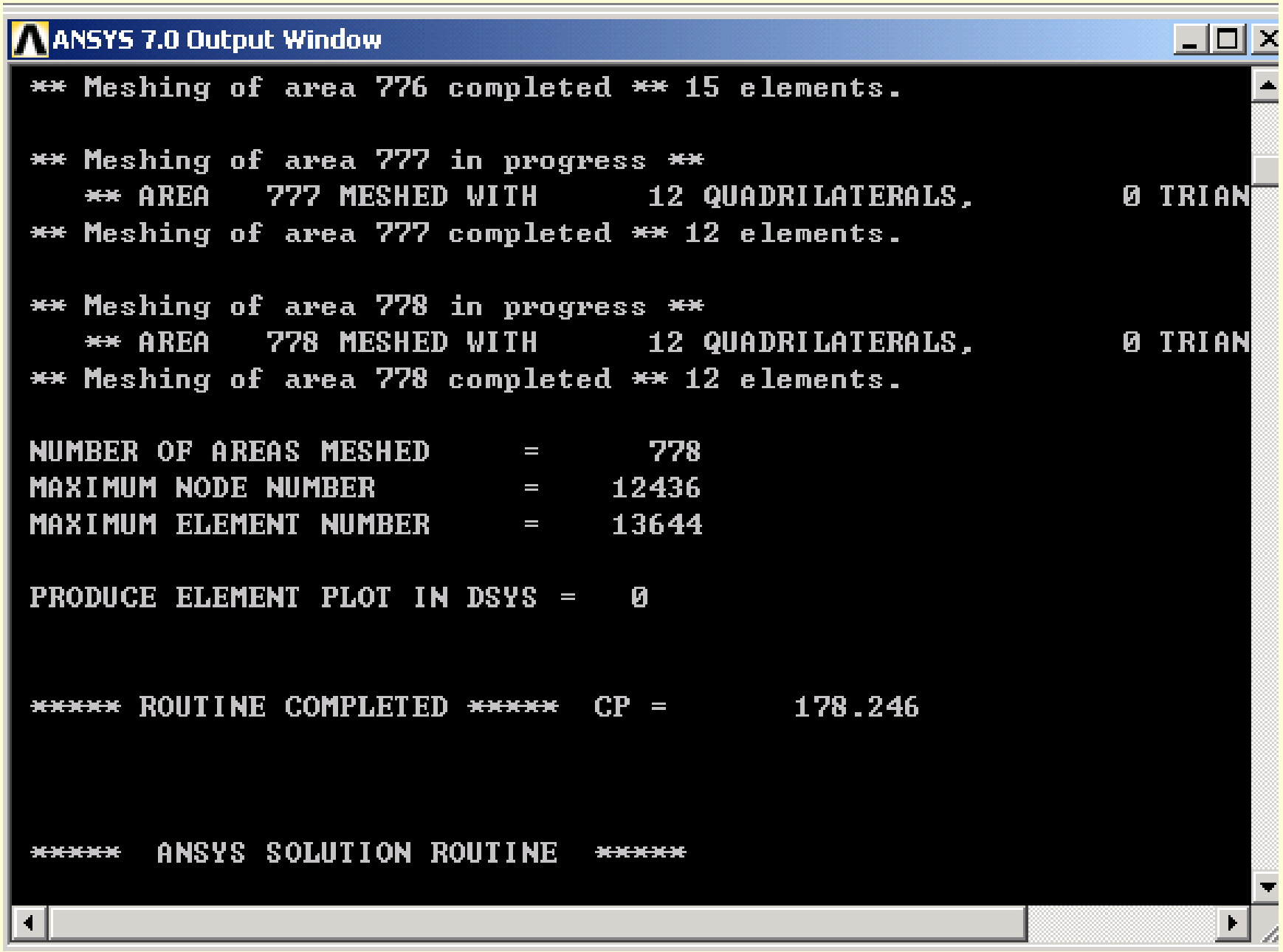




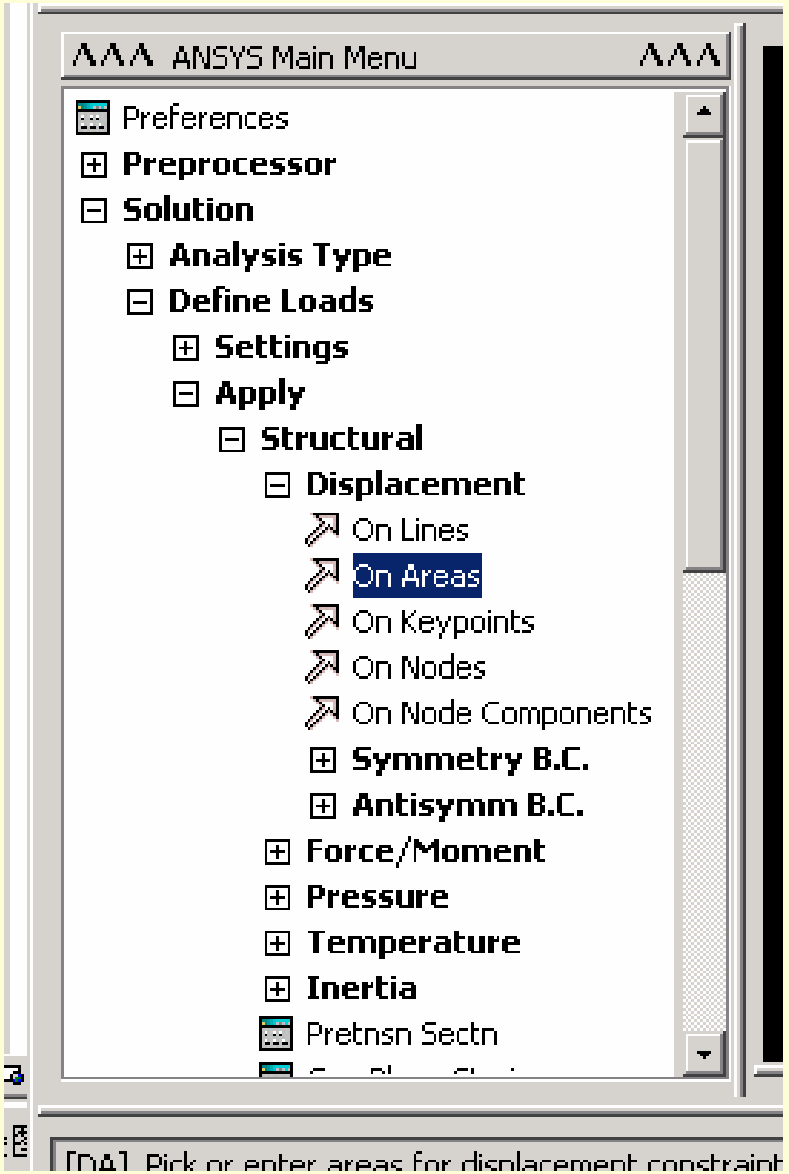


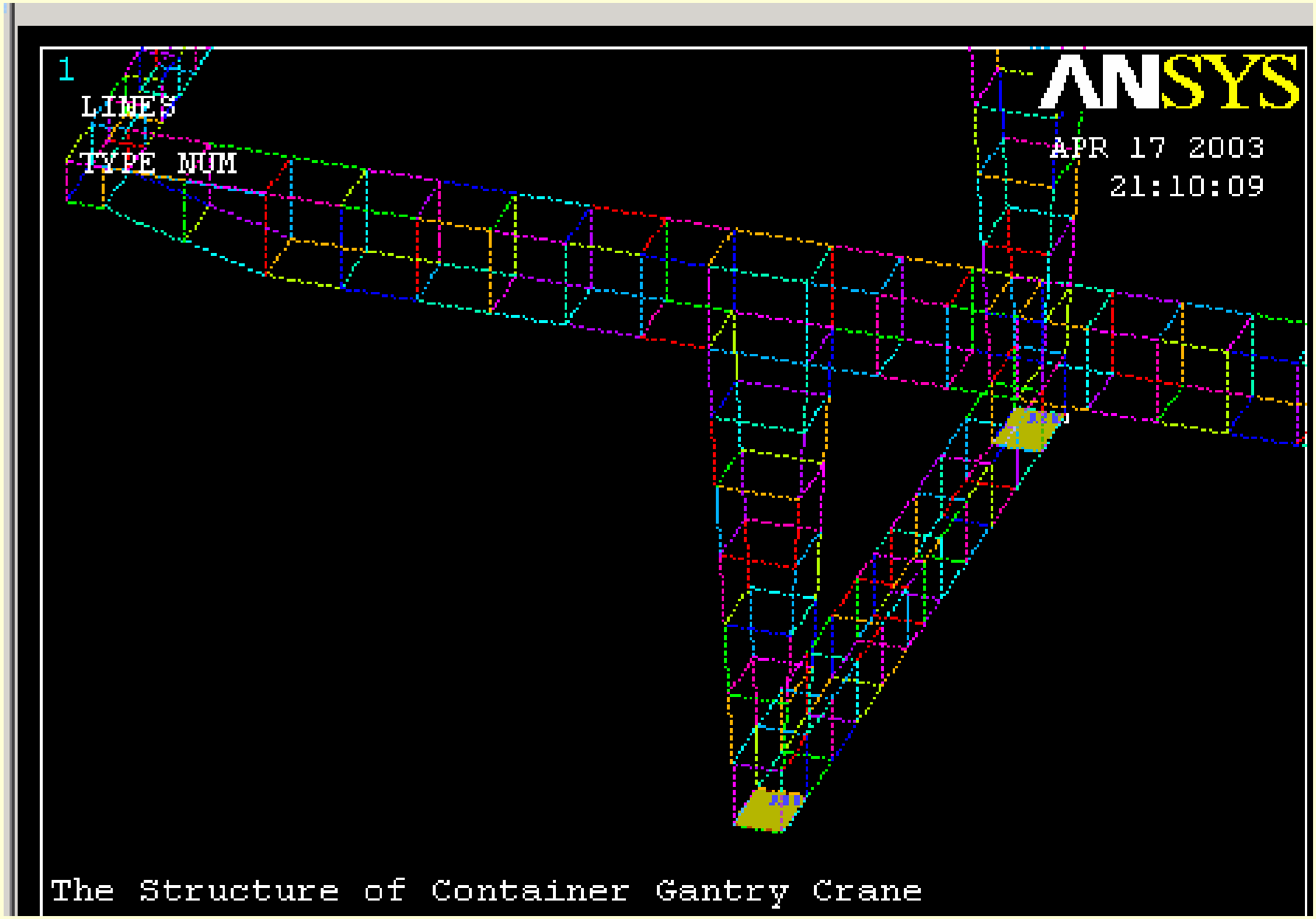


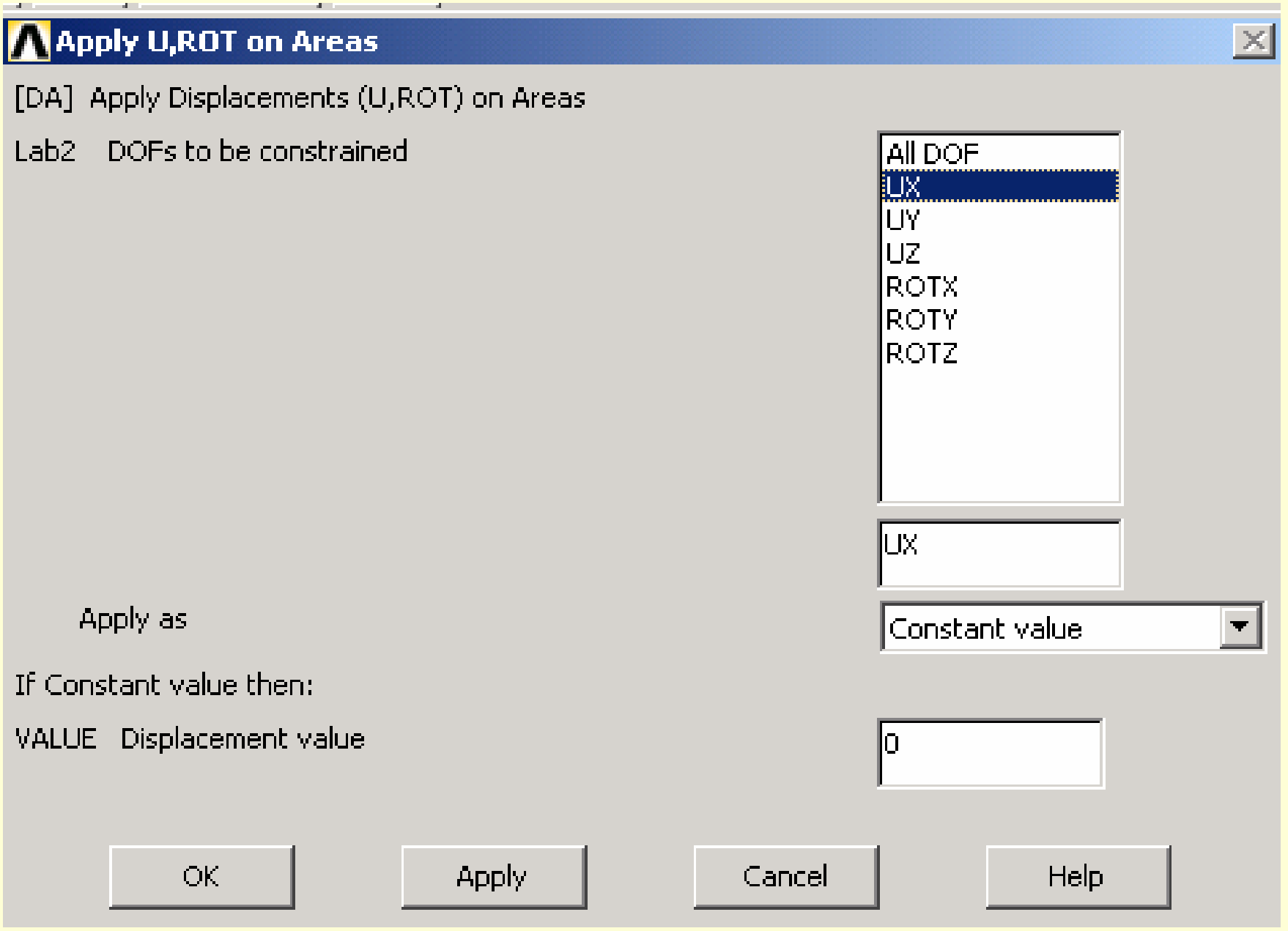


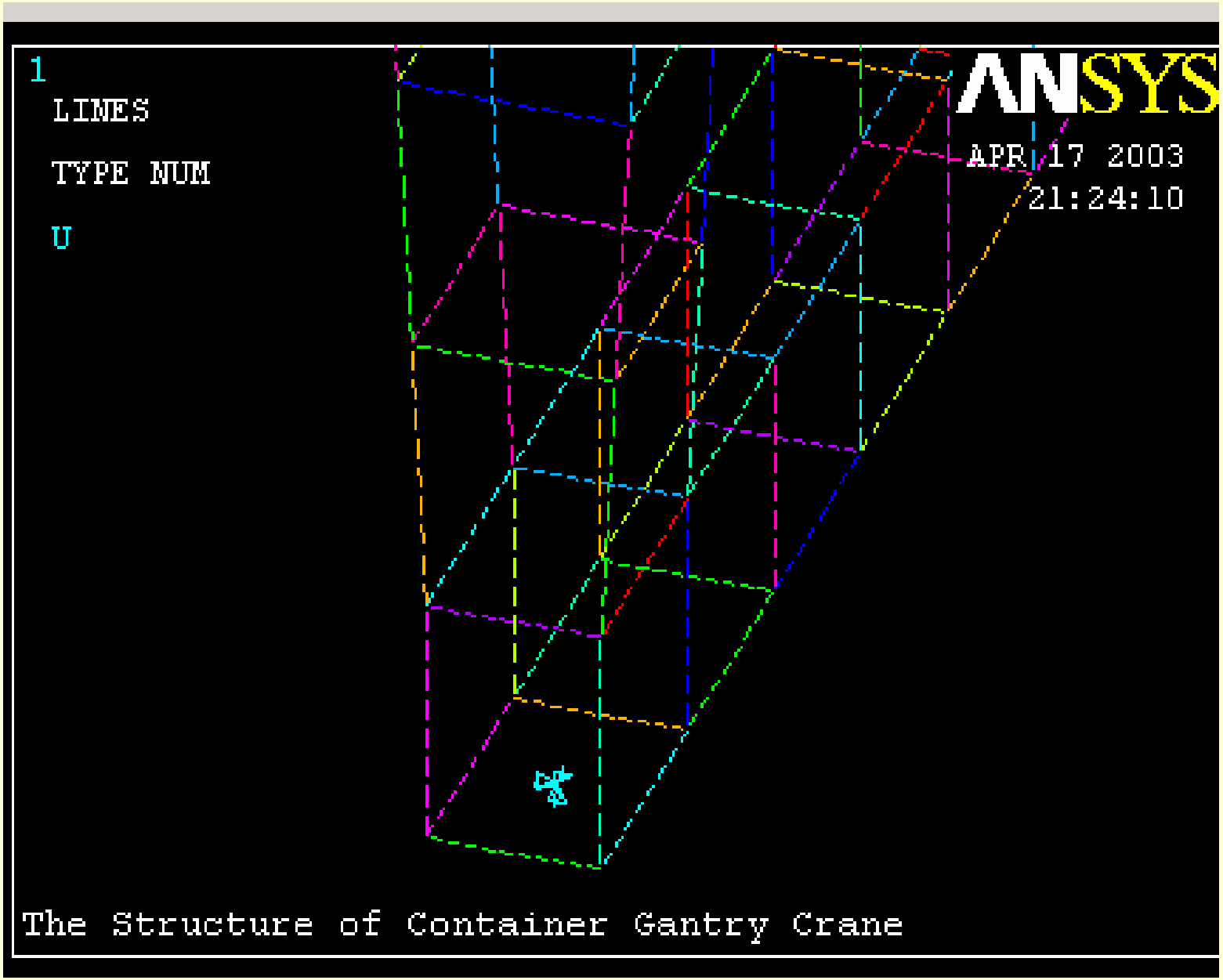


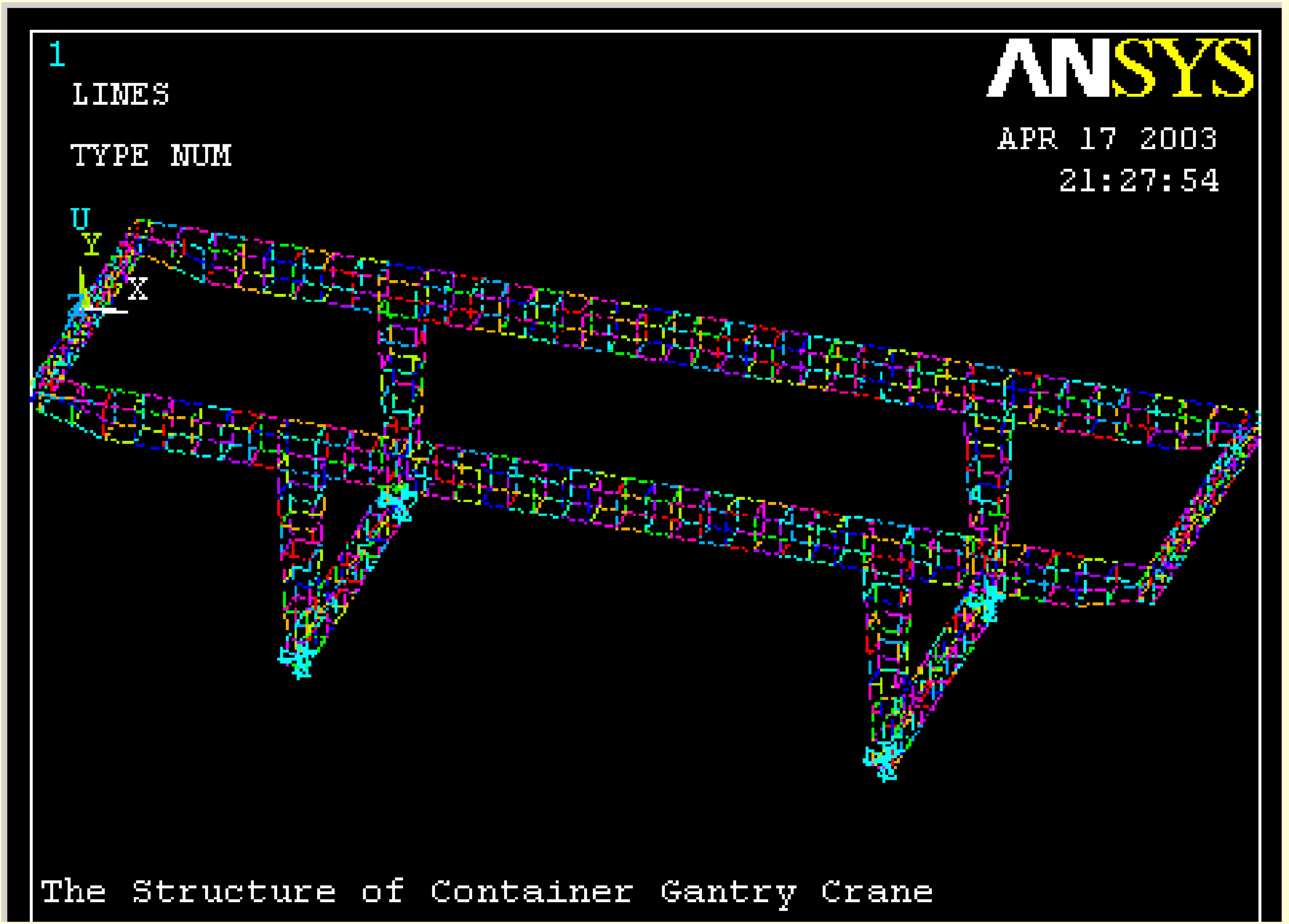
11. 施加位移边界条件



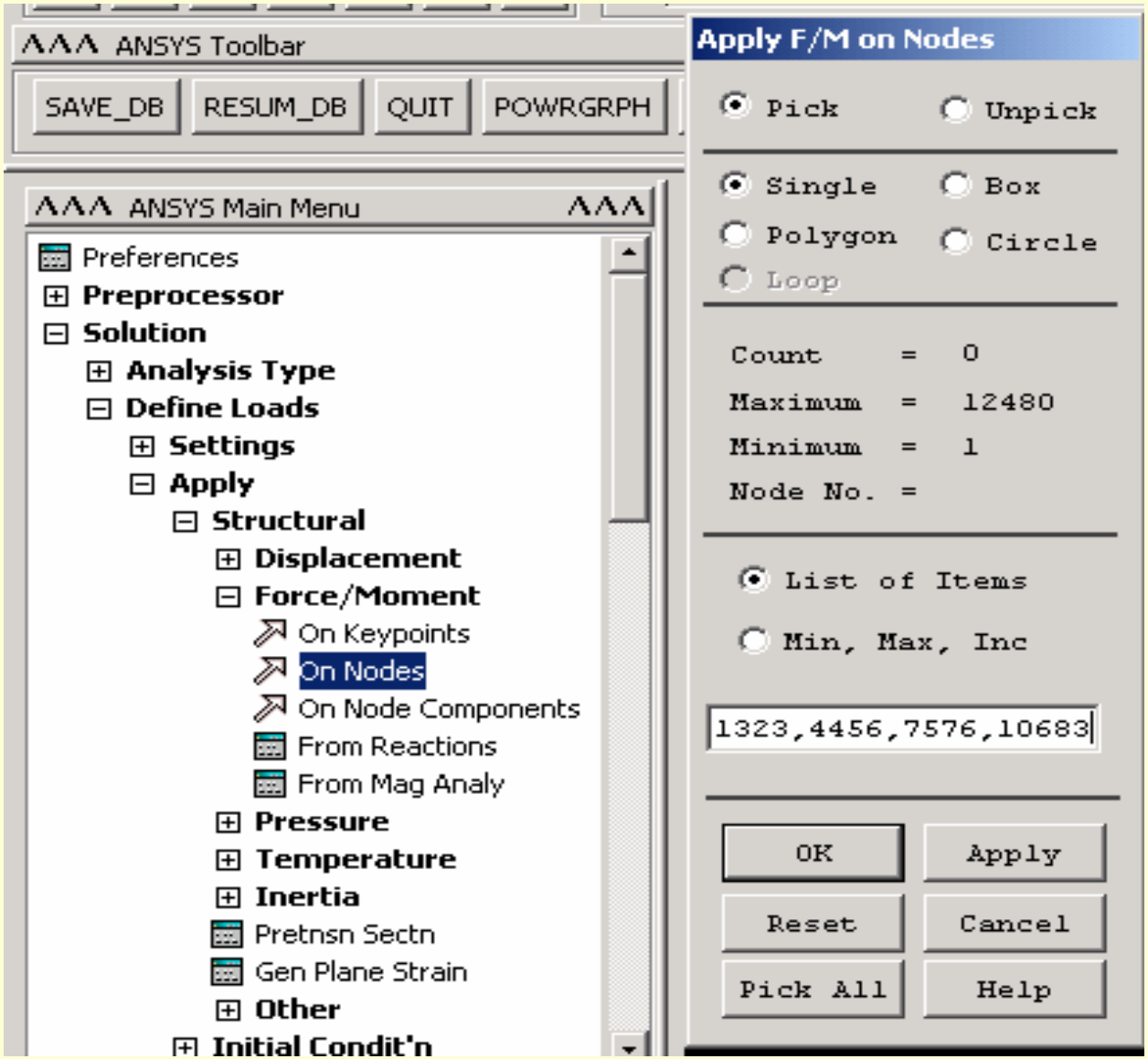


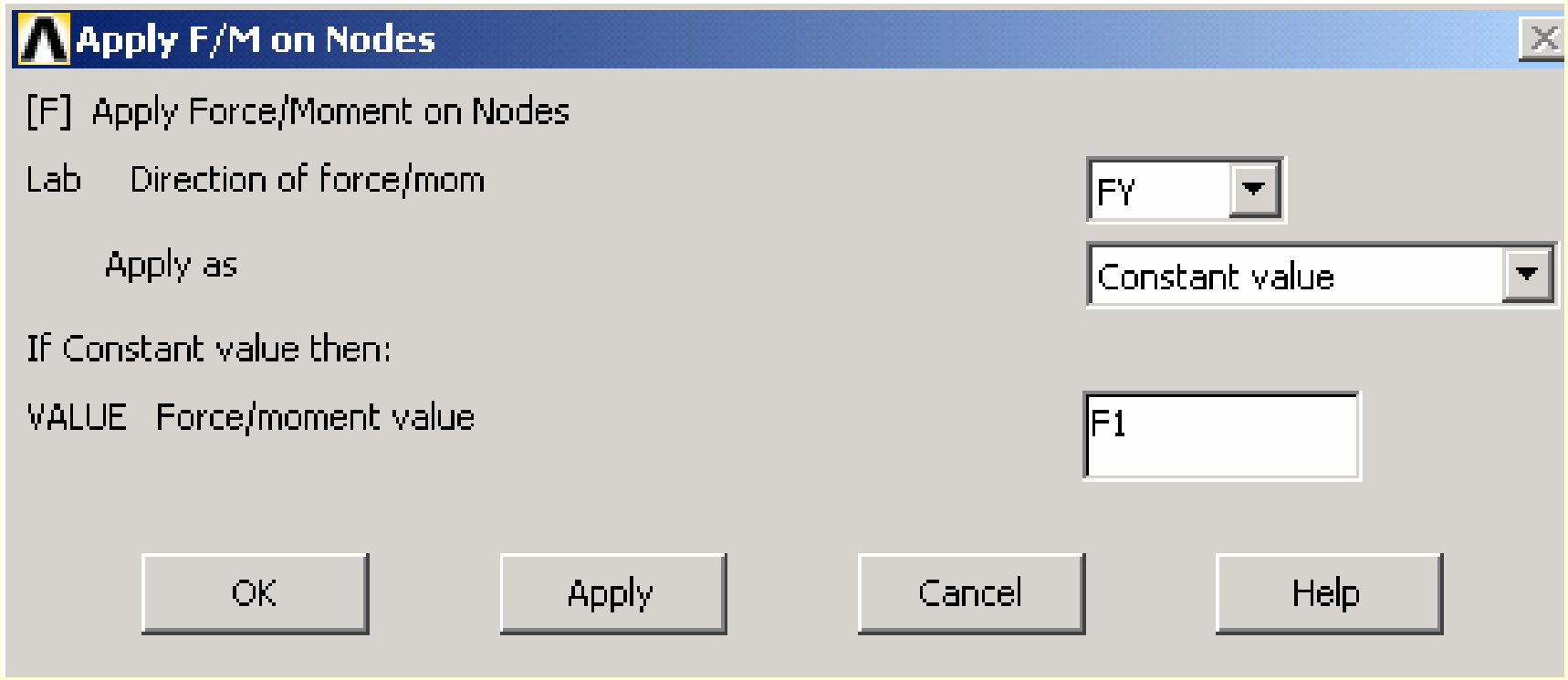


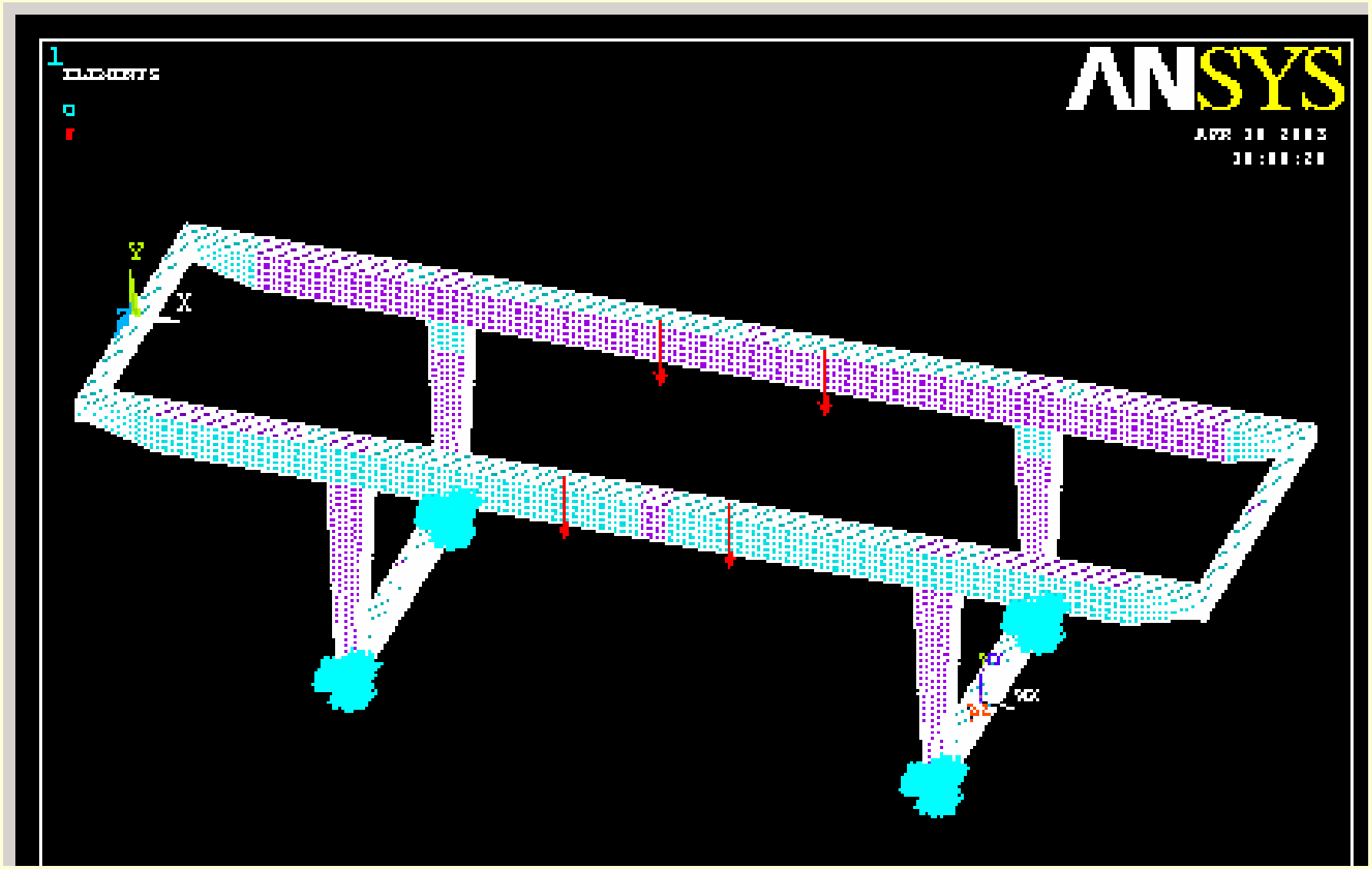




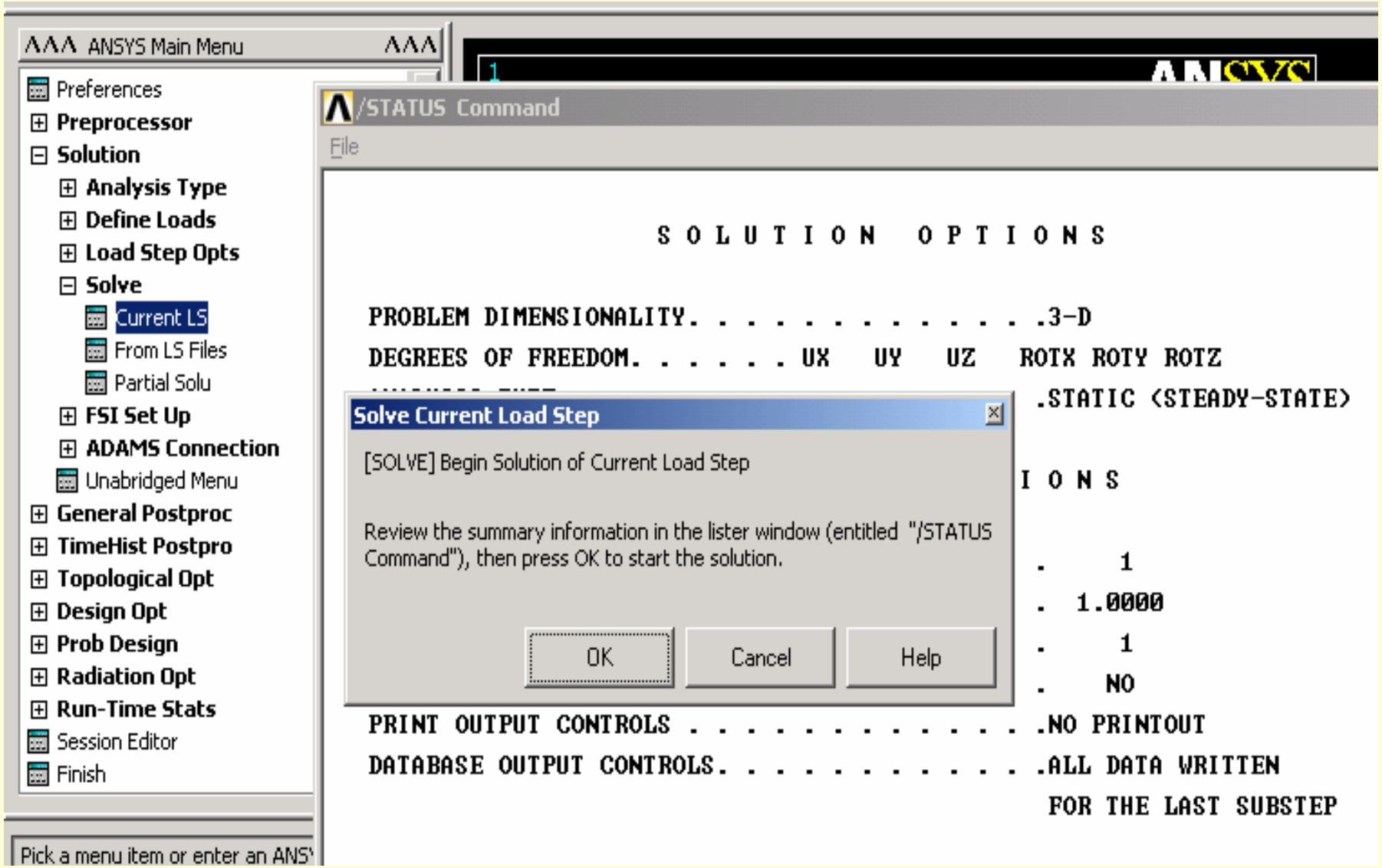
12. 施加载荷







13. 求解

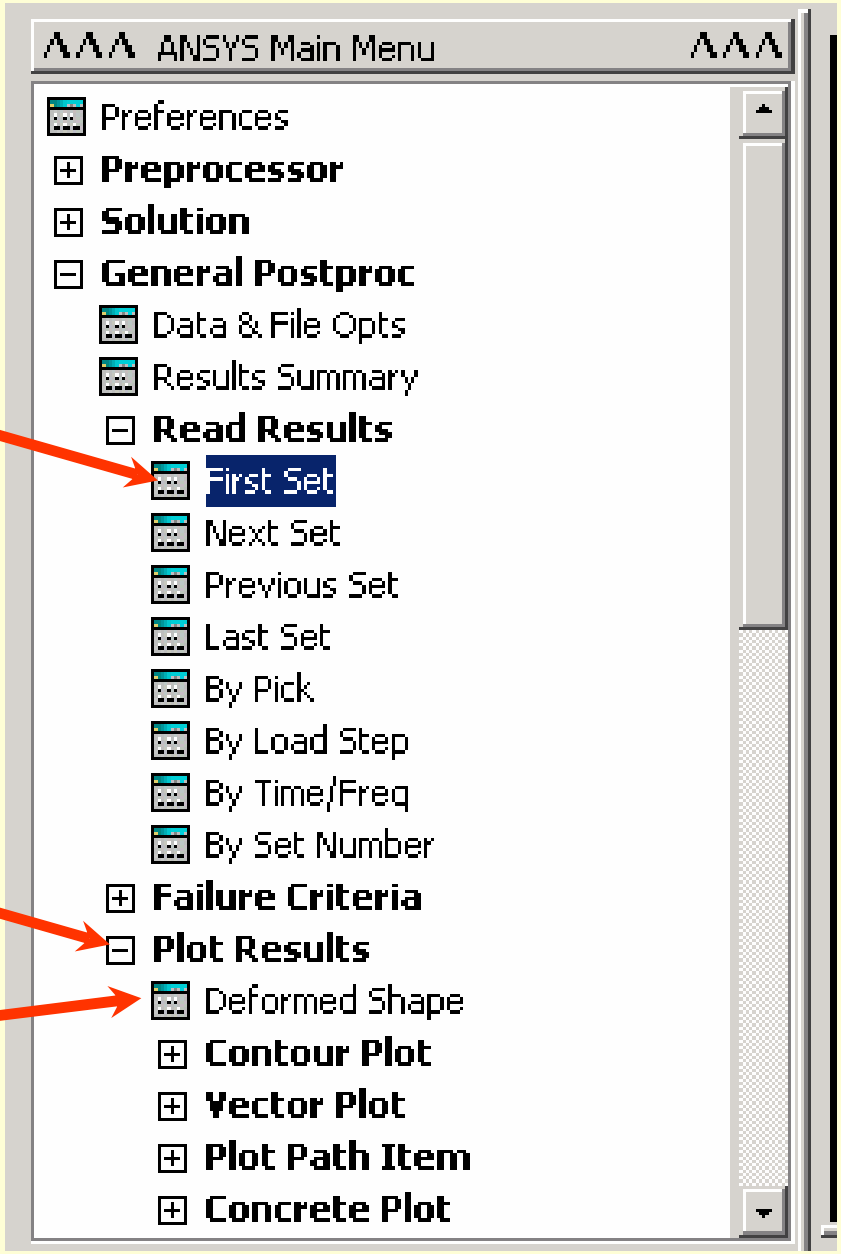


14. 图形显示计算结果

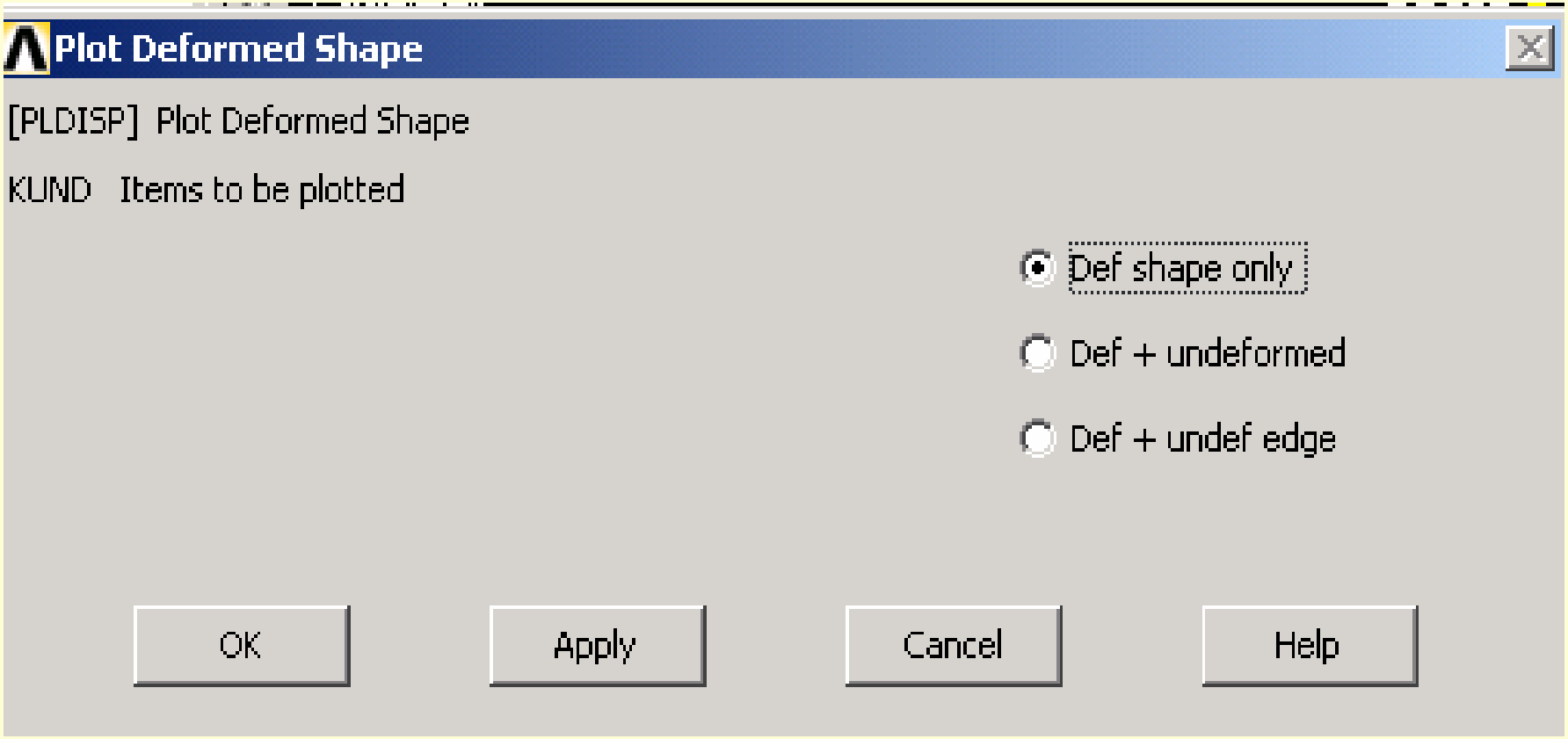
读入计算结果

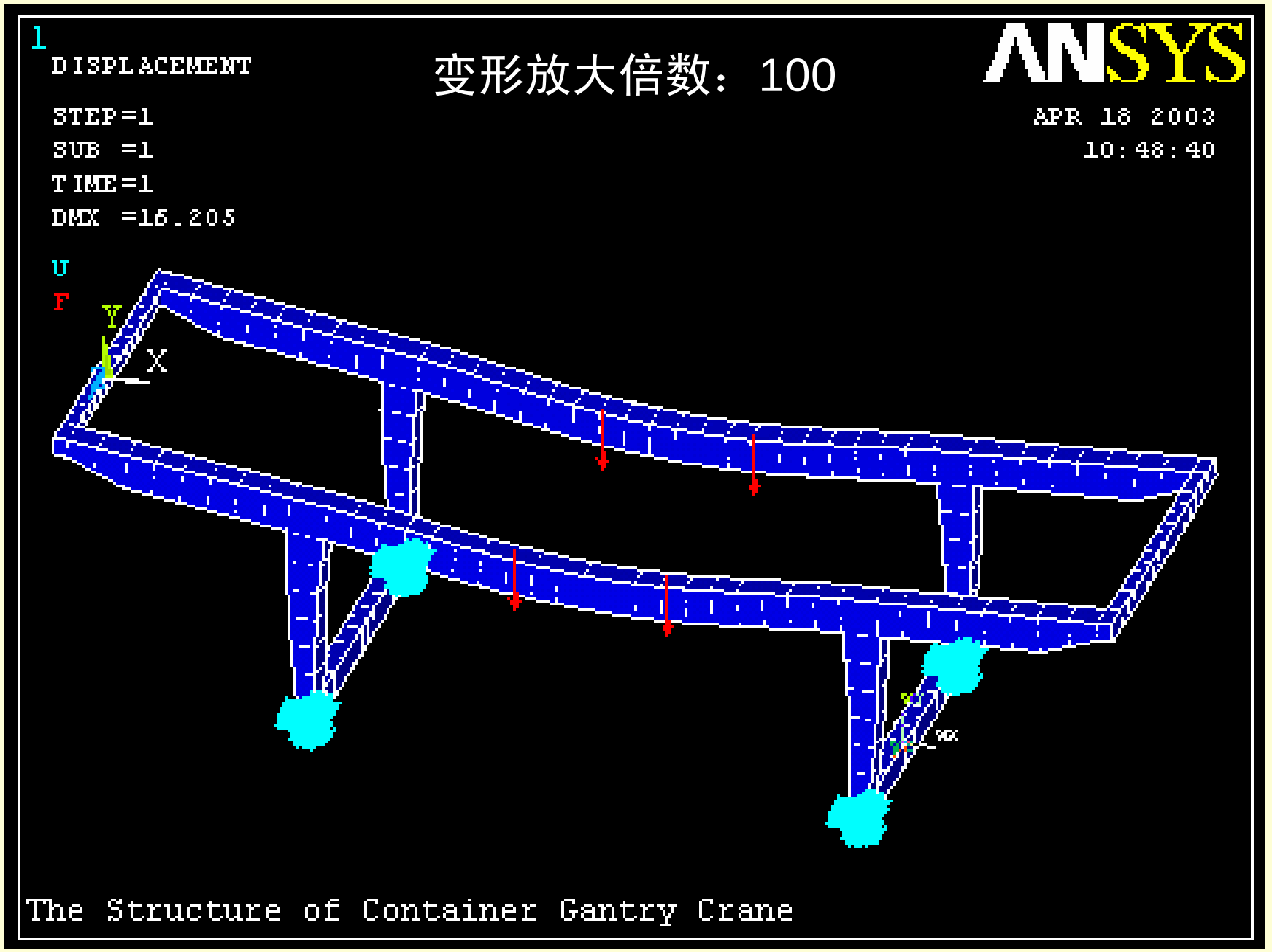
图形显示计算结果

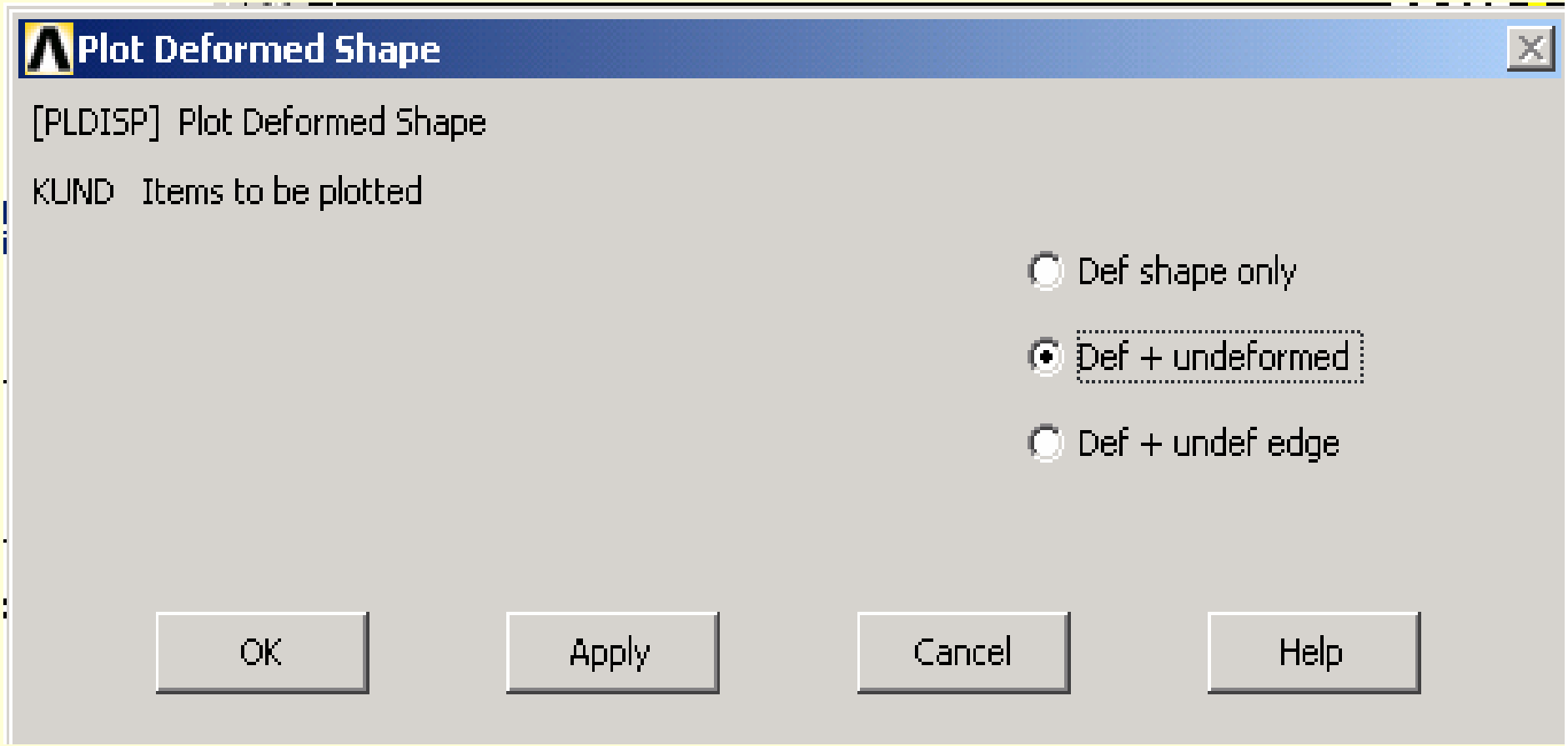
变形后的图形显示

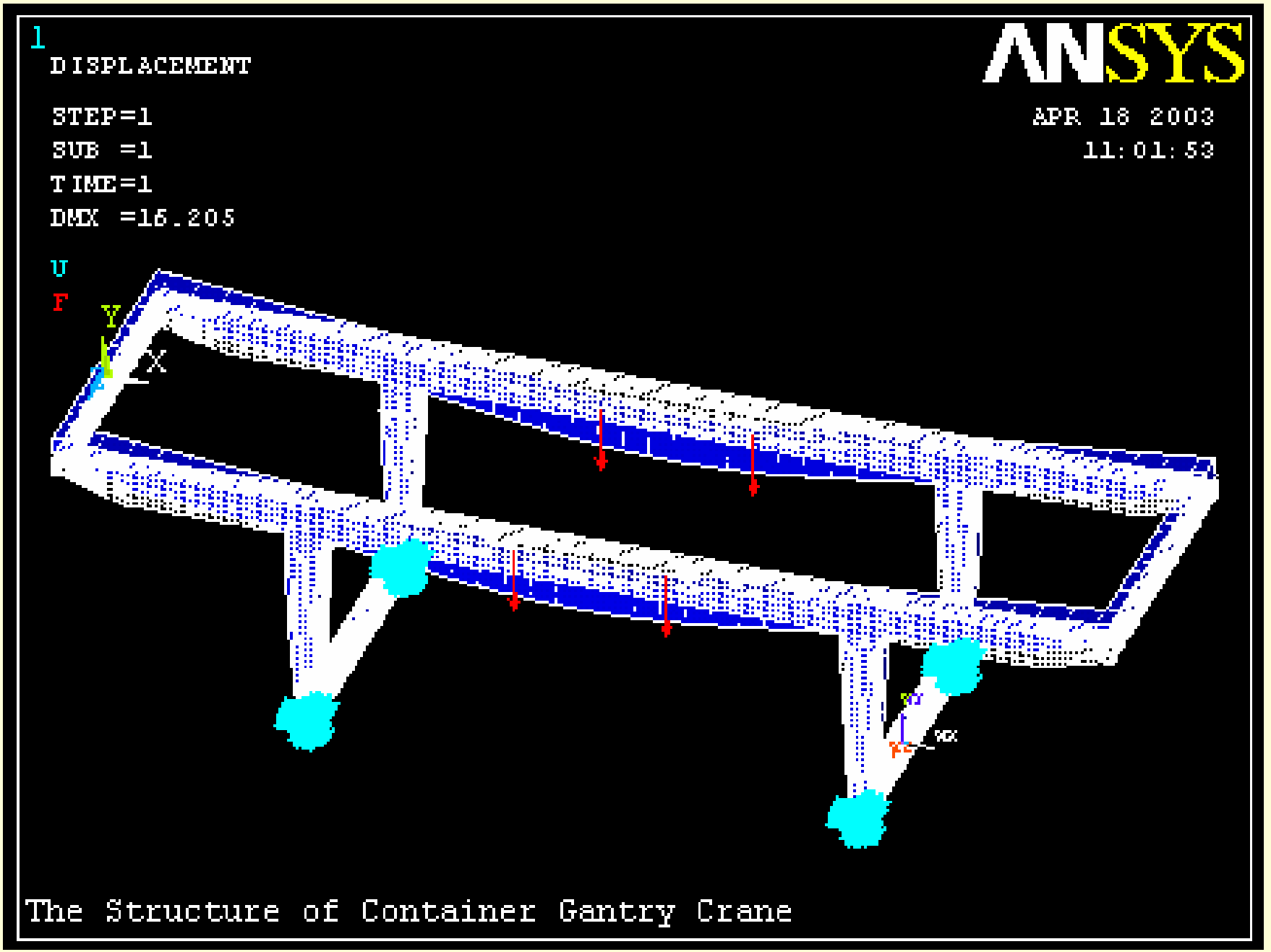


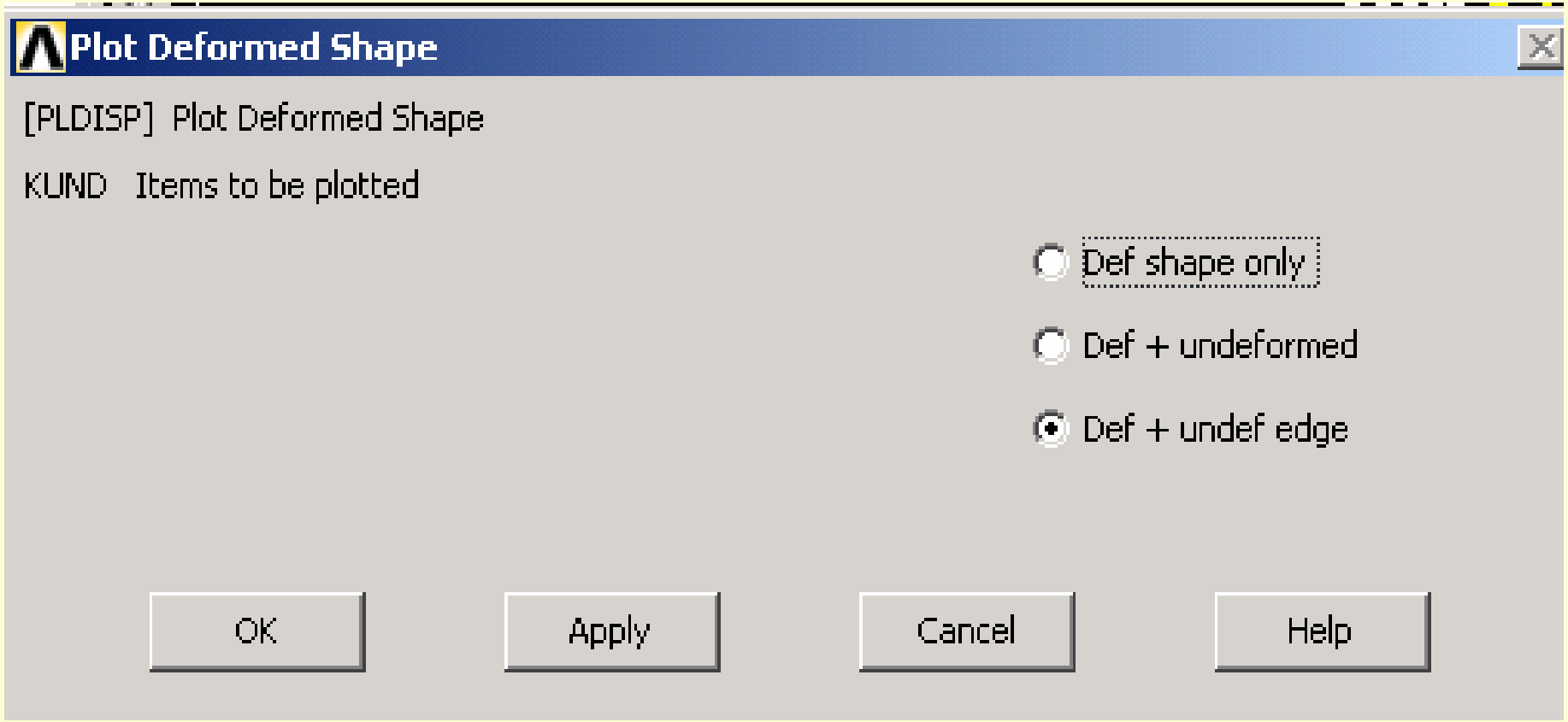
(1) 变形后的图形显示

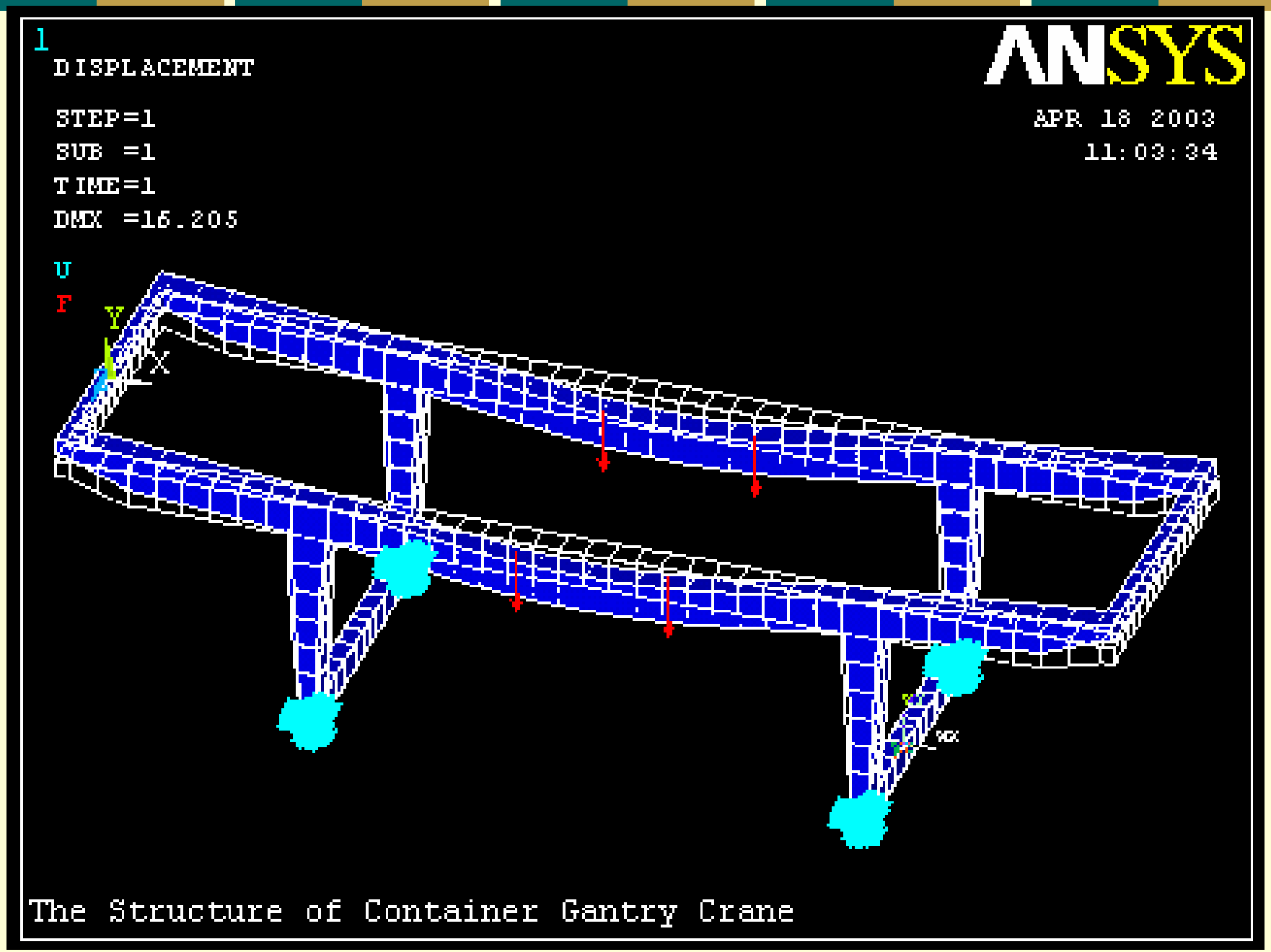










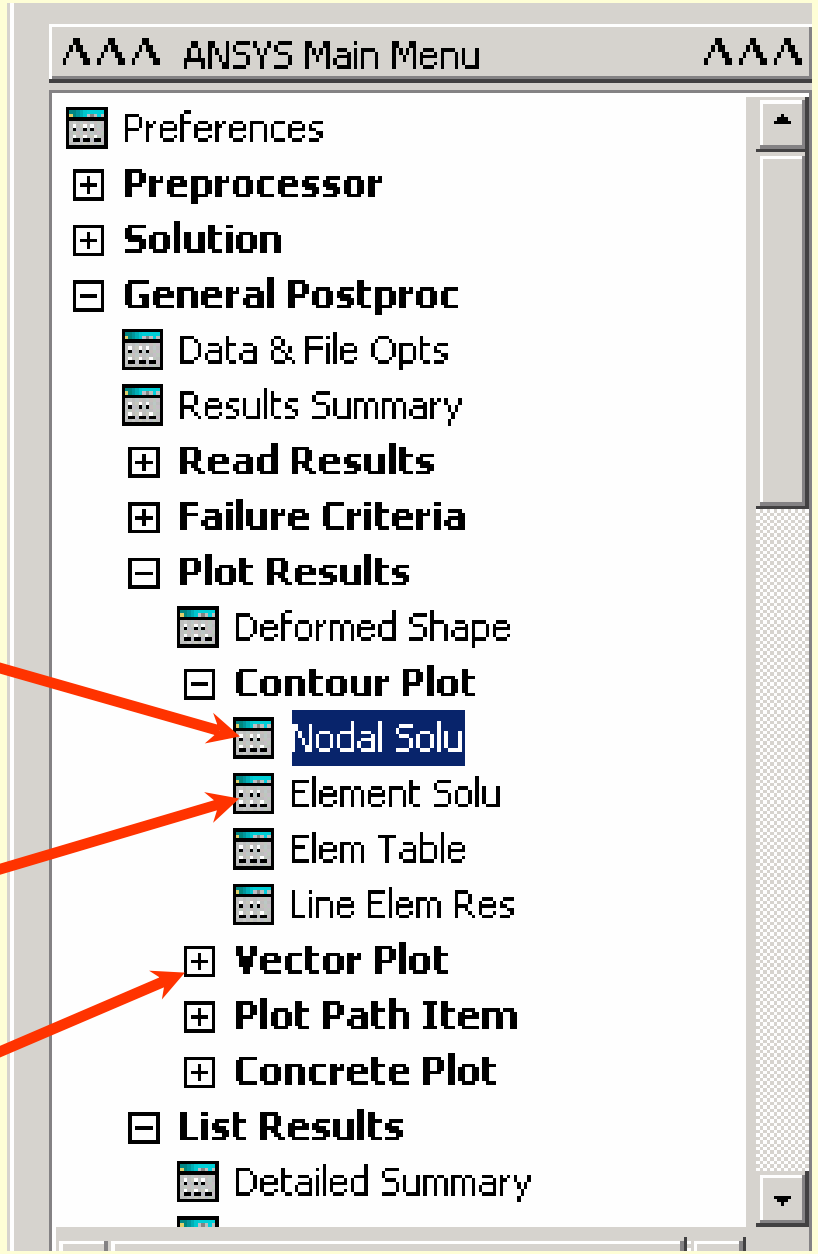


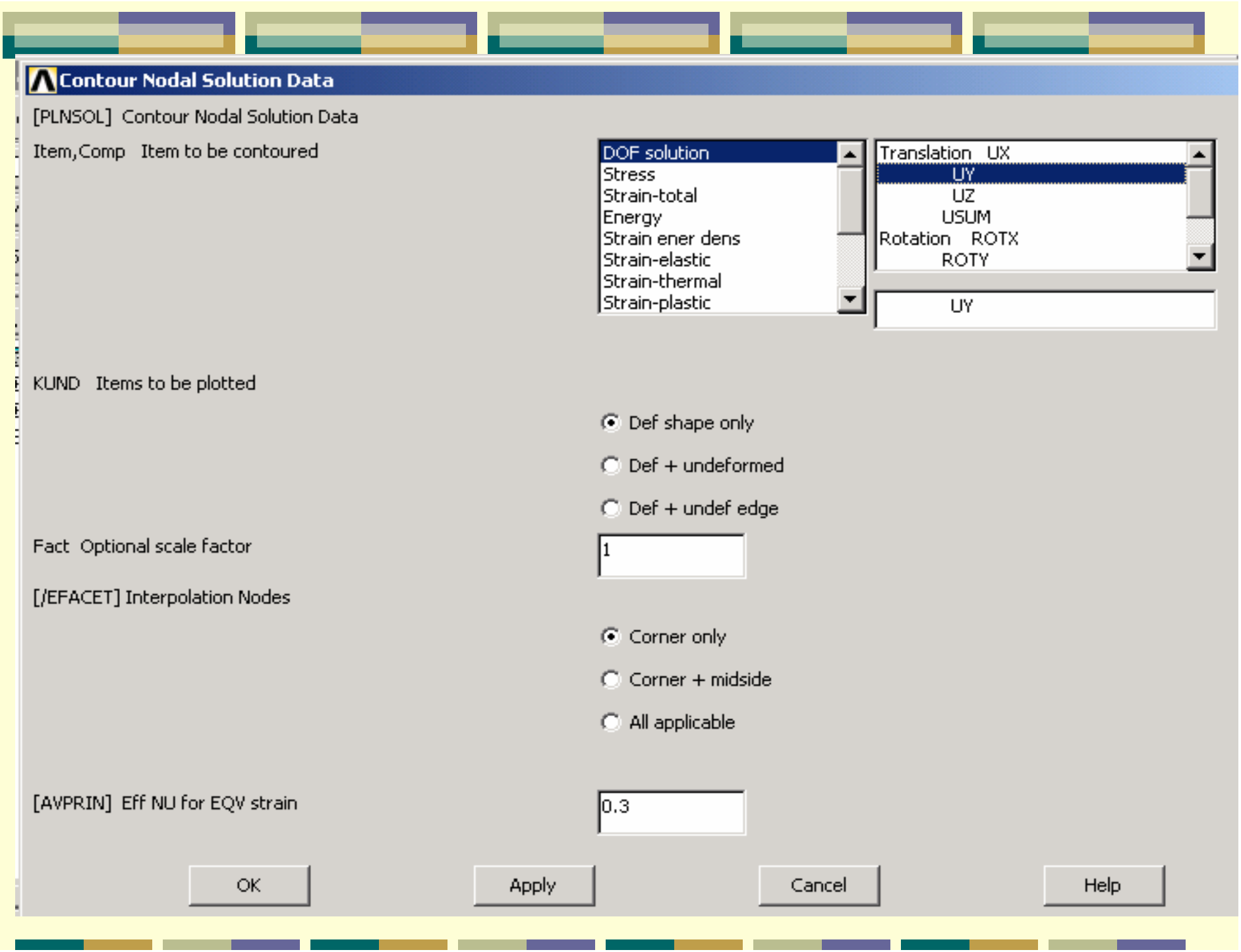
(2) 等值线图显示结果

显示节点求解结果

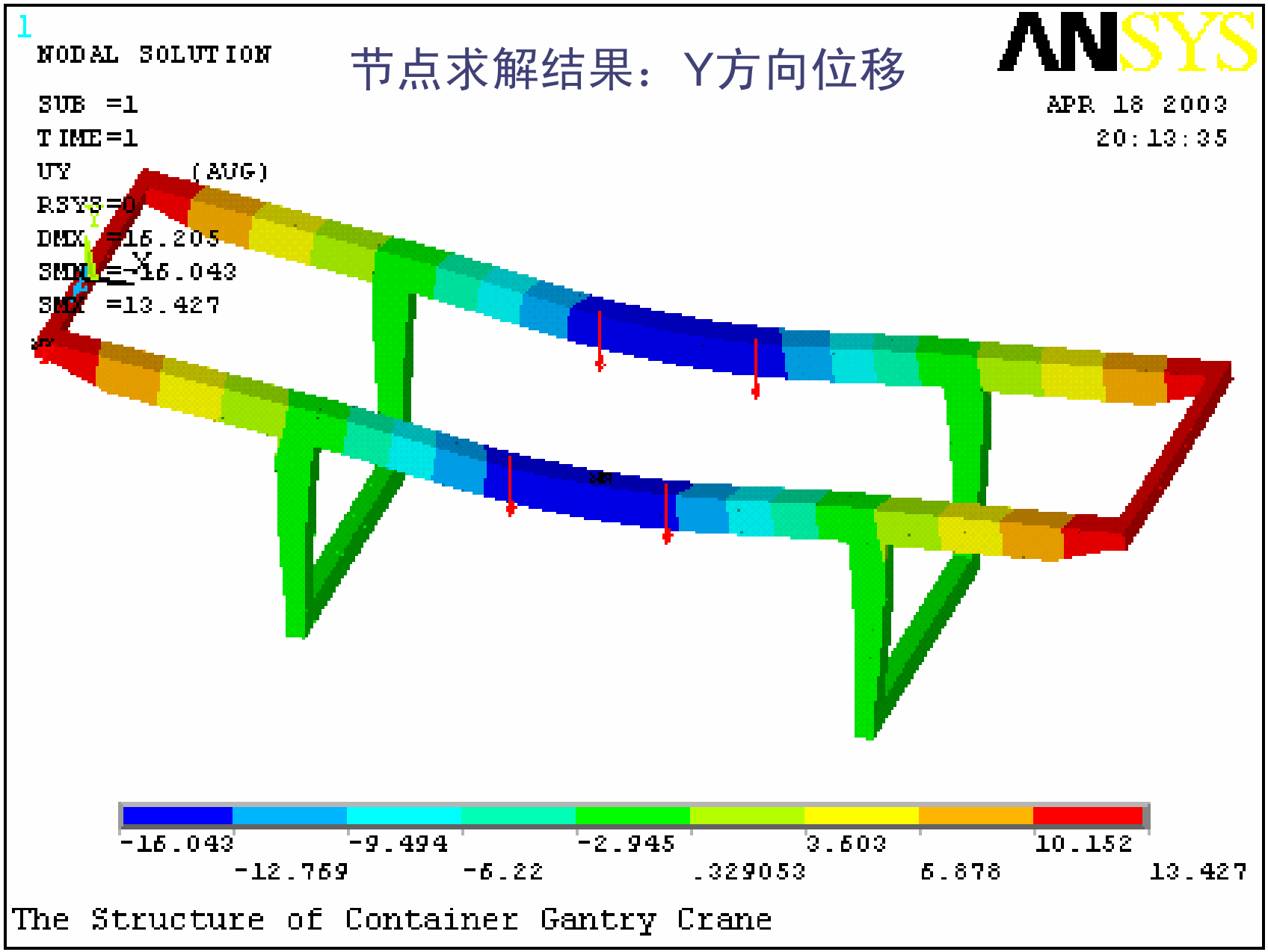
显示单元求解结果

矢量图显示计算结果

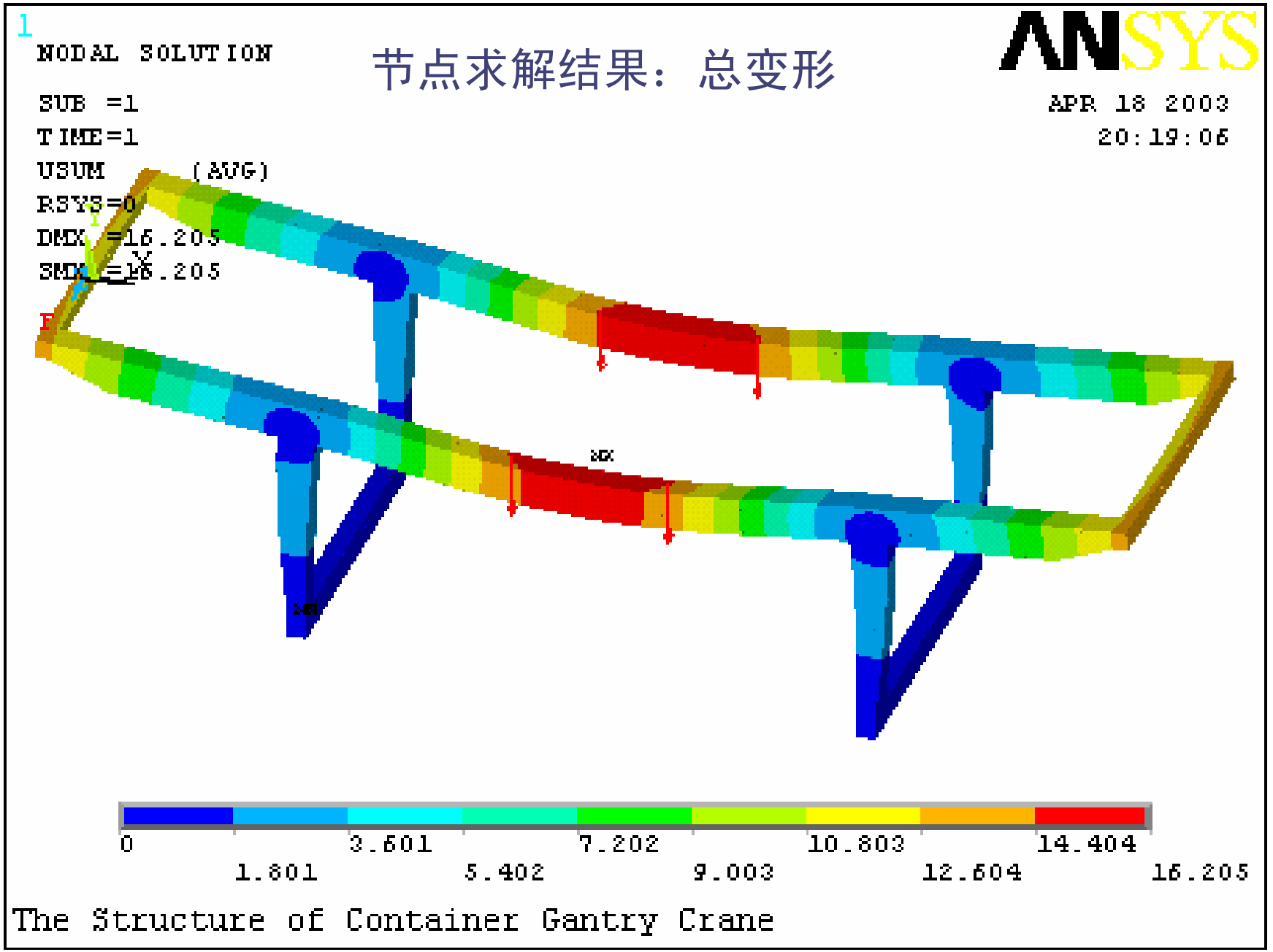




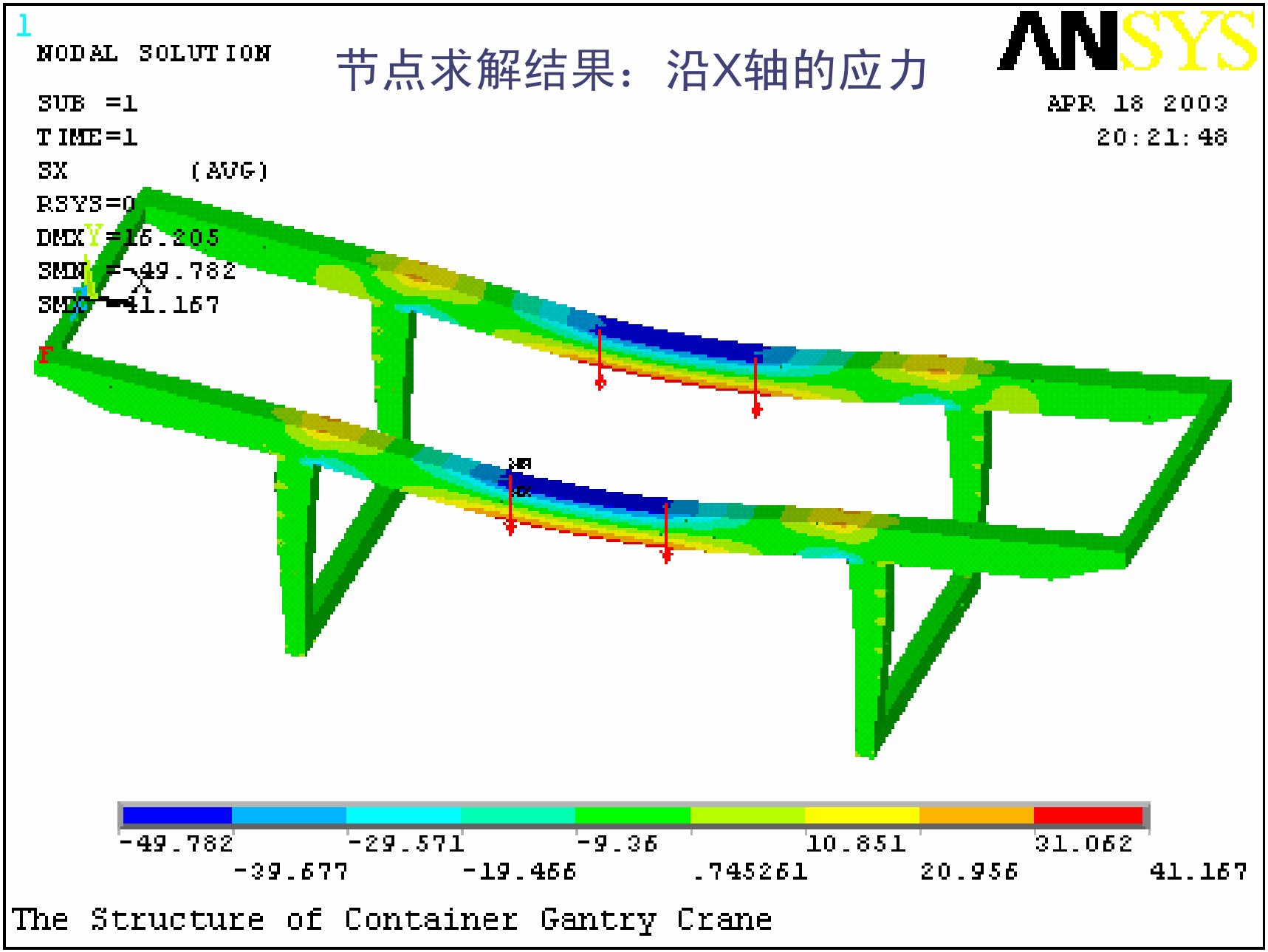
节点求解结果：Y方向位移



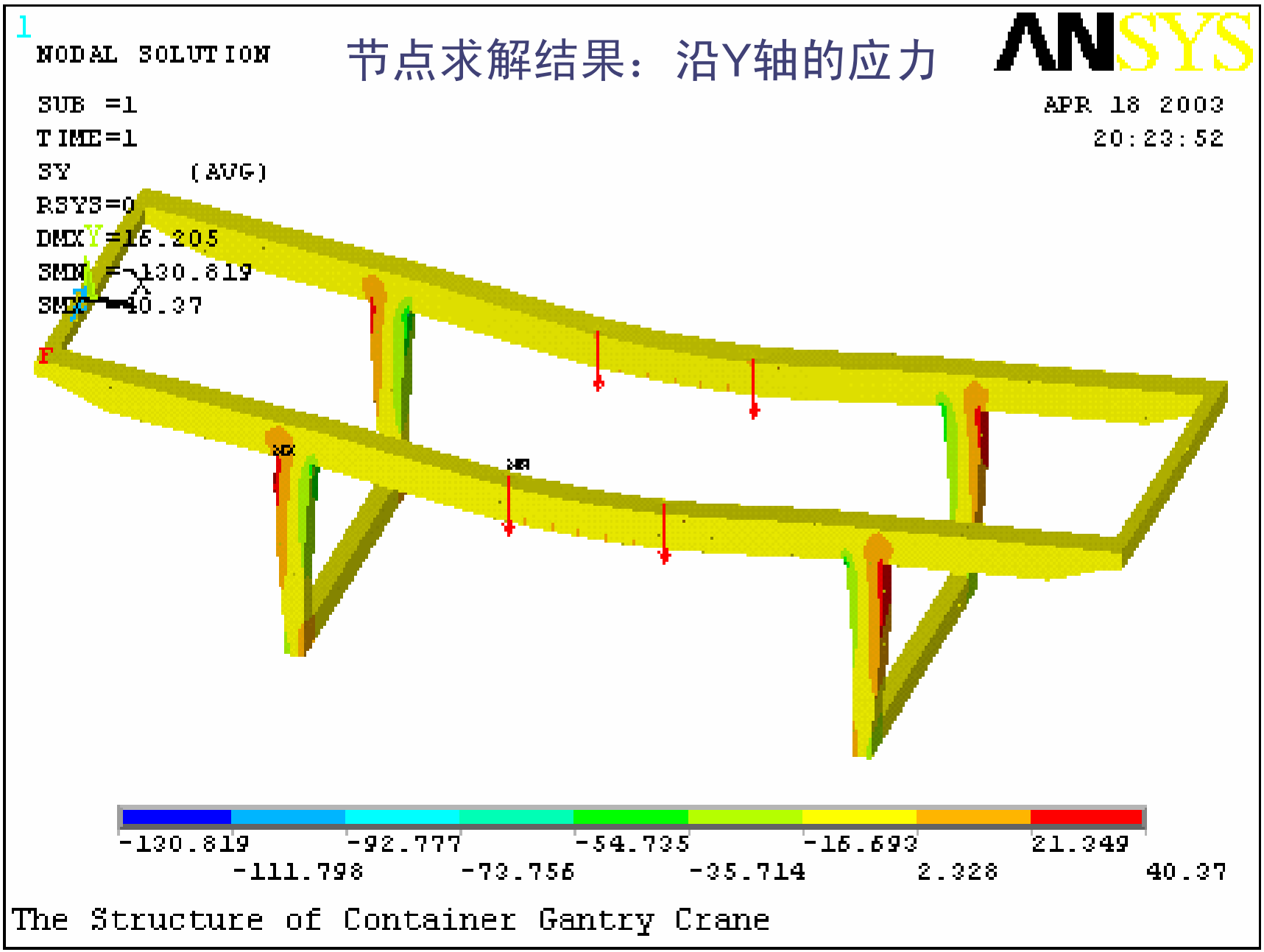
节点求解结果：总变形



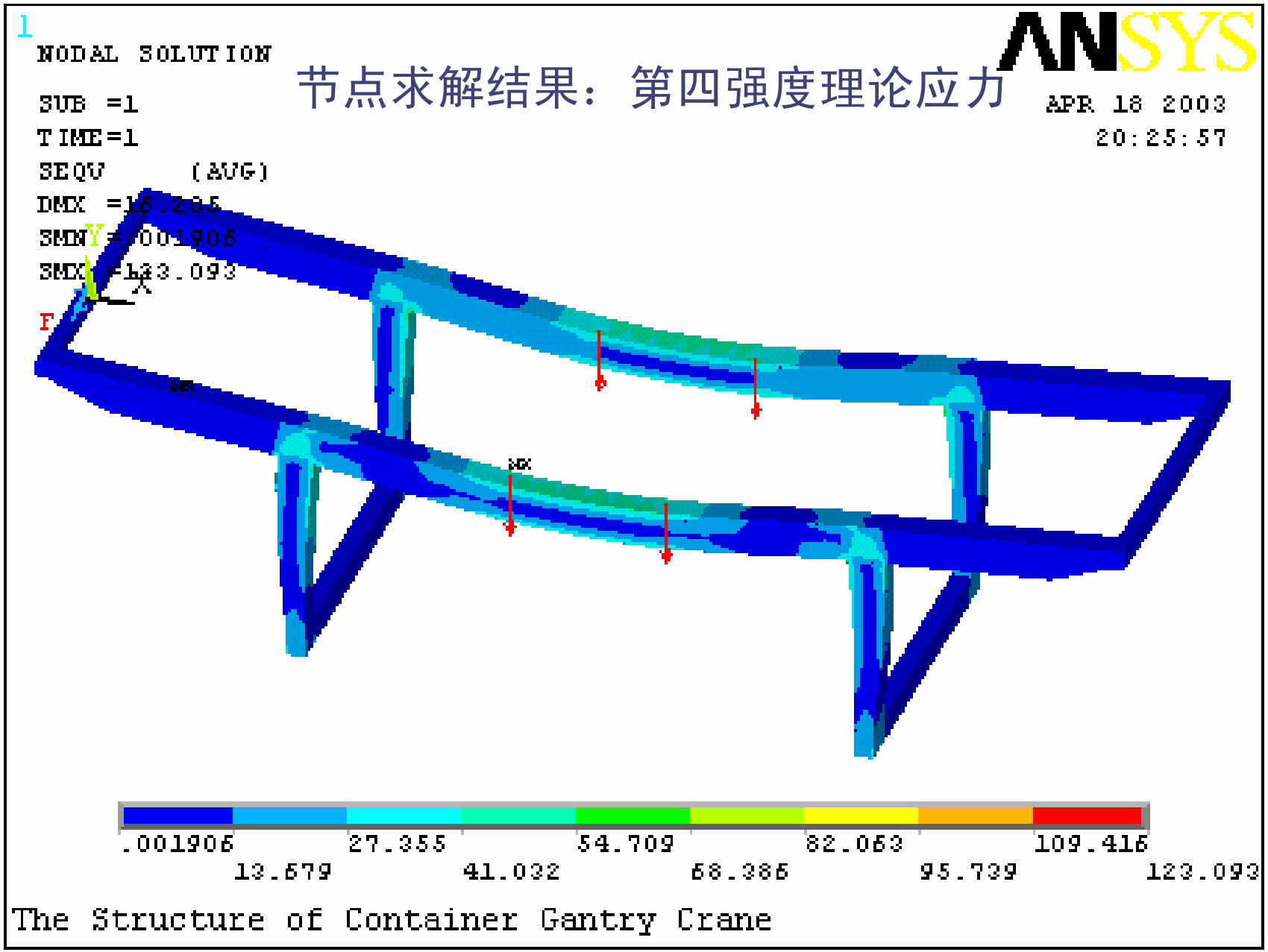
节点求解结果：沿X轴的应力



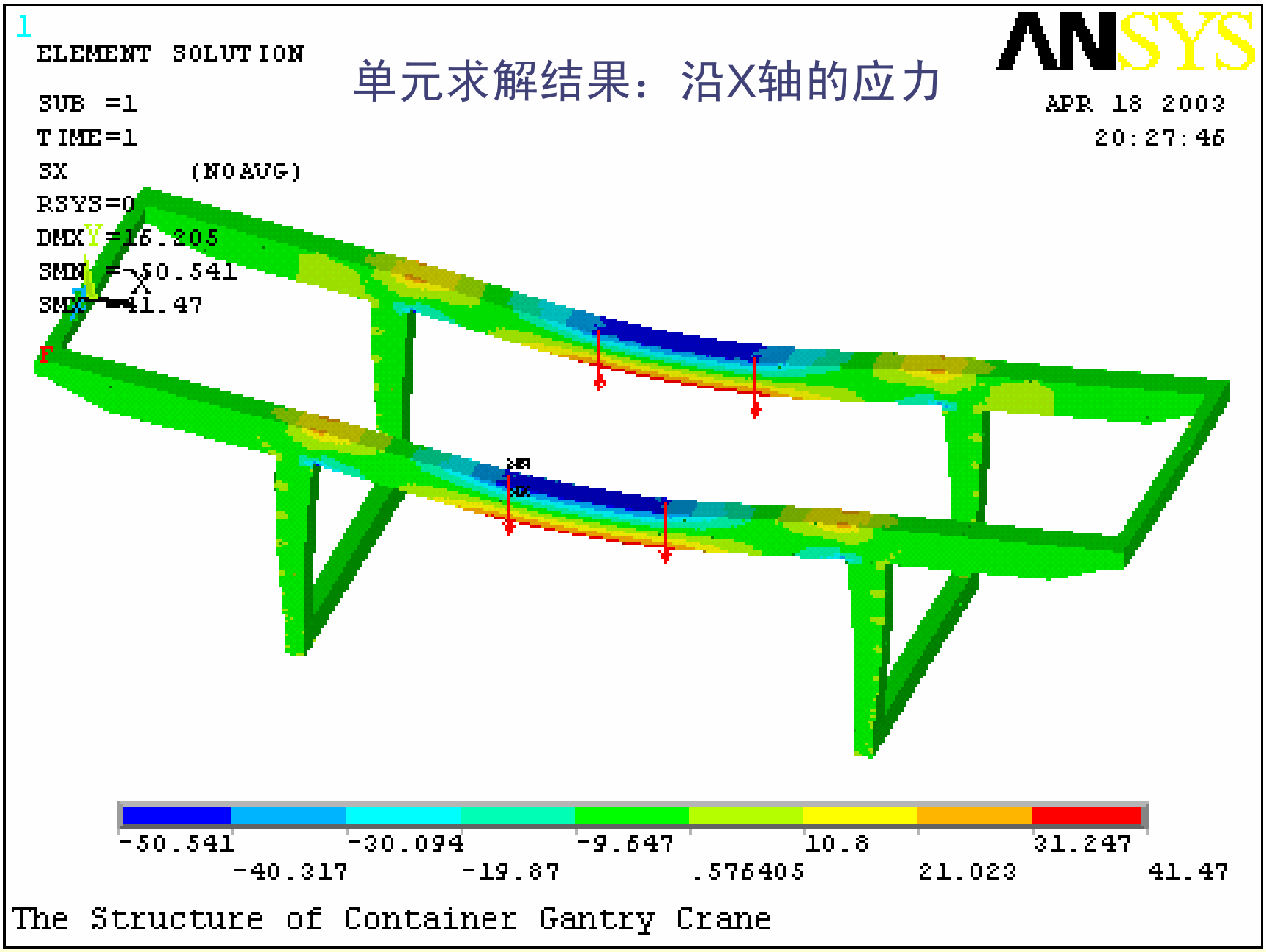
节点求解结果：沿Y轴的应力



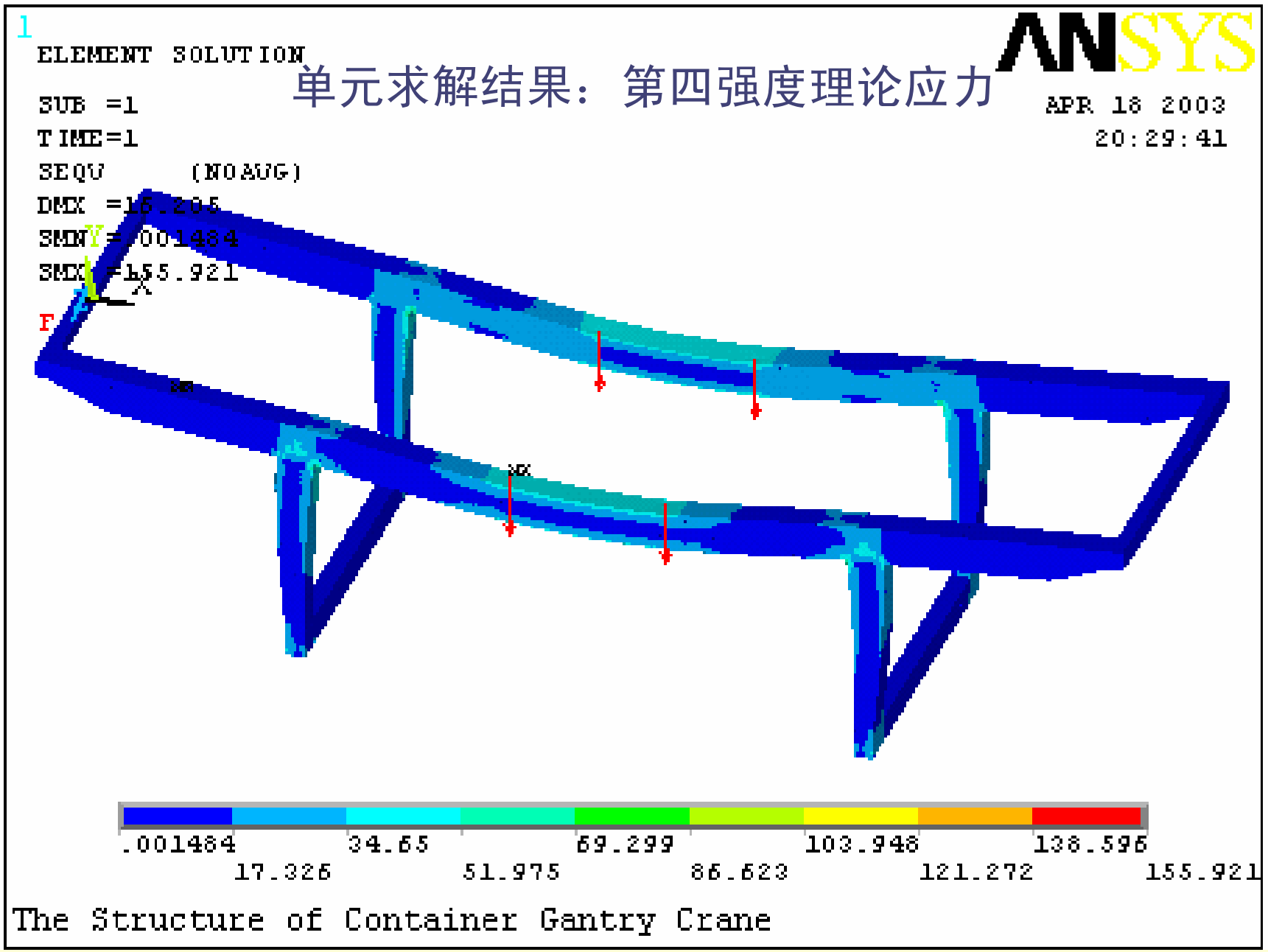
节点求解结果：第四强度理论应力



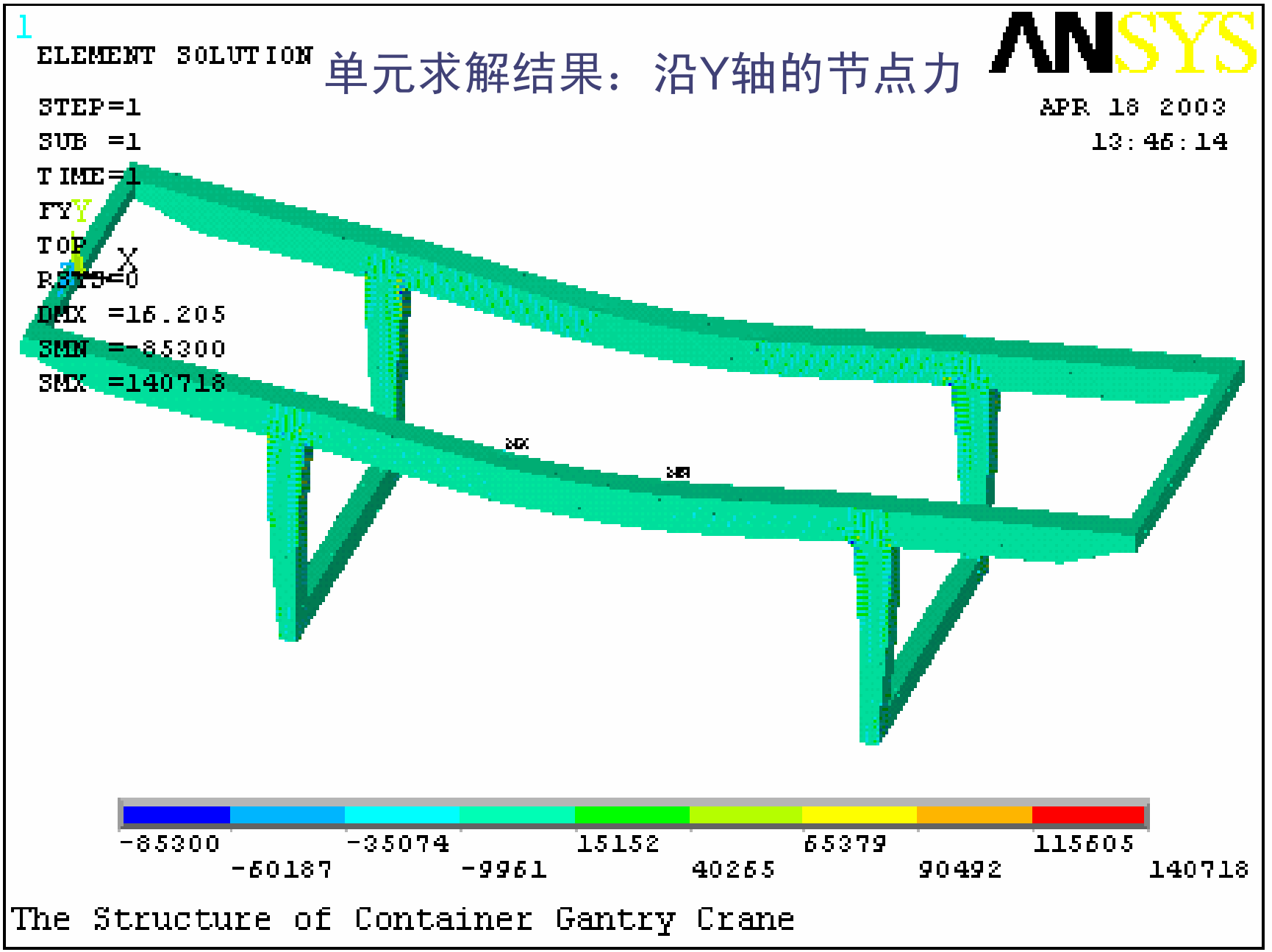
单元求解结果：沿X轴的应力



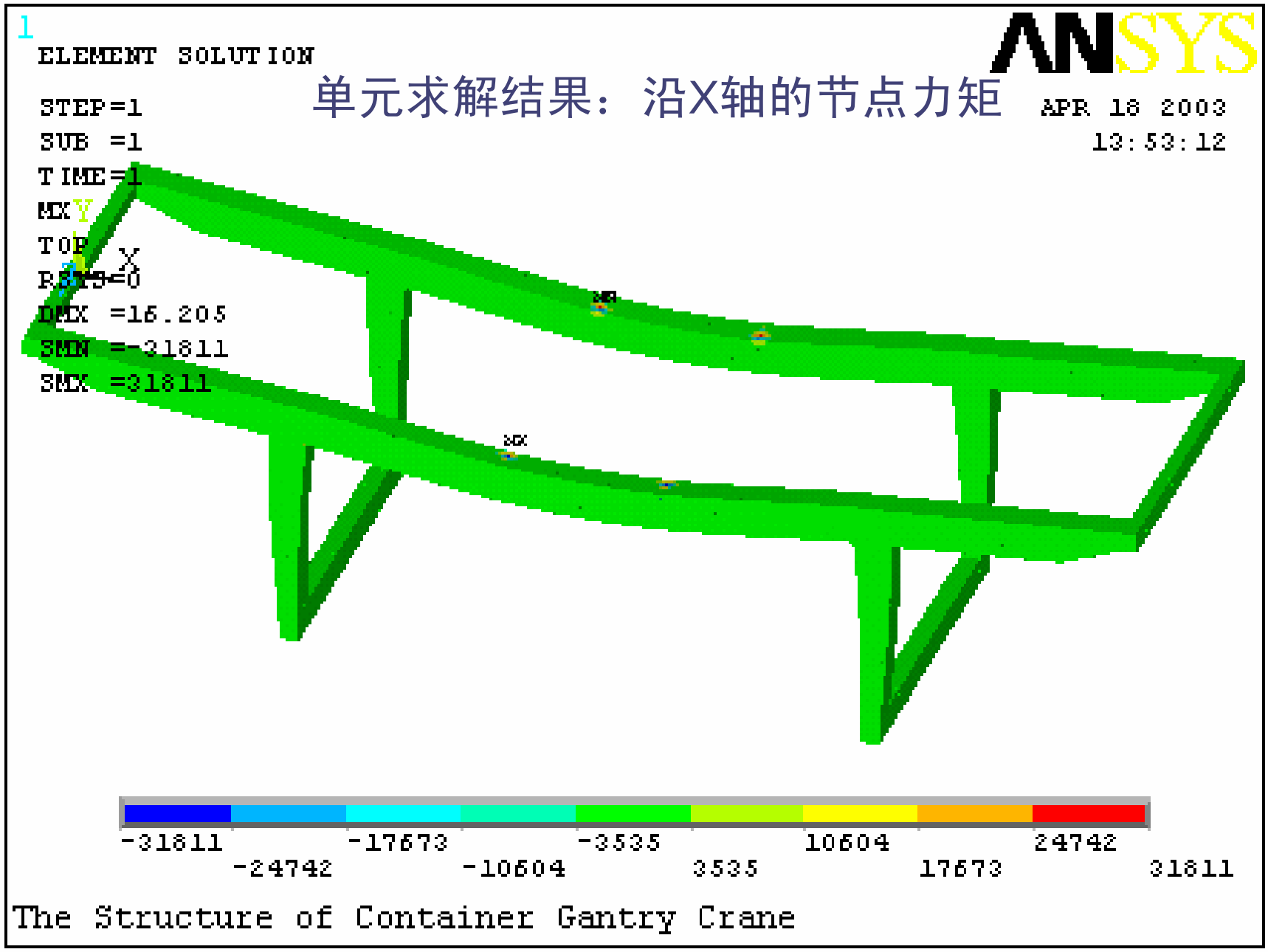
单元求解结果：第四强度理论应力



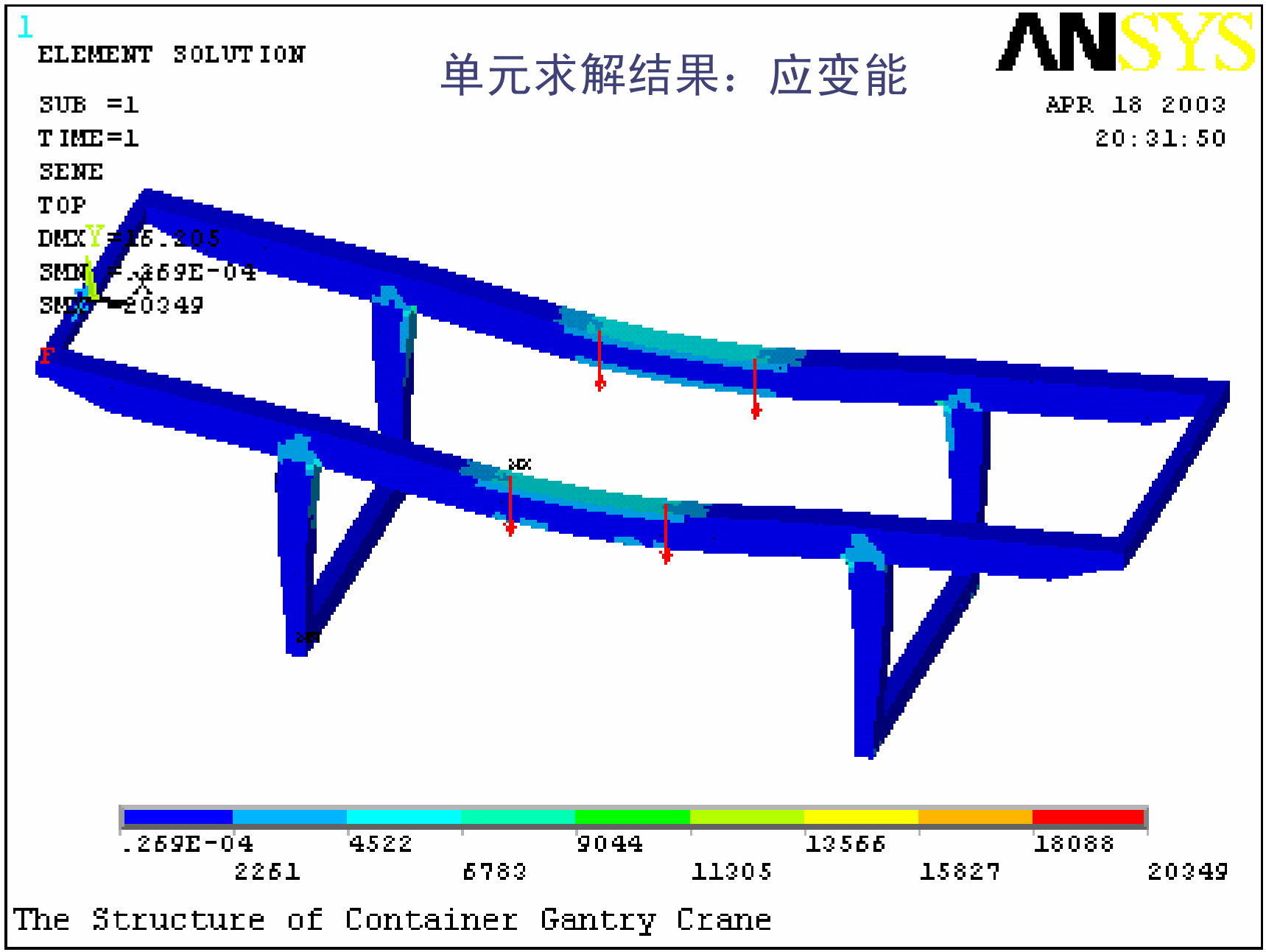
单元求解结果：沿Y轴的节点力



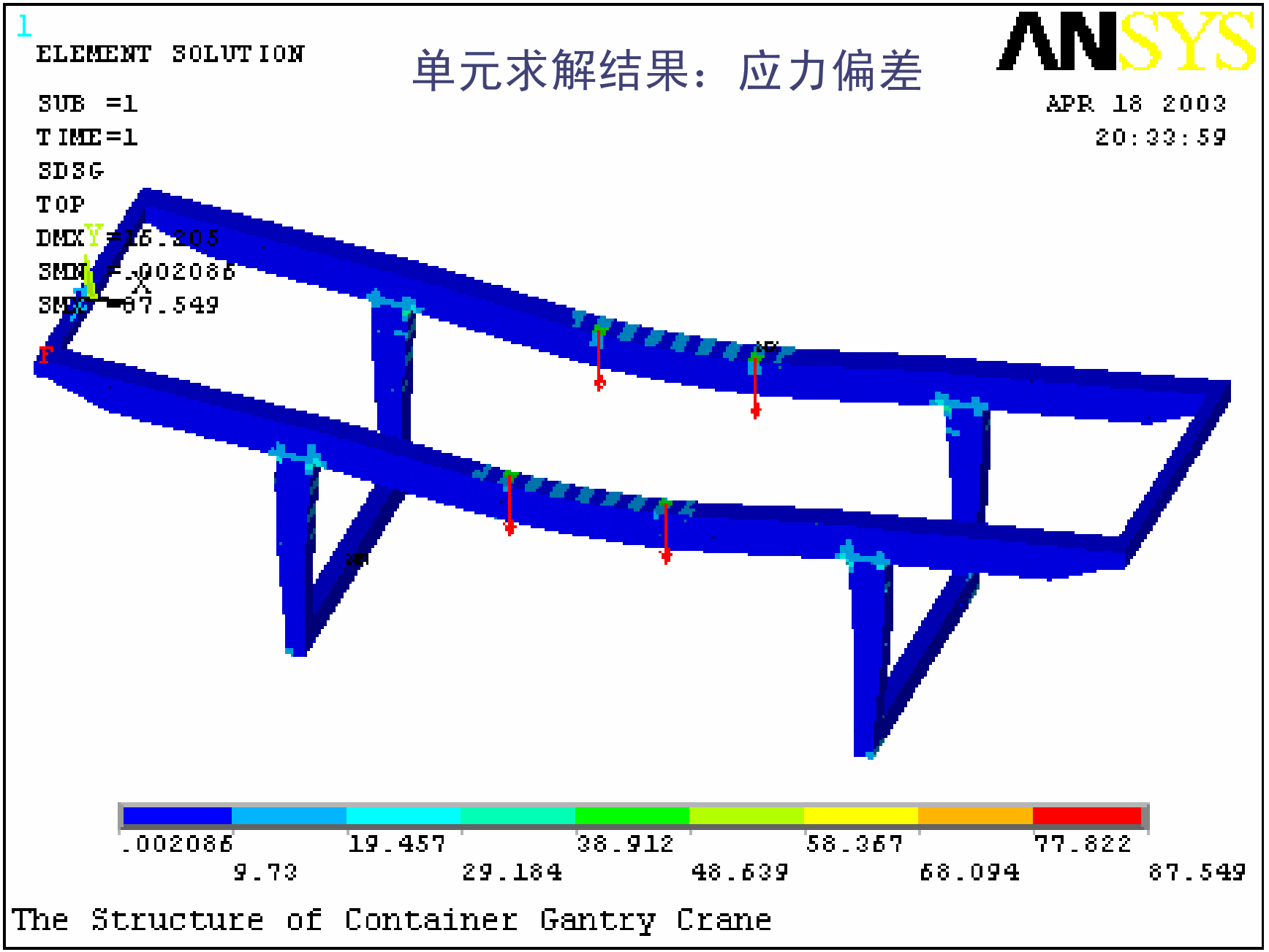
单元求解结果：沿X轴的节点力矩



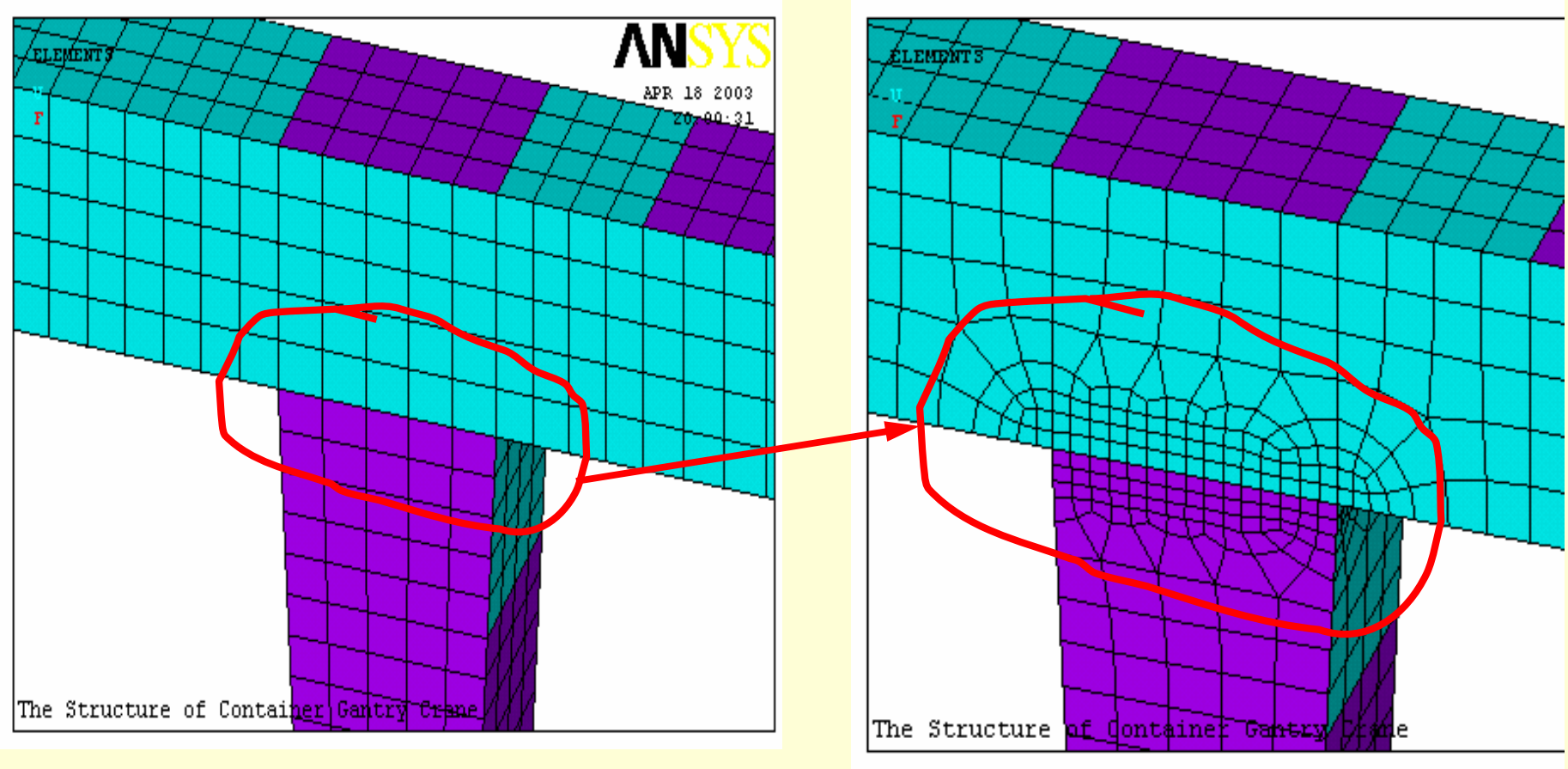
单元求解结果：应变能



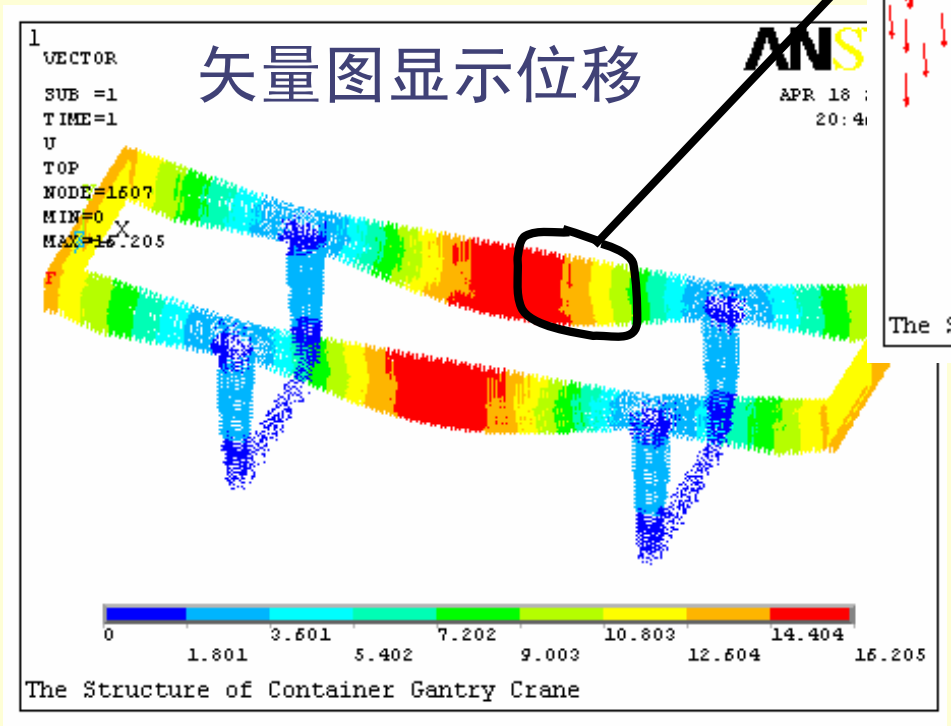
单元求解结果：应力偏差

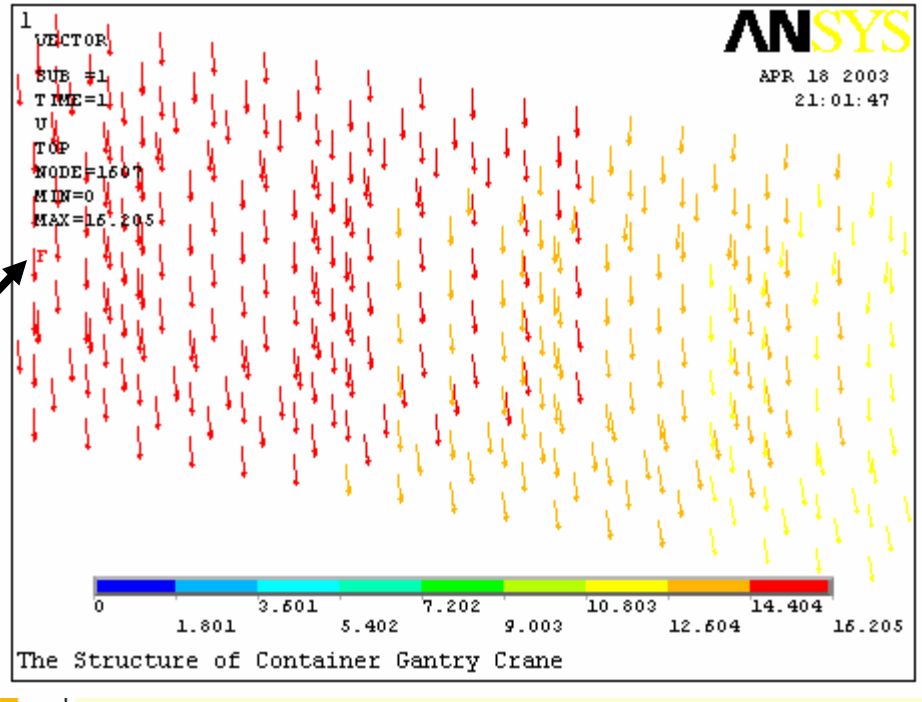


对应力梯度较大区域进行网格细化



(3) 矢量图显示计算结果





(4) 动画显示计算结果

15. 列表显示结果数据

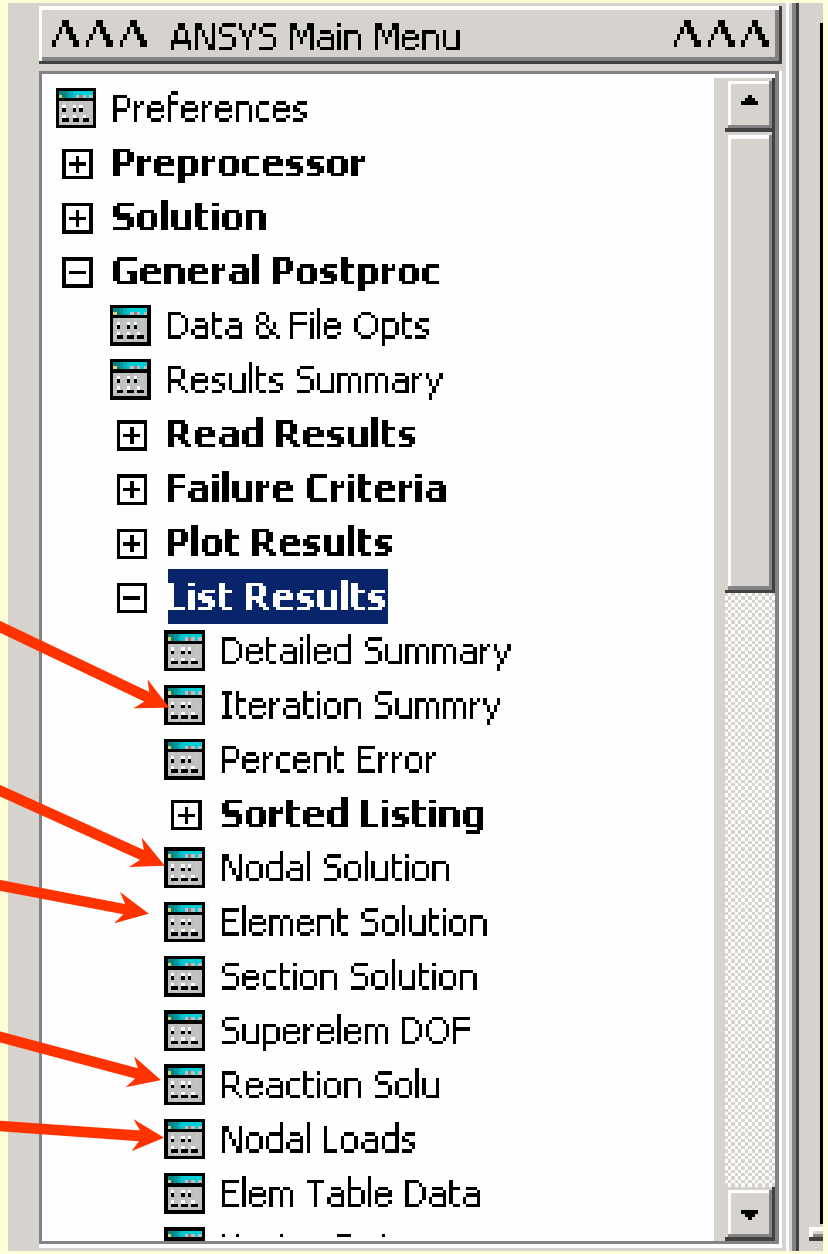
列表显示摘要信息

列表显示节点求解结果

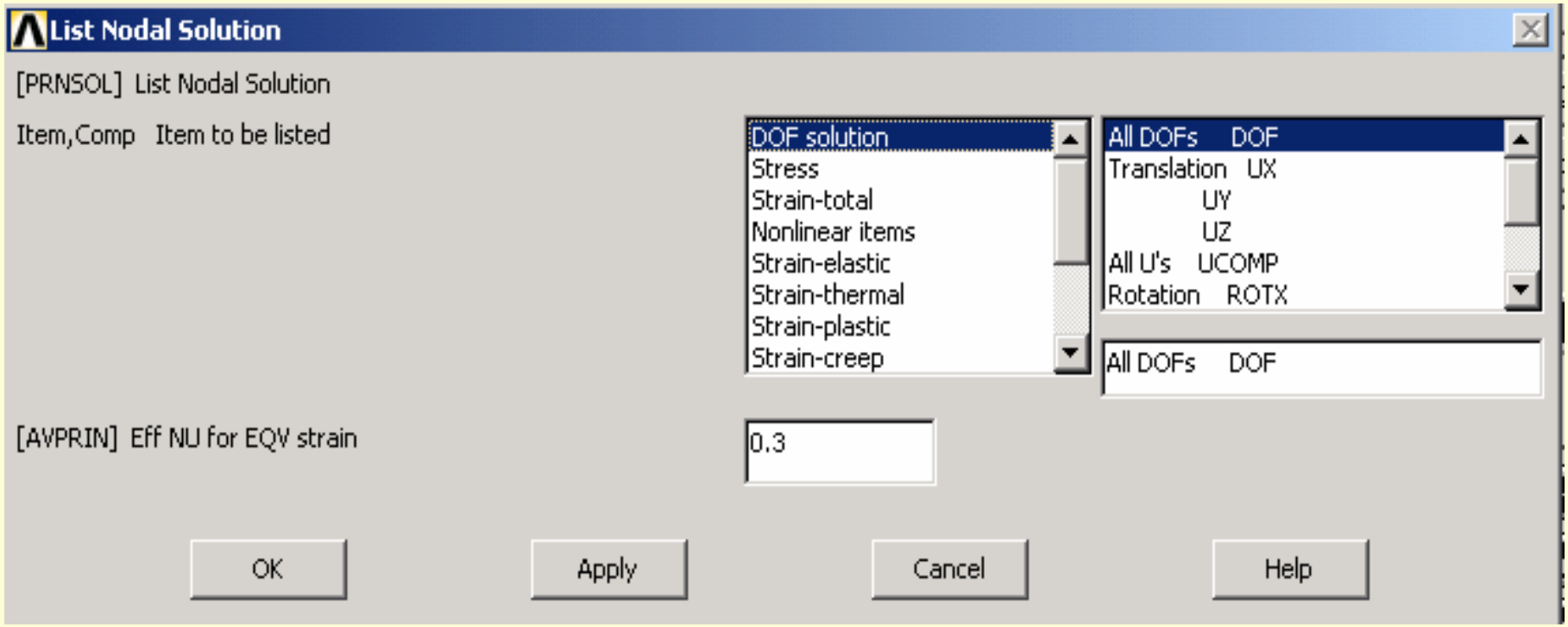
列表显示单元求解结果

列表显示约束点处支反力

列表显示节点力



(1) 列表显示节点求解结果



PRNSOL Command

File

PRINT DOF NODAL SOLUTION PER NODE

***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

LOAD STEP= 0 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN GLOBAL COORDINATES

NODE	UX	UY	UZ	ROTX	ROTY	ROTZ
1	1.0452	13.202	-0.35611E-01	-0.14429E-03	0.11101E-03	-0.10003E-02
2	0.48539E-01	13.203	0.10435	-0.14616E-03	0.10250E-03	-0.10009E-02
3	0.84554	13.202	-0.79528E-02	-0.13705E-03	0.10527E-03	-0.99806E-03
4	0.64600	13.202	0.19517E-01	-0.13878E-03	0.10355E-03	-0.99745E-03
5	0.44656	13.202	0.47166E-01	-0.13859E-03	0.10261E-03	-0.99707E-03
6	0.24729	13.202	0.75112E-01	-0.14280E-03	0.10206E-03	-0.99413E-03
7	0.47285E-01	12.451	0.27327E-01	-0.14835E-03	0.10394E-03	-0.10021E-02
8	0.47870E-01	12.827	0.65944E-01	-0.14803E-03	0.10243E-03	-0.10019E-02
9	1.0451	12.452	-0.11588	-0.15161E-03	0.11593E-03	-0.10011E-02
10	0.24656	12.451	-0.80112E-03	-0.13816E-03	0.10640E-03	-0.99644E-03
11	0.44605	12.451	-0.28583E-01	-0.13990E-03	0.10852E-03	-0.99829E-03
12	0.64552	12.451	-0.56626E-01	-0.14007E-03	0.11129E-03	-0.99803E-03
13	0.84507	12.452	-0.85079E-01	-0.14835E-03	0.11453E-03	-0.99954E-03
14	1.0452	12.827	-0.75322E-01	-0.14829E-03	0.10111E-03	-0.10001E-02

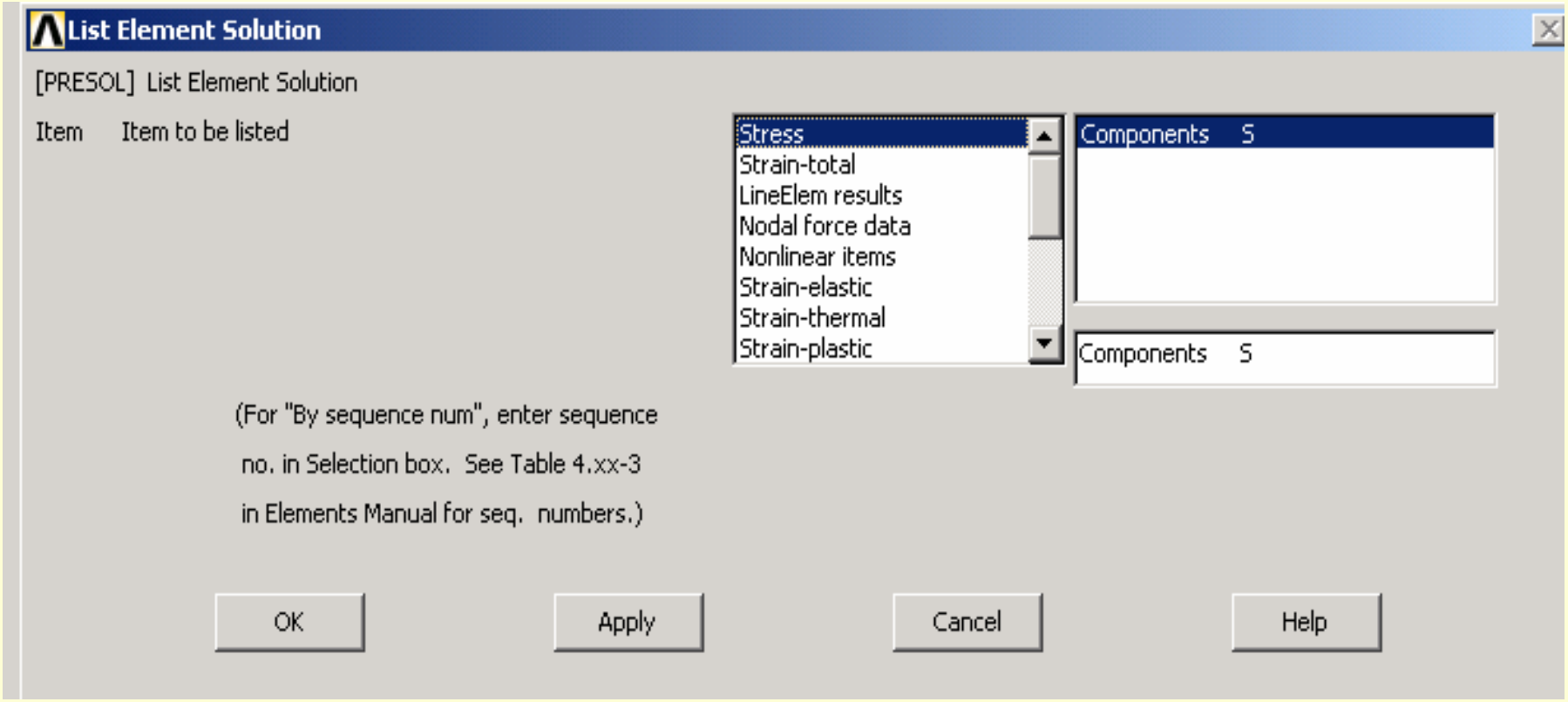
PRNSOL Command

File

```
  12431   0.18077     -0.15346      0.25896E-02-0.33078E-05-0.29264E-05-0.21628E-03
  12432   0.17993     -0.15357      0.12691E-02 0.22111E-05-0.20890E-05-0.21629E-03

 ***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****

 LOAD STEP=      0  SUBSTEP=      1
  TIME=     1.0000       LOAD CASE=    0

 THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN GLOBAL COORDINATES

    NODE       UX            UY            UZ            ROTX          ROTY          ROTZ
  12433   0.99729E-01-0.15383      0.24023E-02-0.14629E-05-0.32492E-05-0.21598E-03
  12434   0.98890E-01-0.15395      0.11983E-02 0.11908E-05-0.17928E-05-0.21598E-03
  12435   0.18759E-01-0.15418      0.22450E-02 0.33235E-05-0.30722E-05-0.21586E-03
  12436   0.17919E-01-0.15430      0.11035E-02-0.13091E-05-0.19702E-05-0.21587E-03

MAXIMUM ABSOLUTE VALUES
NODE        8562         4717         7940        10624         8651         1441
VALUE     2.3097      -16.043      -2.4140     0.11479E-02-0.16369E-03-0.15770E-02
```

各方向最大位移所在节点号

(2) 列表显示单元求解结果



File

PRINT S ELEMENT SOLUTION PER ELEMENT

***** POST1 ELEMENT NODAL STRESS LISTING *****

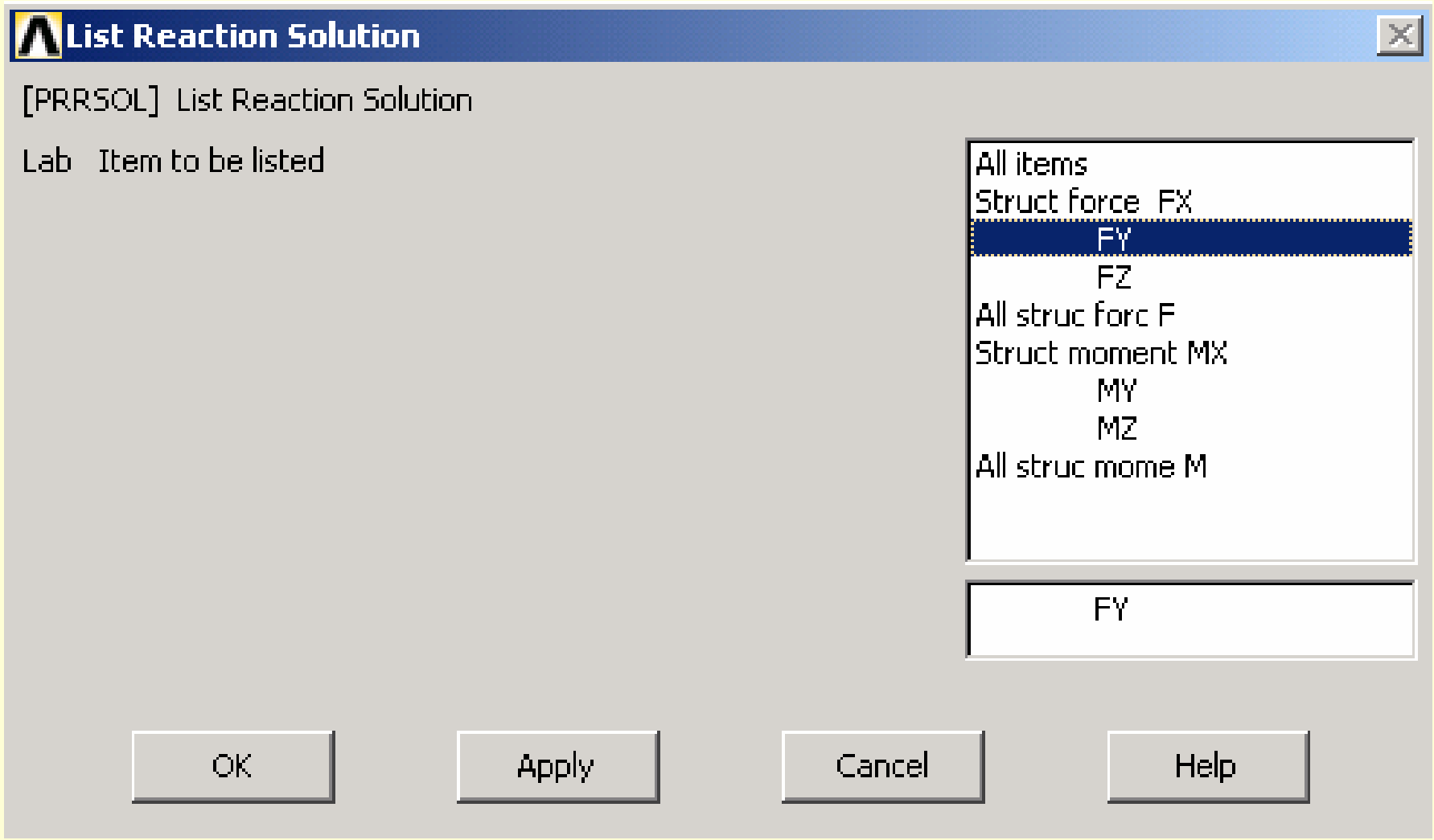
LOAD STEP= 0 SUBSTEP= 1
 TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
SHELL RESULTS ARE FOR TOP/BOTTOM

THE FOLLOWING X,Y,Z VALUES ARE IN GLOBAL COORDINATES

ELEMENT= 1 SHELL63

NODE	SX	SY	SZ	SXY	SYZ	SXZ
1	0.14605E-01	0.13363	0.0000	-0.17810	0.0000	0.0000
3	-0.33846E-01	0.54728E-01	0.0000	-0.17419	0.0000	0.0000
15	-0.83177E-02	-0.12810E-01	0.0000	-0.18392	0.0000	0.0000
14	-0.67023E-02	-0.58523E-01	0.0000	-0.18783	0.0000	0.0000
1	0.11624E-01	0.14759E-01	0.0000	-0.20404	0.0000	0.0000
3	0.65041E-02	0.93658E-01	0.0000	-0.20795	0.0000	0.0000
15	-0.19024E-01	-0.84859E-01	0.0000	-0.19822	0.0000	0.0000
14	0.32931E-01	-0.39146E-01	0.0000	-0.19431	0.0000	0.0000

(3)列表显示约束点处支反力



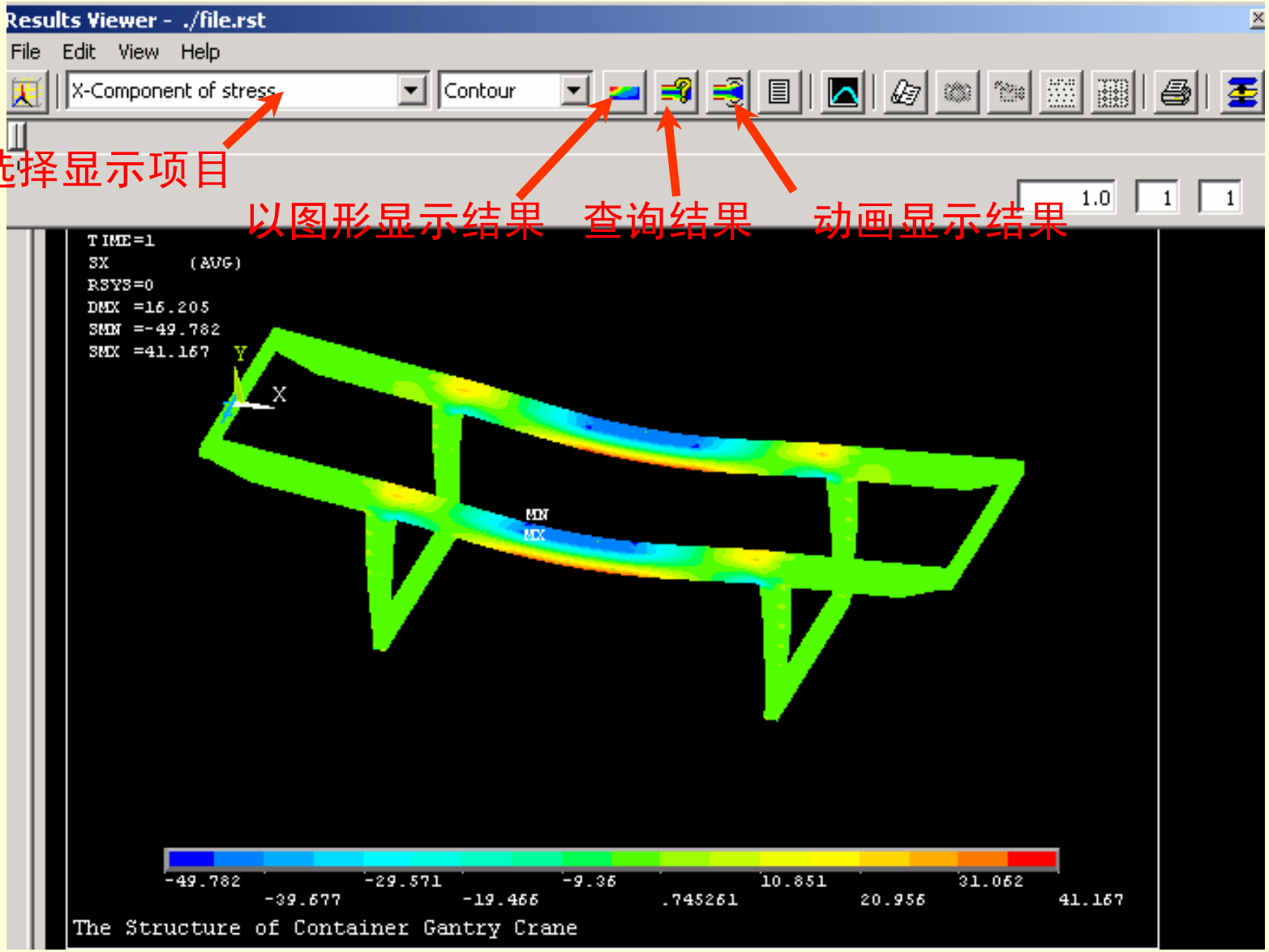
PRRSOL Command

File

```
PRINT FY   REACTION SOLUTIONS PER NODE

***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTI

LOAD STEP=     1  SUBSTEP=     1
 TIME=    1.0000       LOAD CASE=    0

THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN GLOB

  NODE       FY
  1411   0.13405E+06
  1412    85993.
  1413    84371.
  1414    73560.
  1415    80649.
  1416   -58008.
  1417    34560.
  1418    15169.
  1419   -944.92
  1420   -19323.
  1421   -73673.
  1422   -48781.
```

```
 ***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION
LISTING *****

 LOAD STEP=     1  SUBSTEP=     1
  TIME=    1.0000       LOAD CASE=    0

 THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN
GLOBAL COORDINATES

   NODE       FY
  10732    26.431
  10733   -16.443
  10734    6.5282
  10735   -3.7786
  10736    17.650
  10737   -28.417
  10738    2.4348
  10739   -4.6444
  10740    23.640

 TOTAL VALUES
 VALUE    0.11000E+07
```

16. 通过结果浏览器显示计算结果



查询结果