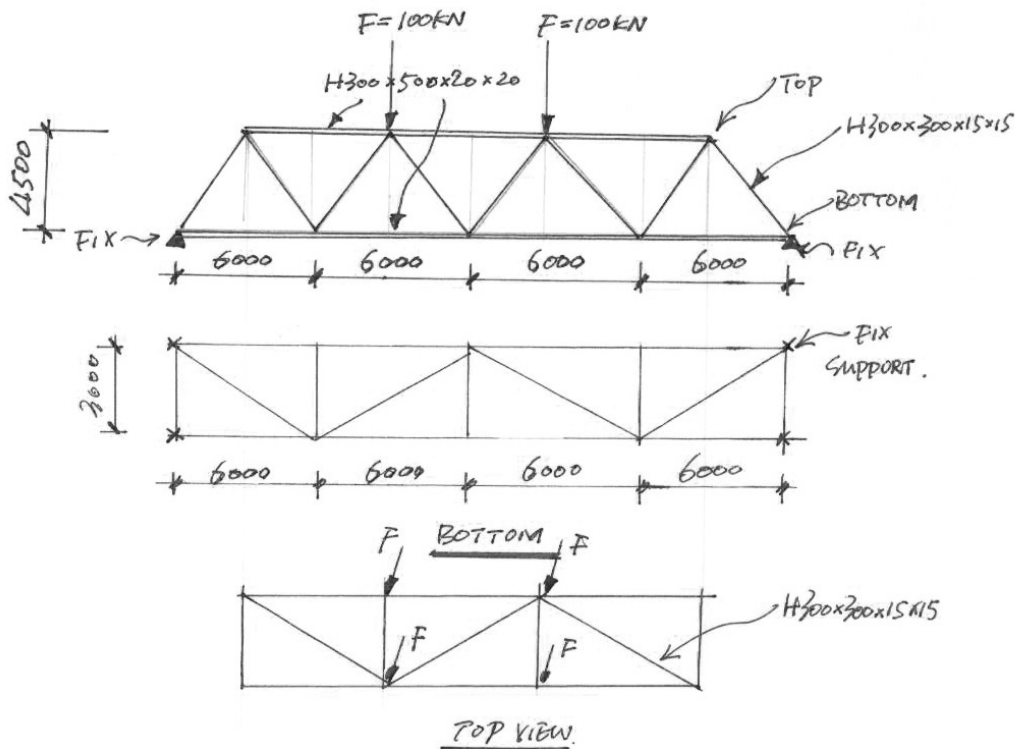


## 实例 1 桁架桥结构静力分析

### 1) 问题描述:

本题是一个传统的桁架桥结构受重力荷载（节点荷载）的作用的静力分析，如图所示。主要演示 OpenSEES 桁架单元在结构分析中的应用。结构模型尺寸如下图所示，上弦杆与下弦杆采用 H300x500x20x20 型钢，所有的腹杆（斜杆）采用 H300x300x15x15，顶部采力为 4 个 100kN 的集中力（不考虑自重影响），材料采用钢材，弹性模量 E 为 200000MPa。弹性分析，求解跨中变形值。



注意：本题开始就采用 3D 分析系统，不再采用 2D 分析系统，主要因为 3D 分析系统已包括 2D 的分析内容，用户可以举一反三了解 2D 问题的分析。本书主要探讨 OpenSEES 的分析功能及操作使用，不会拘泥于建模的细节，如节点坐标的计算，单元连接的编排。因此本书主要的建模会依靠笔者开发的 ETO 程序（ETABS TO OPENSEES）及 ETABS 程序进行建模，于是这里会谈及 ETABS 的一些简单操作。通过 ETABS 进行建模，再导出 OPENSEES 的命令流，通过命令流介绍 OPENSEES 实例结构分析的整个过程。

### 2) ETABS 模型建模

- (1) 采用 ETABS 的可视化界面进行 OpenSEES 的建模。打开 ETABS 程序，根据结构模型输入轴网的数据。如下图所示。选择 Grid Only 进行轴网建模，输入参数后只得到系统的轴网即可。

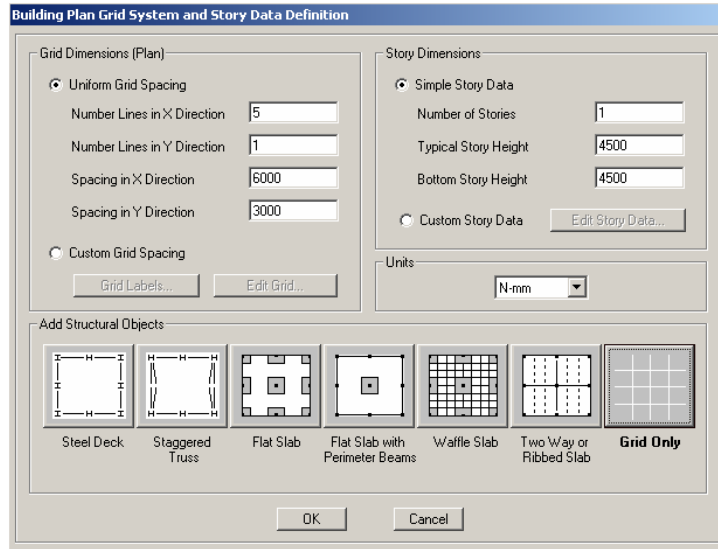


图 轴网输入界面

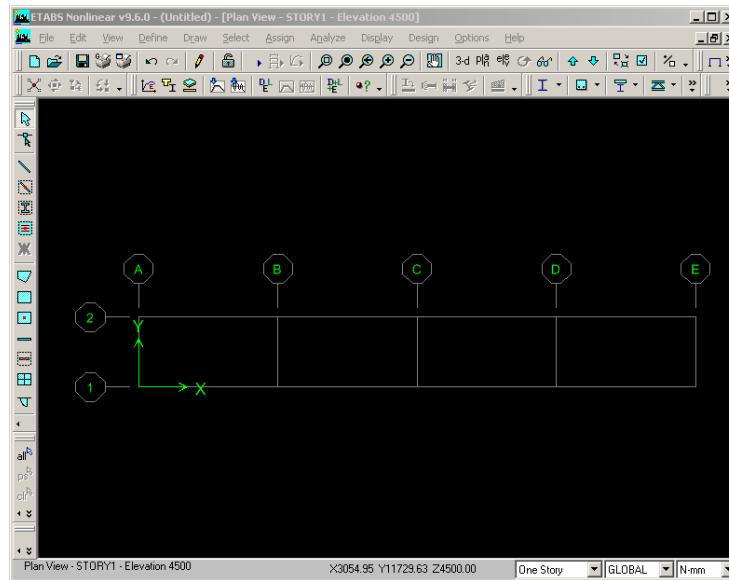


图 ETABS 显示的轴网系统

- (2) 点击菜单【Define】→【Material Properties】输入材料参数，点击材料 STEEL，将其参数弹性模量（Modulus of Elasticity）改为 200000MPa 即可。

**注意：**弹性材料的参数比较简单，一般只需要输入弹性模量  $E$  与泊松比  $\mu$ ，而剪切模量就通过弹性模量与泊松比计算得到。非线性（弹塑性）材料的参数就比较复杂，以后的章节会进行介绍。

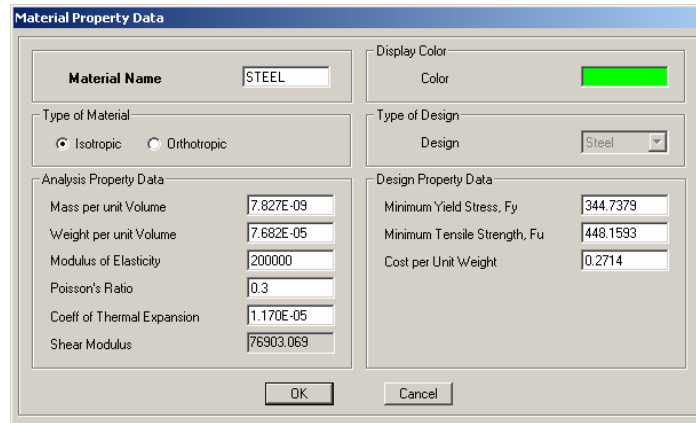


图 ETABS 材料定义

- (3) 点击菜单【Define】→【Frame Sections】输入截面参数。为了能够较好地将 ETABS 的模型导入 OPENSEES 模型中，截面数尽可能地少，删除所有不相关或没有用上的截面，保留单元采用的截面。建立以下两个截面，H300X500X20X20 及 H300X300X15X15，以 H300X500X20X20 为例，截面参数与输入的界面如下图所示。建立工字型截面采用【Add I/Wide Flange】。

**注意：**为了导入 OPENSEES 模型，方便标记，拟导成 OPENSEES 中的桁架单元的截面，截面的名称开头为字“T”（代表桁架单元截面 Truss），所以截面名字应为“TH300X500X20X20”。其它截面首字母与单元类型的关系如下表所示。

截面名称首字母	OpenSEES 对应单元	单元类型
T	Truss	桁架单元
E	Elastic	弹性单元
D	Disp Beamcolumn	基于刚度的纤维单元
N	Nonlinear Beamcolumn	基于柔度的纤维单元
H	Beam With Hinge	塑性铰单元

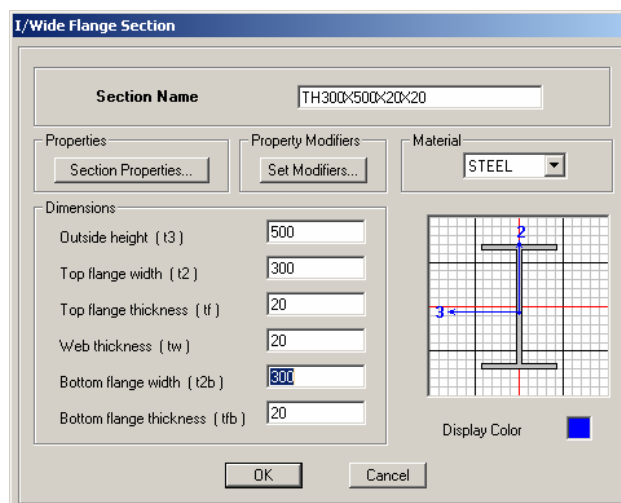



图 ETABS 截面定义

- (4) 点击工具栏工具即可建立单元。建立全部单元后即可得到模型如下图所示。建模过程中,将指定的截面赋予单元采用以下操作:选取单元后,【Assign】→【Frame/Line】→【Frame Section】。

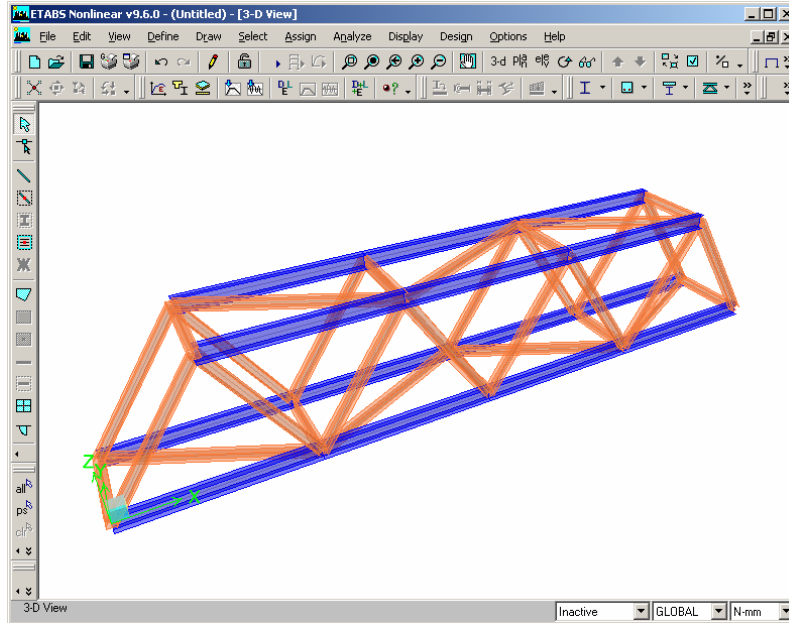


图 ETABS 模型图

- (5) 定义约束条件,选取指定为固定支座的点。选取节点后,【Assign】→【Joint/Point】→【Restrains(Supports)】,打开支座指定窗口,将该点设为固定支座,如图所示。  
**注意：桁架单元系统（三维系统），每个单元只有三个自由度，即 UX、UY 和 UZ。其固定支座为 UX、UY 与 UZ 共同约束。对于框架结构，每个单元有六个自由度，即 UX、UY、UZ、RX、RY、RZ，其固定支座则为六个自由度全部约束。**

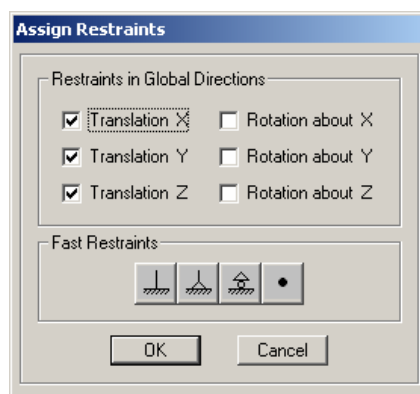


图 约束（支座）定义窗口

- (6) 定义荷载工况,点击【Define】→【Static Load Case】。打开窗口,将 DEAD 的工况作用此次加荷载的工况,将【Self Weight Multiplier】改为 0 值。因为本分析施加的外荷载不考虑自重的影响。

**注意：ETABS 提供自重计算功能，ETBAS 通过用户输入的构件的尺寸（长度、面**

积、厚度与截面等)，再加上输入的截面采用材料相关的容重（单位为  $N/mm^3$ ），然后计算得到每个线单元或面单元的自重，作用均布荷载或面荷载施加给单元。**Self Weight Multiplier** 为自重系数  $N$ ，代表该工况的荷载需要加上  $N$  倍的结构自重。

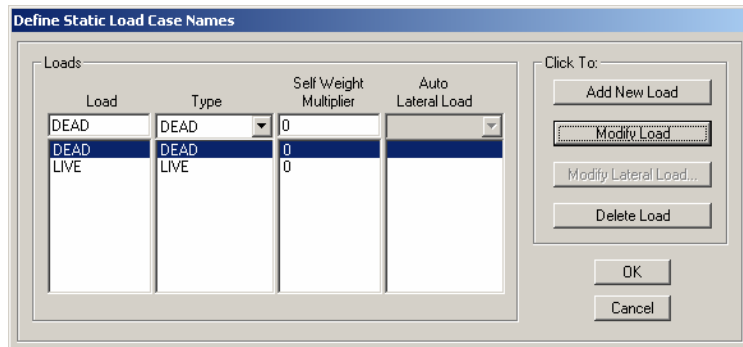


图 荷载工况定义窗口

- (7) 定义荷载，选择需要加载的节点，点击【Assign】→【Joint/Point Loads】→【Force】，弹出荷载输入窗口，输入以下数据，如图所示。荷载工况为 DEAD，荷载大小为 -100kN，即-100000N。

**注意：**本书 ETABS 及 OPENSEES 主要计算采用的单位体制为  $N,mm$ 。在 ETABS 建模时，必须时刻注意输入数据时采用的单位体制。

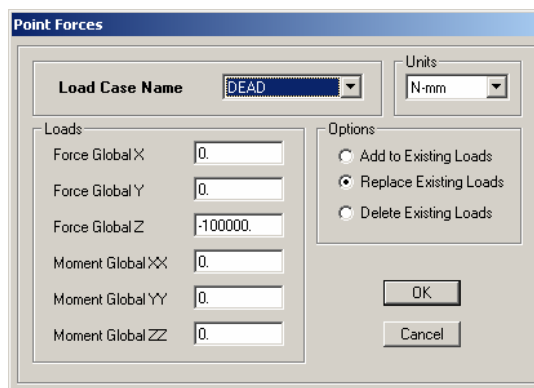


图 点荷载定义窗口

- (8) 通过材料定义、截面定义、单元建模、约束定义、荷载工况、点荷载（集中力）定义后，模型基本完成，模型如下图所示。

**注意：**实例的 ETABS 模型存放在光盘“/EXAM01/ETABS/”目录。

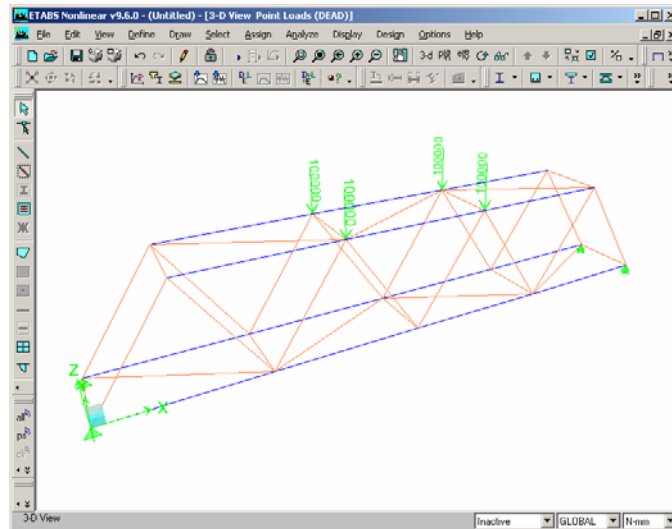


图 ETABS 模型图

- (9) 由于本实例属于三维桁架分析类型，即全部单元均为桁架单元，因此，分析之前需要设置系统的自由度规定，打开【Analyze】→【Set Analysis Option】，弹出分析属性设置窗口，将系统 UX、UY、UZ 勾选，即只保留结构的 3 个平动自由度，以代表系统为三维桁架系统。

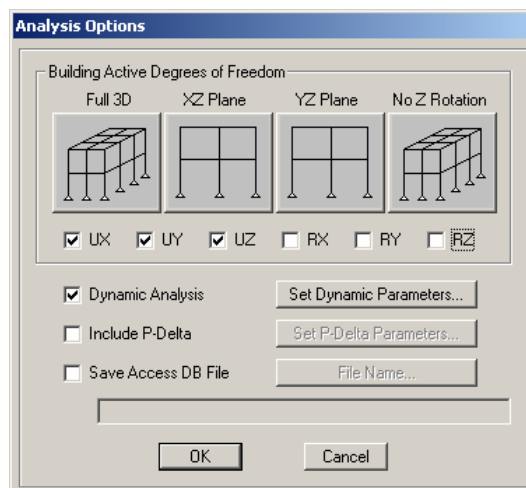


图 分析设置窗口

### 3) ETABS 静力分析

采用 ETABS 对该模型进行静力分析，目的是为了与 OPENSEES 进行比较。分析点击【Analyze】→【Run Analysis】，分析所得结构变形如下图所示。其中，跨中节点（节点 5）的竖向变形为-1.65mm。

**注意：**三维桁架体系在静力分析之前，往往需要判断是否存在机构体系，也就是说存在刚体运动自由度，一般可以通过周期分析得到，如果能进行周期分析且得到合理的周期值，那么证明结构不存在机构。本实例中，弦杆之间形成的四边形都加上了对角斜杆，保证结构不出现机构，因此静力分析可以完成。如果结构存在机构，在 OPENSEES 是不能完成计算的。

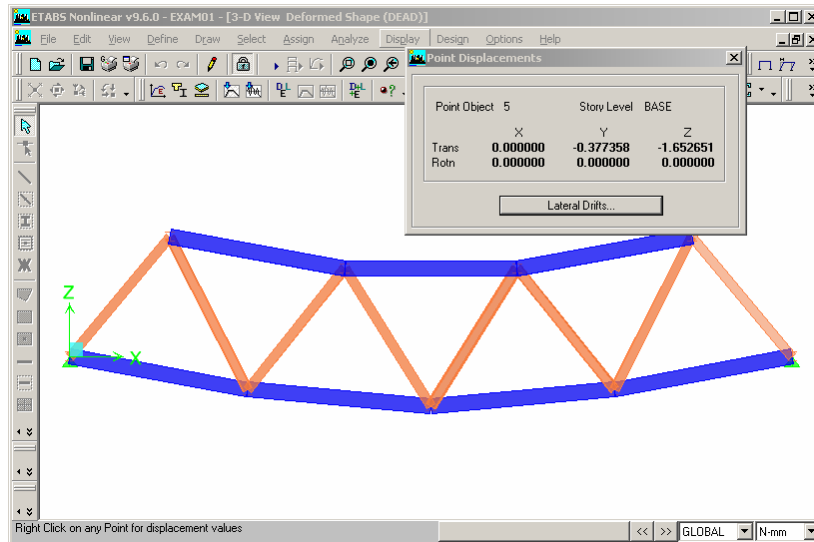



图 ETABS 静力分析结果

#### 4) OPENSEES 建模

(1) 打开 ETABS 模型, 点击【File】→【Export】→【Save Model as SAP2000 .s2k Text File】, 将 ETABS 的结构模型输出为 S2K 文本。

(2) 打开 ETO (ETABS TO OPENSEES) 程序, 点击工具栏的按钮  导入 S2K 文件, 文件导入后, 得到结构模型如图所示。

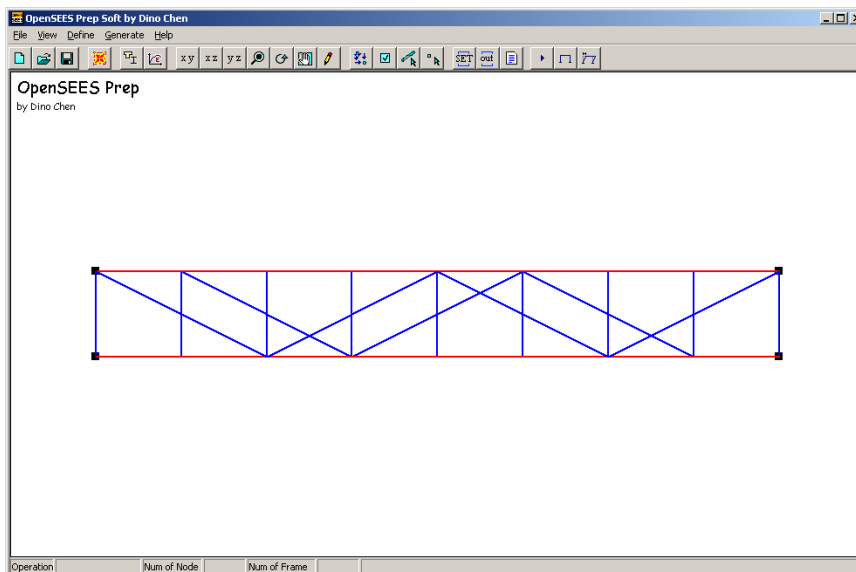






图 ETO 程序导入模型后界面

(3) 点击  按钮, 可以旋转模型视图, 点击  可以拖动视图, 点击  可以全屏查看模型。点击按钮  可显示输入荷载, 荷载显示后如图所示。

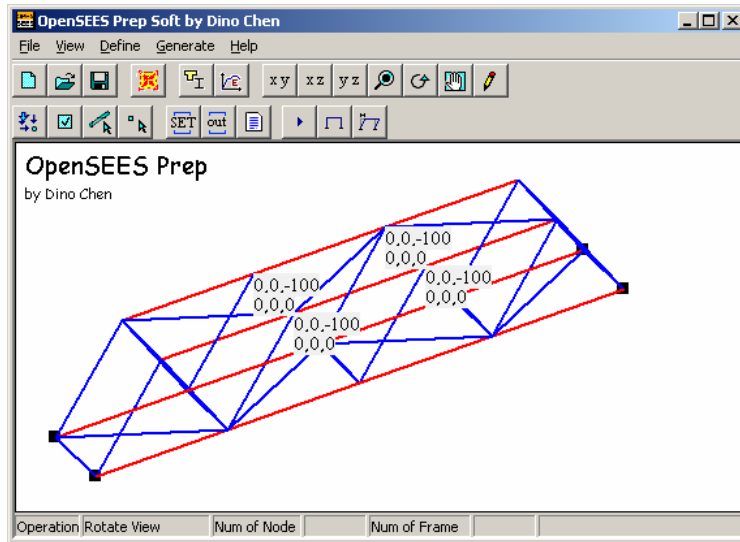



图 ETO 模型图

- (4) 点击按钮  可生成 OPENSEES 模型，即 OPENSEES 的 TCL 命令，打开后弹出窗口。点击【Generate】即生成 OPENSEES 的命令流，点击【Save】可保存 TCL 代码。

**注意：OPENSEES 代码是根据 ETABS 模型的 S2K 数据生成。包括材料属性（弹性部分），截面属性，单元属性，几何模型，荷载与约束等。实例的 OPENSEES 存放在光盘“/EXAM01/OPENSEES/”目录中。**

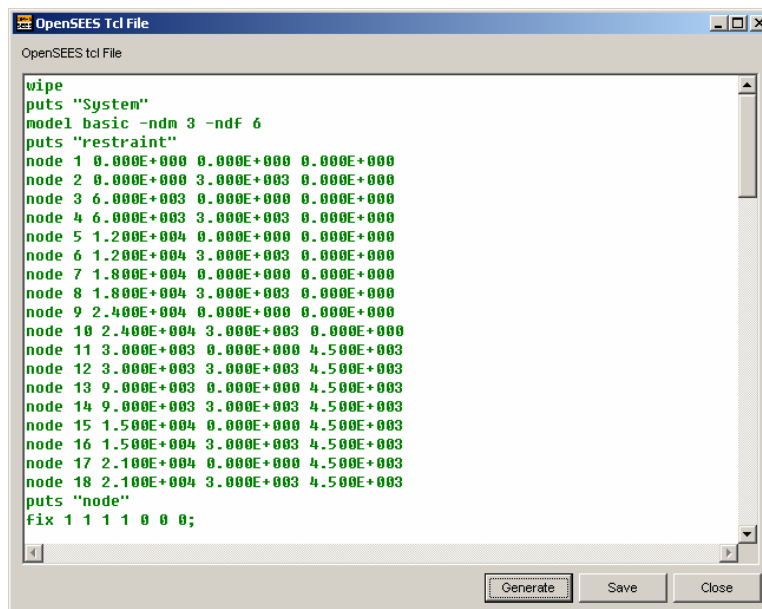


图 ETO 生成命令流

## 5) OPENSEES 命令流解读

(1) 从 ETO 程序中生成的 OPENSEES 的命令流如下所示。

```

wipe
puts "System"
model basic -ndm 3 -ndf 6
puts "restraint"
node 1 0.000E+000 0.000E+000 0.000E+000
node 2 0.000E+000 3.000E+003 0.000E+000
.....
node 17 2.100E+004 0.000E+000 4.500E+003
node 18 2.100E+004 3.000E+003 4.500E+003
puts "node"
fix 1 1 1 1 0 0 0;
fix 2 1 1 1 0 0 0;
fix 9 1 1 1 0 0 0;
fix 10 1 1 1 0 0 0;
puts "material"
uniaxialMaterial Elastic 1 1.999E+005
uniaxialMaterial Elastic 2 2.482E+004
uniaxialMaterial Elastic 3 1.999E+005
puts "transformation"
puts "element"
element truss 1 11 12 1.305E+004 1
element truss 2 13 14 1.305E+004 1
.....
element truss 46 7 10 1.305E+004 1
puts "recorder"
recorder Node -file node0.out -time -nodeRange 1 18 -dof 1 2 3 disp
recorder Element -file ele0.out -time -eleRange 1 46 localForce
puts "loading"
## Load Case = DEAD
pattern Plain 1 Linear {
load 13 0.000E+000 0.000E+000 -1.000E+005 0.000E+000 0.000E+000 0.000E+000
load 14 0.000E+000 0.000E+000 -1.000E+005 0.000E+000 0.000E+000 0.000E+000
load 15 0.000E+000 0.000E+000 -1.000E+005 0.000E+000 0.000E+000 0.000E+000
load 16 0.000E+000 0.000E+000 -1.000E+005 0.000E+000 0.000E+000 0.000E+000
}
puts "analysis"
constraints Plain
numberer Plain
system BandGeneral
test EnergyIncr 1.0e-6 200
    
```

**algorithm Newton**

**integrator LoadControl 1.000E-002**

**analysis Static**

**analyze 100**

(2) OPENSEES 的命令流一般可以划分为以下几个部分（按序划分）：

- 结构模型定义
- 结果输出定义
- 荷载定义
- 分析定义

其中，结构模型定义包括了节点定义、约束定义、材料定义、截面定义、坐标轴定义及单元定义，是代码的主体部分。结果输出，主要是定义 OPENSEES 里面记录数据的命令【Recorder】。荷载定义，包括了力控制工况静力荷载，位移控制工况的静力荷载分布，地震波的时程等。分析定义主要是一些迭代算法与收敛参数的选取。以下将逐行解释命令流并提示注意的地方。

(3) OPENSEES 的第一句命令就是：**wipe**，即清除程序之前输入的数据，清空数据。

(4) 建立分析模型之前，需要确立结构自由度规定，命令 **model basic -ndm 3 -ndf 6**，为普通的框架结构的自由度规定，由于本实例采用三维桁架自由度体系，因此命令应改为：**model basic -ndm 3 -ndf 3**，其中，**-ndm 3** 表示三维，**-ndf 3** 表示每个结点有 3 个自由度。

(5) 节点定义的命令流为：**node \$nodeTag \$posx \$posy \$posz**，其中 **\$nodeTag** 代表节点编号，**\$posx \$posy \$posz** 代表节点的三轴坐标。

**注意：OPENSEES 中所有的编号，包括节点编号，单元编号，材料编号等等，都不可以重复，重复会引起 OPENSEES 出错。**

(6) 弹性材料定义命令流为：**uniaxialMaterial Elastic \$matTag \$E**，其中，为材料编号，为弹性模量值。弹性材料没有开裂、屈服及破坏等过程，因此参数最为简单。

**注意：uniaxialMaterial，意思为单轴材料，OPENSEES 中材料分为单轴材料（单分量材料）及多轴材料。单轴材料一般用于宏观单元，如塑性铰，弹塑性桁架，纤维单元中的纤维束等。**

(7) 桁架单元定义的命令流：**element truss \$eleTag \$iNode \$jNode \$A \$matTag**，其中，**\$eleTag** 为单元编号，**\$iNode** 为开始节点，**\$jNode** 为结束节点，**\$A** 为桁架单元的面积，**\$matTag** 为桁架采用的材料编号。至这一步，分析模型基本建立。

**注意：桁架单元，也称为二力杆，只有存在轴力向量。而杆件的刚度  $k=EA/L$ ，因此只需要提供截面面积  $A$  与切线模量  $E$ ，也是因为这个原因，桁架单元（Truss）不需要定义构件的局部坐标。**

(8) 命令流的第二部分就是结构的分析结果的输出设置，即 Recorder（记录器）。记录节点的变形的命令为：

**recorder Node <-file \$fileName> <-xml \$fileName> <-time> <-node (\$node1**

**\$node2 ...)> <-nodeRange \$startNode \$endNode> <-node all> -dof (\$dof1 \$dof2 ...) \$respType**

其中, **<-file \$fileName><-xml \$fileName>**, 表示输出结果的文件格式, 可以是文本文件 (file), 也可以是网页数据格式 (xml), 也可以是二进制文件 (binary), 这关键看后处理方式采用什么方法读取。

**<-time>**表示第一列输出荷载倍数或时程的时间值。

**<-node (\$node1 \$node2 ...)>**, 表示输出的节点号, 可以每个节点号输入。**-nodeRange \$startNode \$endNode>**, 表示输出一系列结点号, 如从 1 至 55 结点。**<-node all>**, 表示输出全部结点。这三个命令都是定义输出的节点。

**-dof (\$dof1 \$dof2 ...)**表示输出节点的自由度, 从 1~6 可设置。如全部自由度输出为:  
**-dof 1 2 3 4 5 6.**

**\$respType**, 表示输出结点的内容, 包括位移 (disp), 速度 (vel), 加速度 (accel), 位移增量 (incrDisp), 振型值 ("eigen i"), 节点反力 (reaction) 等。本实例输出结点位移为主。

**注意: -time 参数, 在力控制的荷载加载过程分析中, time 表示力的倍数, 如控制分析每步荷载为 0.01, 分析 100 步, 则输出的值为: 0.01, 0.02, …… , 1.00。如采用指定力分布{P}作用下的位移加载控制分析, time 表示力的倍数, 如达到第一步位移  $d_1$  需要荷载为 0.23{P}, 则输出第一个 time 值为 0.23。如果是时程分析, 即输入地震波时程, time 就是每个时间值, 如时间间距为 0.02s, 输出值为 0.02, 0.04, …… , 20.00。**

**\$respType 中, disp 表示节点位移, 即位移全量。Incrdisp 表示位移增量; 速度, 加速度, 为时程分析输出才有意义, 而振型计算需要定义质量源 (mass)。**

实例中: **recorder Node -file node0.out -time -nodeRange 1 18 -dof 1 2 3 disp**, 表示输出第 1 至 18 号节点的 1、2、3 三个平动自由度的位移值到文件 node0.out。

- (9) 输出单元内力命令流: **recorder Element <-file \$fileName> <-time> <-ele (\$ele1 \$ele2 ...)> <-eleRange \$startEle \$endEle> <-ele all> \$eleInfo**

其中, **<-file \$fileName>**定义与节点的定义一样, 表示文件存储格式。**<-time>**与上述致, 不详述。**<-ele (\$ele1 \$ele2 ...)> <-eleRange \$startEle \$endEle><-ele all>**, 以上述类似, 表示记录的单元号, 可以从第 1 个至第 N 个单元, 也可以记示全部单元的信息。

**\$eleInfo** 表示单元输出结果的内容, 包括: globalForce (整体坐标下的单元力向量), localForce (局部坐标下的单元力向量)。一般结构计算、设计会采用局部坐标下的单元力向量, 即 (F1, F2, F3, M1, M2, M3, F 为剪力与轴力, M 为弯矩与扭矩)  
实例中, 命令流为: **recorder Element -file ele0.out -time -eleRange 1 46 localForce**, 表示记录单元 1~46 的单元内力, 内力值为局部坐标内力, 存于文件 ele0.out 中。

**注意: 对于桁架单元, localForce 只能输出轴力 (Axial Force), 即每个单元只输出一个值, 对于框架单元, 一般输出 6 个值。**

- (10) 命令流的第三部分为: 荷载定义。荷载定义必须在分析之前, 因为分析设置中包括对荷载工况的选择。集中力 (点荷载) 的荷载定义的命令流如下所示:

**pattern Plain 1 Linear {**  
**load 13 0.000E+000 0.000E+000 -1.000E+005 0.000E+000 0.000E+000 0.000E+000**

```

load 14 0.000E+000 0.000E+000 -1.000E+005 0.000E+000 0.000E+000 0.000E+000
load 15 0.000E+000 0.000E+000 -1.000E+005 0.000E+000 0.000E+000 0.000E+000
load 16 0.000E+000 0.000E+000 -1.000E+005 0.000E+000 0.000E+000 0.000E+000
}
    
```

首先, **pattern Plain 1** 代表静力荷载工况, 工况编号 1, Linear 代表线性荷载 (默认设置, 具体意见不大)。

**load 13 0.000E+000 0.000E+000 -1.000E+005 0.000E+000 0.000E+000 0.000E+000,** 表示点荷载, 节点编号 13, 其荷载为  $F_X=0, F_Y=0, F_Z=-10000N, M_X=0, M_Y=0, M_Z=0$ 。

**注意: OPENSEES 的命令行, 如有出现子命令, 如荷载工况下的点荷载设置, 纤维截面中的纤维束设置, 都是从命令再进入子命令进行定义, 那么就出现括号 {}。注意出现 “{” 的话, 一定不要在子命令的结束中漏掉括号的右半部分 “}”。**

- (11) 命令流的第四部分, 也就是最后一部分就是分析设置, 分析设置内容用到的弹塑性分析的基本知识较多, 将会在以后的实例讲解中提到并进行讨论。实例中用到命令流是常用于结构在力控制下的静力分析。命令流解释如下:

#### **integrator LoadControl 0.01**

意思: 荷载采用力控制模式, 荷载的分布取决于该命令以上设置的荷载工况 {P}, 每级增加荷载的倍数为 0.01, 即每级增加荷载实际为输入  $0.01\{P\}$ 。

#### **system BandGeneral**

意思: 矩阵带宽处理采用一般 (General) 处理方法。

#### **test EnergyIncr 1e-10 200**

意思: 收敛准则采用能量准则, 容差为  $1e-10$ , 最大迭代步为 200 步。

#### **numberer Plain**

意思: 结点自由度编号采用输入结点的顺序, 为一般结构使用。(如果采用优化后的结点排序, 方便带宽处理, 提高计算效率)。

#### **constraints Plain**

意思: 约束边界处理, 采用一般处理, 即致小数或大数法。(约束也可以采用罚函数或拉格朗日处理方法)。

#### **algorithm Linear**

意思: 迭代算法采用线性法, 一般用于处理弹性结果。

#### **analysis Static**

意思: 结构计算为静力分析, 即非时程 (动力) 分析。

#### **analyze 1**

意思: 分析荷载总步数为 100 步, 即结合原来的每步荷载倍数 0.01, 总共输入荷载为  $0.01 \times 100 = 1.0\{P\}$ 。

## 6) OPENSEES 分析及分析结果

- (1) ETO 生成的命令流，做两处修改：

体系改为三维桁架体系：

**model basic -ndm 3 -ndf 3**

增加记录节点 5 的位移，保存于 node5.out 文件中：

**recorder Node -file node5.out -time -node 5 -dof 1 2 3 disp**

- (2) 将上述的命令流保存为文件“Exam01.tcl”，或打开光盘目录“/EXAM01/OPENSEES/”，找到“Exam01.tcl”文件。

- (3) 打开 OpenSEES 程序，如下图所示，输入命令：

**source Exam01.tcl**

能够保证上述命令运行成功的前提是，OPENSEES.exe 执行程序与 Exam01.tcl 在同一个目录下，如果不是，需要输入 Exam01.tcl 所在的全目录，如：

**source D:\OPENSEES\_EXAMPLE\Exam01\Exam01.tcl**

运行后，OPENSEES 界面如下图所示：

```

OpenSees -- Open System For Earthquake Engineering Simulation
Pacific Earthquake Engineering Research Center -- 2.3.1

(c) Copyright 1999,2000 The Regents of the University of California
All Rights Reserved
(Copyright and Disclaimer @ http://www.berkeley.edu/OpenSees/copyright.html)


OpenSees > source exam01.tcl
System
restraint
node
material
transformation
element
recorder
loading
analysis
0
OpenSees > ^P
    
```

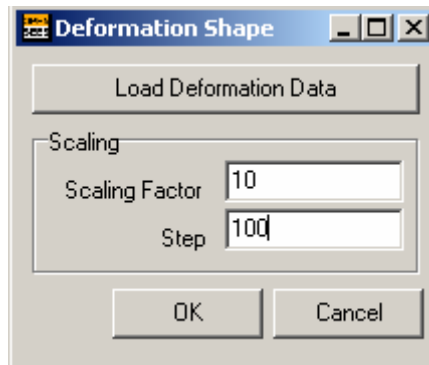
图 OpenSEES 运行界面图

- (4) OPENSEES 得到分析结果有结点位移及单元内力。打开 node5.out 可以查看 5 号节点的平动位移值，从最后一行，如下，可知 5 号节点的竖向位移为-1.63mm，与 ETABS 的分析结果一致。

**1 6.52256e-018 -0.377547 -1.65348**

- (5) 采用 ETO 显示结构变形：打开 OPENSEES 的前后处理程序 ETO，导入 Exam01.s2k

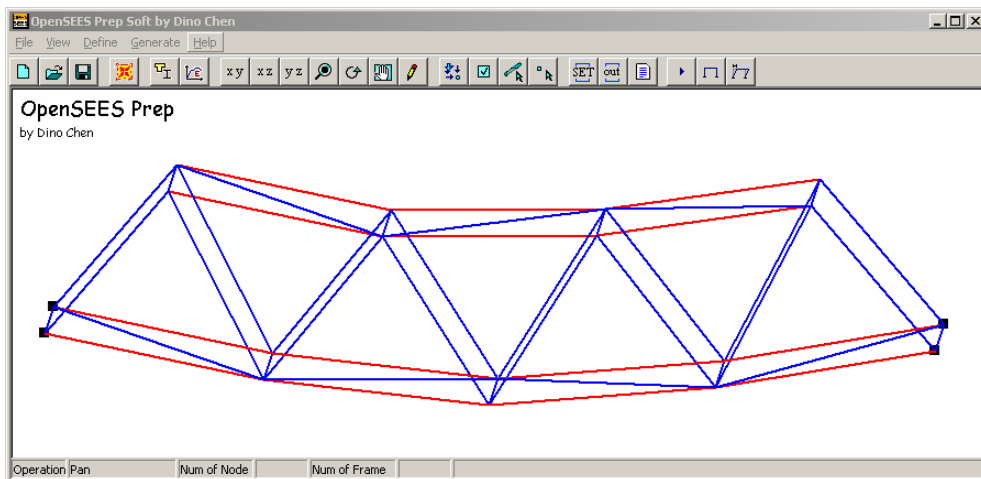
文件。点击按钮 ，显示结构变形。弹出窗口如下图所示。



位移显示窗口

输入显示第 100 步的变形结果,输入变形显示放大倍数为 10,点击【Load Deformation Data】,选取 Exam01.tcl 文件,程序自动读取全部结点位移文件,输出变形形状,如下图所示。变形形状与 ETABS 弹性分析结果一致。

**注意：本书会常采用不同软件、不同算法或不同模型对一个结构进行分析，这是一种 APPLE TO APPLE 的对比方法，这样可以更好的理解程序或模型。**



ETO 显示结构变形图

## 7) 知识点回顾：

- (1) 应用 ETO 程序，先在 ETABS 建模，再导成 OPENSEES 命令流；
- (2) 了解整个 OPENSEES 命令流的格式在常用的命令流；
- (3) 节点建模、节点约束、弹性材料、桁架单元、节点单元输出设置、点荷载设置及分析工况设置等基本命令；
- (4) 学习查看输出结果，并与 ETABS 进行对比，采用 ETO 程序后处理，显示结构变形。