

第五章 空腹钢桁架有限元分析（四）

为了分析应力集中，在建立模型应力集中处采用0.008单元尺寸，在其他部位采用0.016单元尺寸。在两种单元交接的地方，用过渡单元形式将两种单元连接在一起，程序自动生成金字塔形的单元。

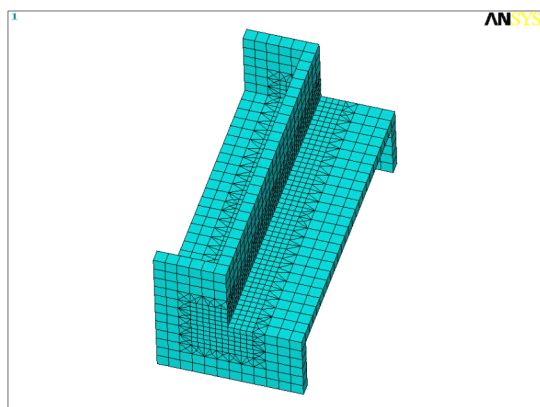


图 1.15a 节点网格划分情况

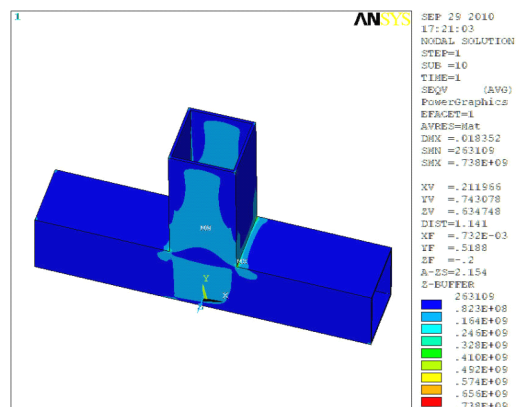


图 1.15b 节点综合应力云图

由上图可以看出，在应力集中处划分更细的网格使得应力集中情况更加明显，出现不真实的应力情况，使得结构计算结果不准确。在实际分析中，常采用热点应力的外推的方法求解应力集中处的应力。

热点应力的概念：热点应力指最大结构应力或“结构中危险截面上危险点应力”。结构应力(或几何应力)指根据外载荷用简单(线弹性)力学公式以及类似的近似公式或有限元(划分有限元网格时只模拟结构整体尺寸，不反映局部细微尺寸变化，即不划分局部缺口或裂纹的有限元网格)计算求得的结构中的工作应力，不包括焊缝形状、裂纹、缺口等引起强烈局部应力集中，只依赖于构件接头处的宏观尺寸和载荷参量。

热点应力的外推原理：热点应力呈线性分布，一般用外推的方法得到。为避开非线性应力峰值的影响，外推测量点应该距离焊趾有足够的距离。一般在距离焊趾 $0.4t$ (t 为主板的厚度)处，非线性应力峰值基本消失，外推点应该从这个位置开始。热点应力一般采用两点线性外推。国际焊接学会推荐的外推方法：在距离焊趾 $0.4t$ 和 $1.0t$ 处测量应力值，进行两点线性外推。

根据上述有限元模型进行结构分析，发现腹杆与下弦杆件相交处为应力集中区域。方钢管之间为焊接连接，设焊脚尺寸为 $t=16\text{mm}$ ，由焊缝应力分布可知在焊趾处为结构的热点。下图为在下弦上部平面上由 32mm 处相热点处画出的等效力路径图。可以看出，在焊缝处结构应力出现突然增长的趋势。

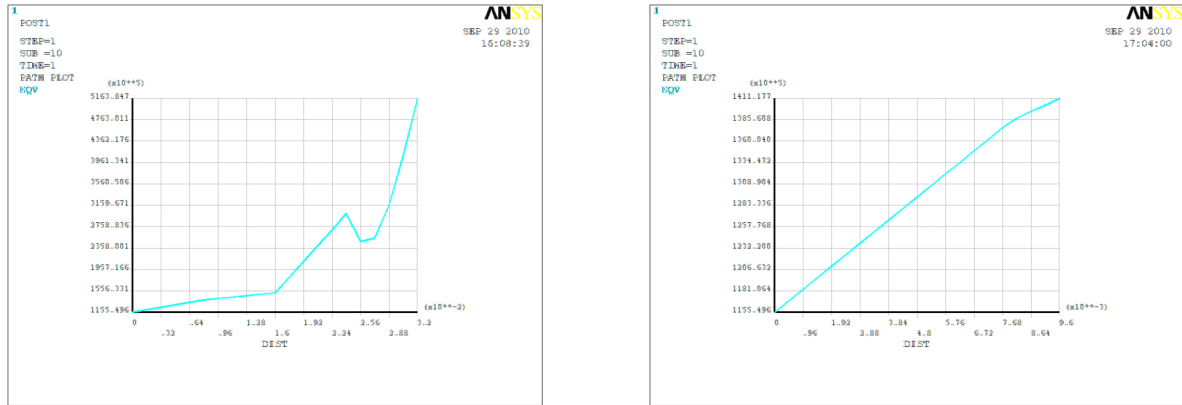


图 1.16 提取 0.4t 和 1.0t 节点处综合应力值，画出应力路径图

$\sigma_{0.4t}=115.5\text{MPa}$, $\sigma_{1.0t}=141.1\text{MPa}$, 则焊趾处应力通过线性插值为: $\sigma_{1.0t}=158.2\text{MPa}$

提取节点三个主应力见图 1.15 所示:

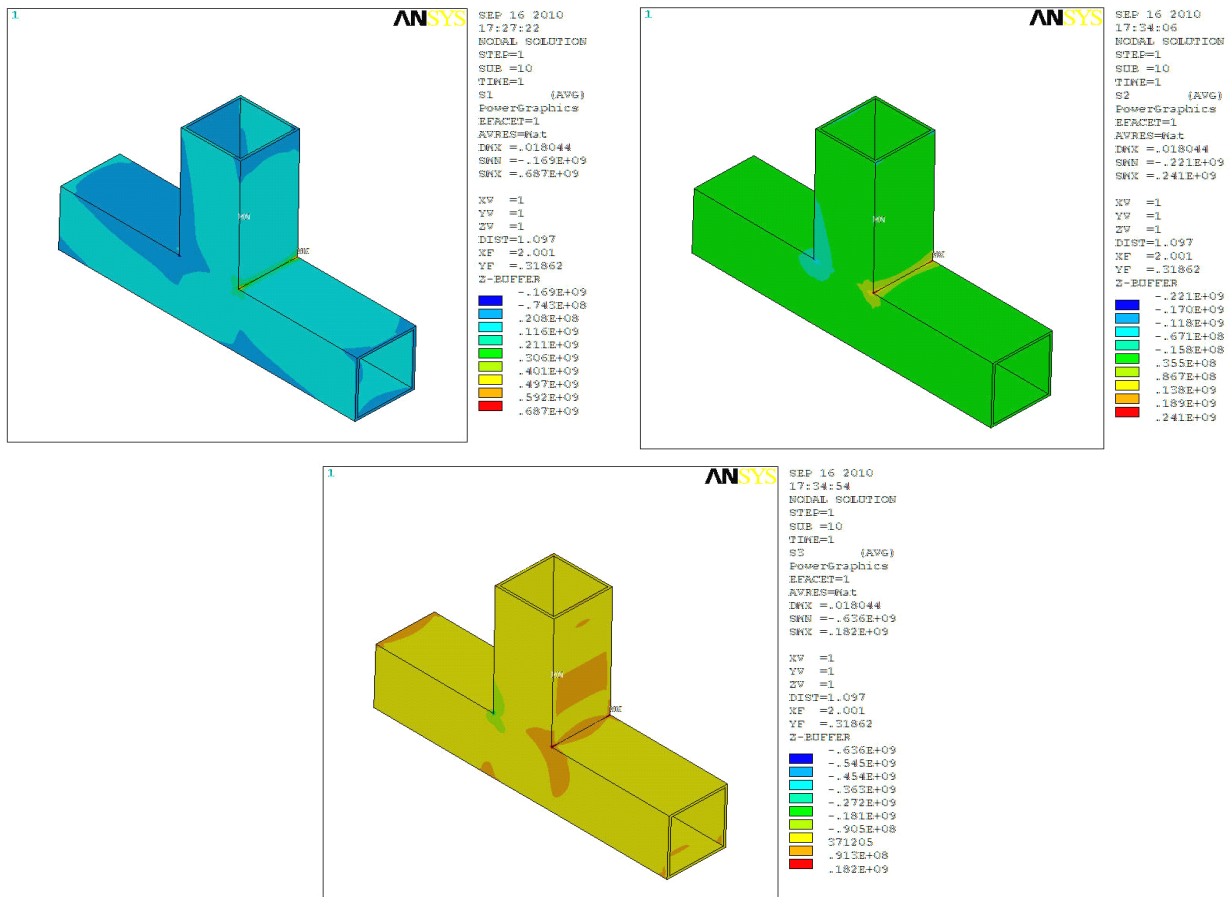


图1.17节点主应力云图

节点三个主应力的值为 $\sigma_1=687\text{MPa}$, $\sigma_2=241\text{MPa}$, $\sigma_3=182\text{MPa}$, 均位于腹杆和下弦杆连接远离支座节点处。同时,对单独节点分析模型相应的受力进行了分析。其结果见下图所示:

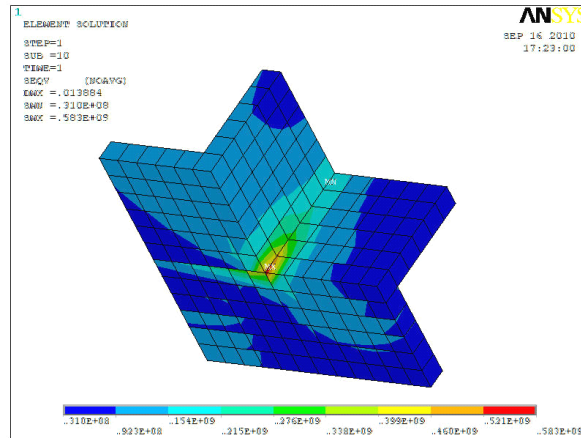


图 1.18 节点细部 Mises 等效应力云图

该节点的Mises等效应力最大值为583MPa。提取该单独节点的两个主应力如下图所示：

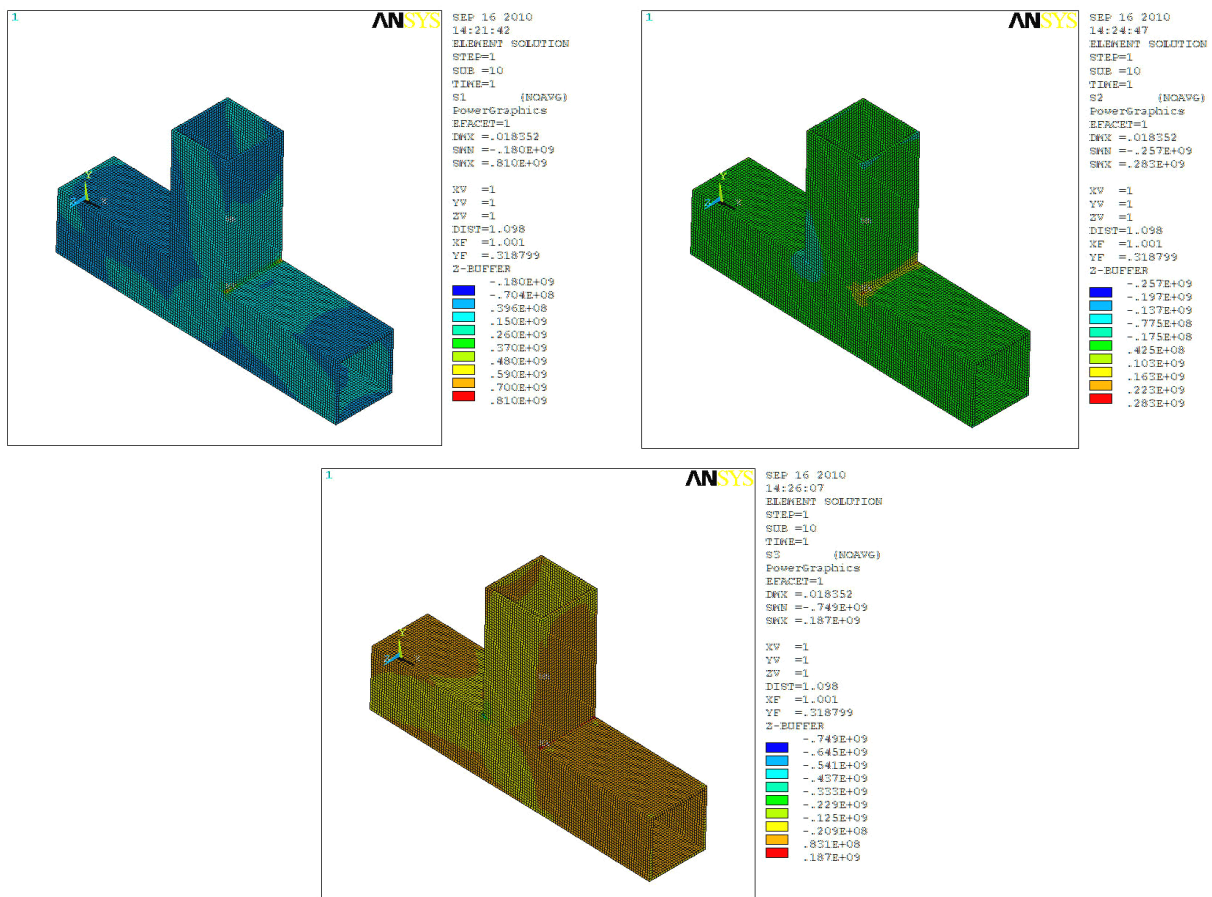


图1.19节点主应力云图

节点三个主应力的值为 $\sigma_1=810\text{MPa}$ ， $\sigma_2=283\text{MPa}$ ， $\sigma_3=187\text{MPa}$ ，均位于腹杆和下弦杆连接远离支座节点处。与上述整体精细化模型比较，应力值有所增加，其中第一主应力增加较为明显。

为验证精细化模型和节点分析模型的准确性，特提取 BEAM189 梁单元模型模型中截面

一、截面二，截面三（截面位置如下图所示）的内力和应力，并运用力学方法计算得出该截面的正应力，将其与实体单元建模相应截面的应力进行对比。运用内力计算截面最大正应力的公式如下：

$$I_{zz} = \frac{1}{12}(bh^3 - b'h'^3) \quad W = \frac{I_{zz}}{y} \quad \sigma = \frac{M}{W} + \frac{F_N}{A}$$

式中 $b=h=400\text{mm}$ ， $b'=h'=368\text{mm}$ ， y 的值为 200mm ，截面面积 $A=400 \times 400\text{mm}^2 - 368 \times 368\text{mm}^2 = 24576\text{mm}^2$

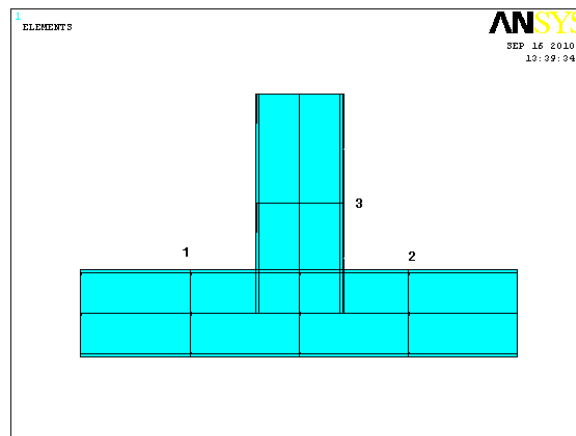


图 1.20 节点截面选取示意图

表三 节点截面应力计算表：（单位：kN，MPa）

	截面一	截面二	截面三
剪力 V	253.75	214.18	413.90
弯矩 M	101.78	797.37	208.53
轴力 N	280.88	694.78	366.87
正应力 σ （公式计算）	44.87	54.15	70.40
正应力 σ （BEAM189 模型）	45.07	54.63	70.42
正应力 σ （SHELL63 模型）	45.30	57.1	76.5
正应力 σ （节点模型）	46.1	57.2	76.5
正应力 σ （精细化模型）	45.02	55.8	71.8

由上表可以看出，精细化模型的应力比 BEAM189 模型的应力略大，但属于误差范围之内。这说明精细化模型和节点模型可以满足结构计算要求。

节点位移计算结果：

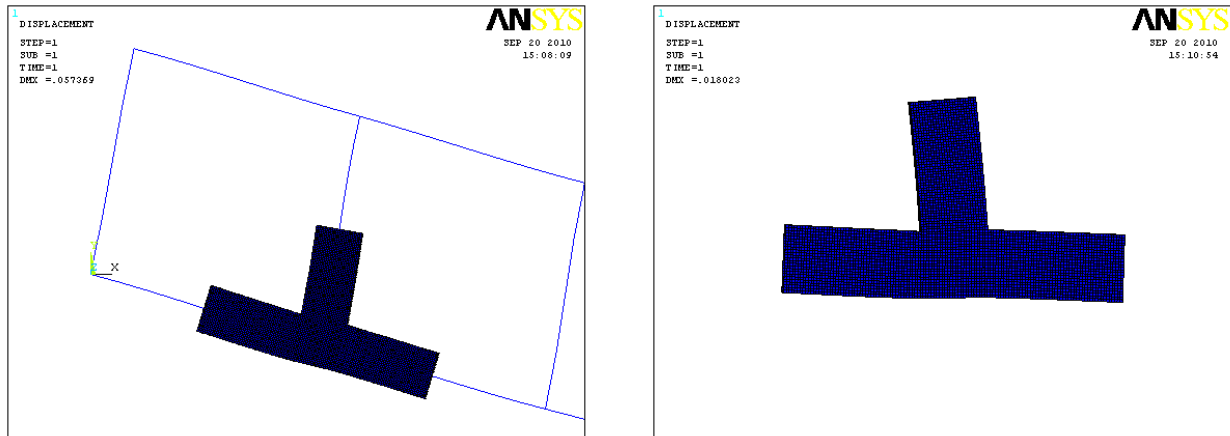


图 1.21 节点变形前后对比图（变形缩放系数为 50）

表四：空腹钢桁架精细化模型轴向位移（单位：mm）

节点编号	精细化模型			BEAM189模型		
	UX	UY	UZ	UX	UY	UZ
1	0.055	-6.02	0	0.056	-6.05	0
2	0.25	-18.30	0	0.23	-18.20	0
3	3.86	-12.24	0	3.93	-12.22	0

由上表可以看出，精细化模型位移与 BEAM189 模型差距不大，属于误差范围之内
附：静力分析命令流如下（beam189+solid95）

```

/clear
wprota,,90
/prep7
asbw,all
k,1
wpoff,,,-0.368
k,2,0.2
asbw,all
k,3,0.2,0.4
arsym,x,all
k,4,0,0.4
wpcsys
a,1,2,3,4
aglu,all
blc4,,0.016,0.184,0.368
et,1,plane82
asba,1,2
lesize,all,,1
wpoff,0.184
amesh,all
wprota,,90
secwrite,mybox
asbw,all
finish
wpoff,,0.016
/clear
    
```

```
/prep7                                *do,i,32,61
et,1,beam189                          l,i,i+1
et,2,solid95                          *enddo
et,3,mesh200,6                        latt,1,,1,,1000,,1
mp,ex,1,2.06e11                       lesize,all,,,2
mp,dens,1,7800                        latt,1,,1,,1000,,1
mp,prxy,1,0.28                        lmesh,all
mp,ex,2,2.06e11                       lsel,u,,,all
mp,prxy,2,0.28                        allsel,all
mp,dens,2,7800                        wpoofs,1
sectype,1,beam,mesh                  wprota,,, -90
secread,mybox,,,mesh                blc5,0,0,0.4,0.4
k,1000,5,5                            blc5,0,0,0.368,0.368
k,1                                    asba,1,2
k,31,30                               esize,0.016
kfill,1,31,29,,,1                   amesh,all
k,32,,2                               esize,,125
k,62,30,2                             vext,all,,,2
kfill,32,62,29,,,1                 wpstyl,defa
k,63,2,1                             wpoofs,2,0.2
l,1,2                                 wprota,, -90
l,63,34                              blc5,0,0,0.4,0.4
l,1,32                              blc5,0,0,0.368,0.368
*do,i,5,31,2                         asba,11,12
l,i,i+31                             esize,0.016
*enddo                               amesh,13
*do,i,4,30                           esize,,63
l,i,i+1                              vext,13,,,,1
*enddo                               allsel,all
```

```

nummrg,all          FITEM,2,-148
numcmp,all          SFBEAM,P51X,1,PRES,30000,,,,,
wpstyl,defa        allsel,all
!刚性区域          nsel,s,node,,1
nsel,s,loc,x,1      nsel,a,node,,3,7,1
nsel,r,loc,y,-0.2,0.2  nsel,a,node,,9,118,1
cerig,2,all        !连接点位于梁单元上  nsel,a,node,,120,432,1
nsel,s,loc,x,3      d,all,uz
nsel,r,loc,y,-0.2,0.2  allsel,all
cerig,119,all      d,1,ux
nsel,s,loc,y,1      d,1,uy
nsel,r,loc,x,1.8,2.2  d,112,uy
cerig,8,all        allsel,all
/solu              acel,,10
FLST,2,60,2,ORDE,2  antype,0
FITEM,2,89         wpstyl,,,,,,,,2
                    solve
    
```

1.4.3 屈曲分析

本文进行了恒载与活载共同作用下的屈曲分析：ANSYS在工程分析中常常需要求解在恒载作用下活载的屈曲荷载，而不是“恒载+活载”的屈曲荷载，对于施加了不同类型的荷载，应将所有荷载按该荷载系数缩放即为屈曲荷载。将得出的屈曲荷载系数代入公式可以得出屈曲荷载，计算公式如下：

$$\text{屈曲荷载} = \text{恒载} + \text{屈曲荷载系数} \times \text{活载}$$

本文中作用于梁上的恒载取20kN/m，活载取10kN/m，计算活载作用下的屈曲荷载系数如下：

表五：有限元空腹钢桁架模型屈曲系数与屈曲荷载

模型单元	一阶屈曲荷载系数	屈曲荷载系数×活载	恒载+屈曲荷载系数×活载
BEAM3	268	2680kN	2700kN
BEAM4	268	2680kN	2700kN
BEAM44	158	1580kN	1600kN
BEAM188	162	1620kN	1640kN
BEAM189	162	1620kN	1640kN
BEAM189+SOLID95	129	1290kN	1310kN

由上表可以看出，由 BEAM3/BEAM4 单元建立的 Euler 梁模型一阶屈曲荷载系数要高于 BEAM44/BEAM188/BEAM189 单元 Timoshenko 梁模型。在上表统计的数据中，考虑了剪切变形的 Timoshenko 梁元 BEAM44/BEAM188/BEAM189 的计算结果更接近于真实值。

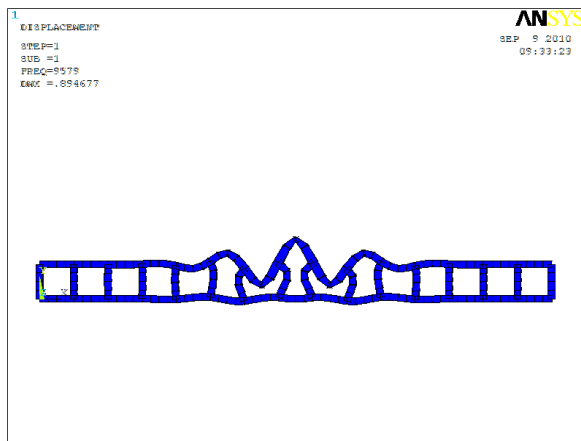


图 1.22a ANSYS 一阶屈曲模态

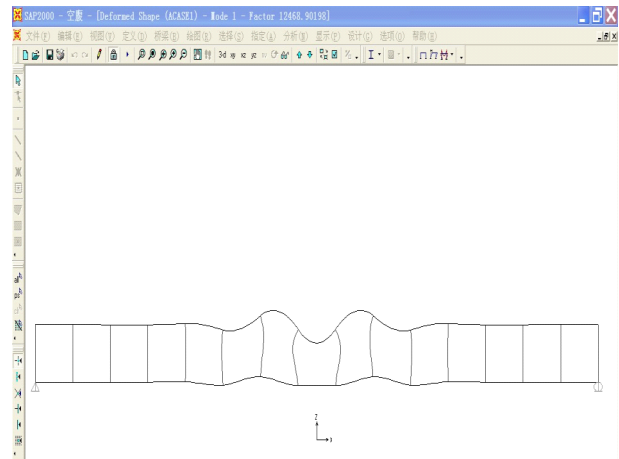


图 1.22b SAP2000 一阶屈曲模态

附：屈曲分析命令流如下（beam188）

```

/prep 7
et,1,beam188
keyopt,1,4,2
keyopt,1,3,2
sectype,1,beam,hrec
secdata,0.4,0.4,0.016,0.016,0.016,0.016
mp,ex,1,2.06e11 !Q235钢材
mp,prxy,1,0.28
mp,dens,1,7800
!!!建立结构几何模型

k,1
kgen,16,1,,,2,,,1
kgen,2,1,16,,,2,,16
*do,i,1,15
l,i,i+1
*enddo
*do,i,1,15
l,i+16,i+17
*enddo
*do,i,1,16
    
```



```
l,i,i+16                                finish
*enddo                                  /solu
latt,1,1,1,1,,,,1                       antype,buckle
allsel                                    bucopt,lanb,5
lesize,all,0.5                           mxpand,5
lmesh,all                                 outres,all,all
lsel,u,,,all                              solve
/solu                                     finish
nsel,s,loc,y,2                            /post1
esln,s,1                                  set,list
cm,huozai,elem
sfbeam,huozai,2,pres,10e3
allsel,all
nsel,s,loc,y,2
cm,hengzai,node
f,hengzai,fy,-10e3
allsel,all
pstres,on
d,all,uz
d,1,ux
d,1,uy
d,58,uy
allsel,all
acel,,10
antype,0
time,1
nsub,10,20,5
outres,all,all
solve
```