

第四章 空腹钢桁架有限元静力分析

1.1 问题描述

如下图 1 所示的空腹钢桁架，梁截面形式采用箱型截面，尺寸 $400 \times 400 \times 16$ （单位： mm ），梁的跨度为 $L=15 \times 2\text{m}=30\text{m}$ ，采用 Q235 级钢，弹性模量为 $2.06 \times 10^{11}\text{MPa}$ ，泊松比为 0.28，密度为 $7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。该空腹钢桁架上弦梁受竖向均布荷载 30kN/m ，边界条件按照两种情况施加相应约束：a. 在上下端部施加固定铰支座 b. 仅在下弦杆端部施加固定铰支座（均只约束其平动自由度，不约束转动自由度），约束施加情况分别如下图所示，本章我们对此两钢桁架梁分别进行了静力分析、模态分析以及屈曲分析。

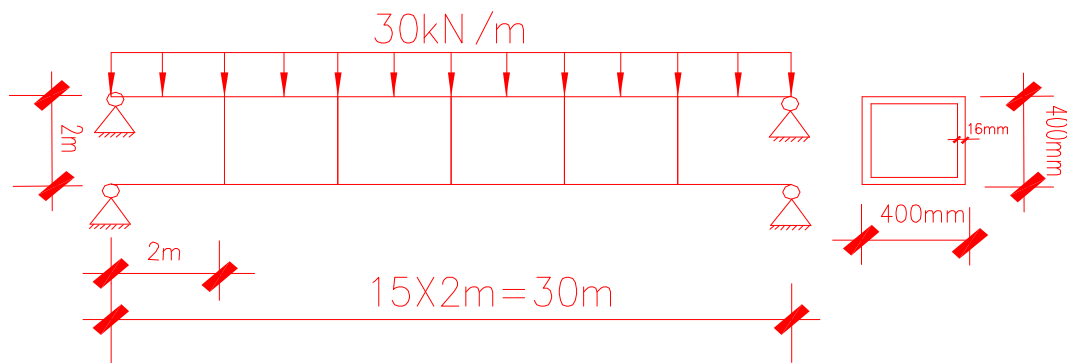


图 1.1 空腹钢桁架模型一

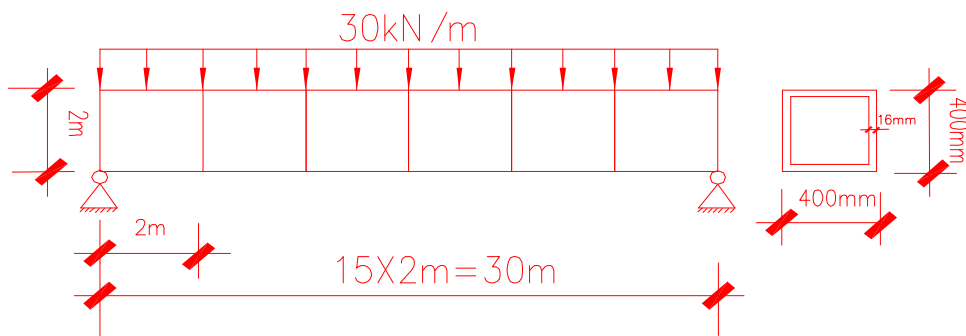


图 1.2 空腹钢桁架模型二

1.2 空腹钢桁架静力分析

1.2.1 采用 BEAM44/189 单元进行建模计算

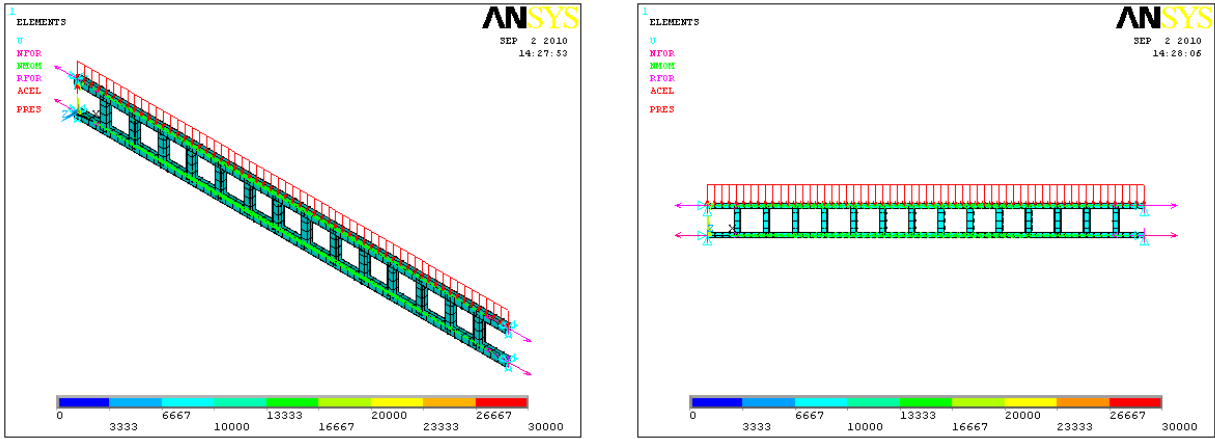


图 1.3 空腹钢桁架一有限元模型

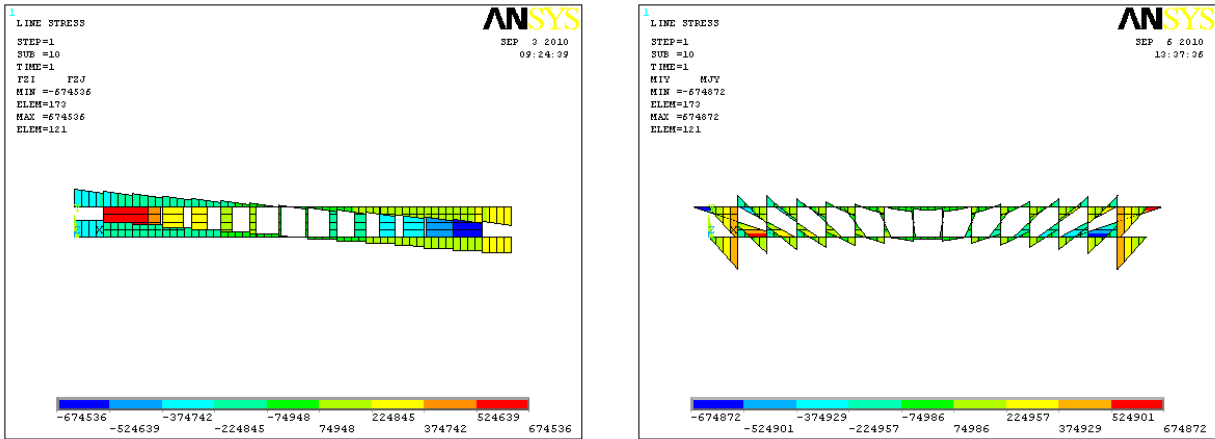


图 1.4a BEAM44 模型一剪力图

图 1.4b BEAM44 模型一弯矩图

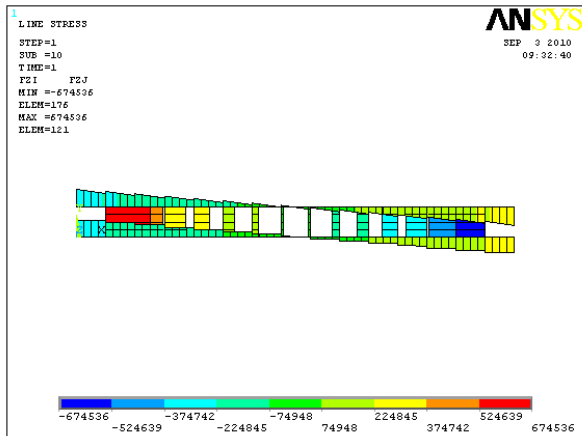


图 1.5a BEAM189 模型一剪力图

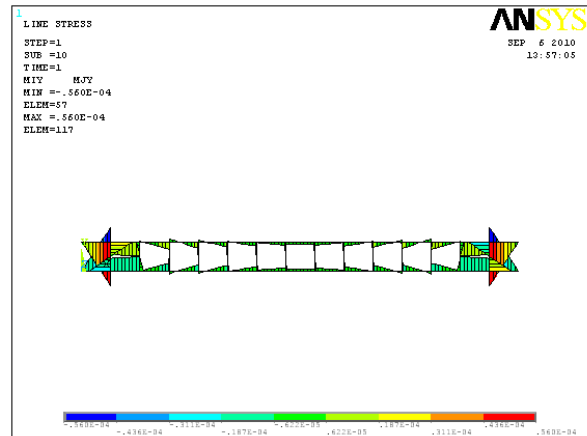


图 1.5b BEAM189 模型一弯矩图

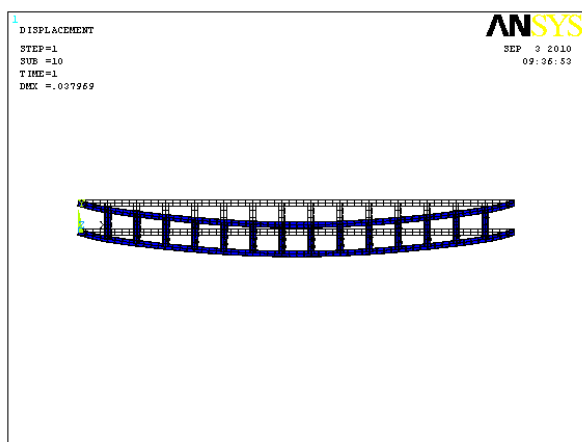


图 1.6a BEAM44 模型位移图

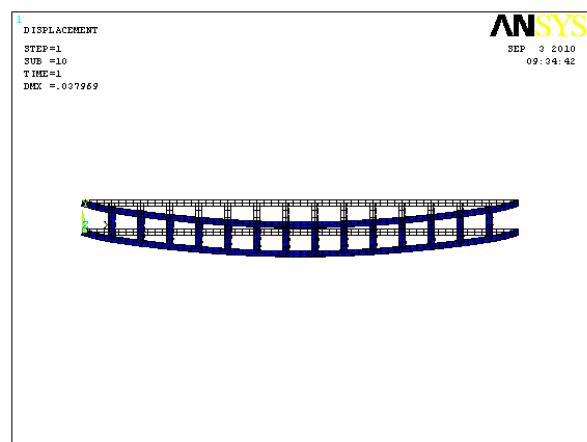


图 1.6b BEAM189 模型位移图

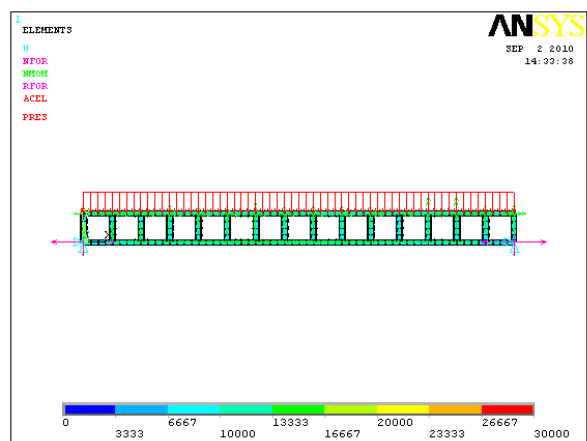
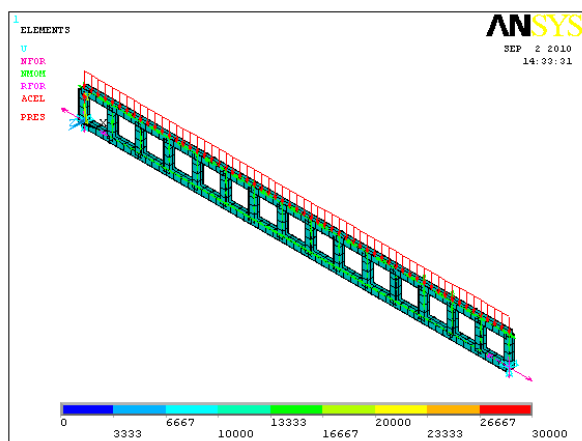


图 1.7 空腹钢桁架模型二有限元模型

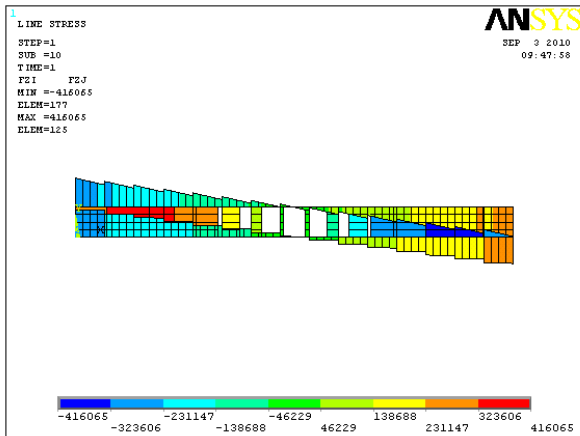


图 1.8a BEAM44 模型二剪力图

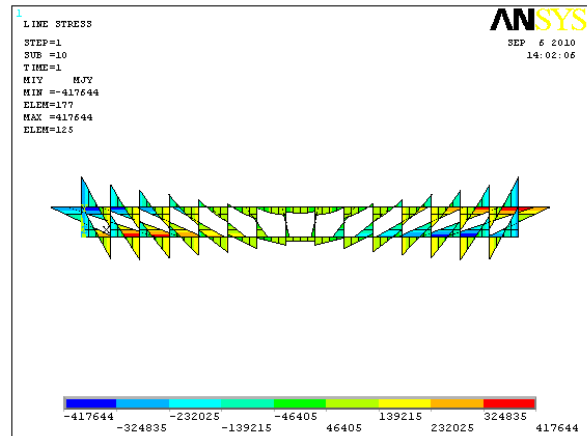


图 1.8b BEAM44 模型二弯矩图

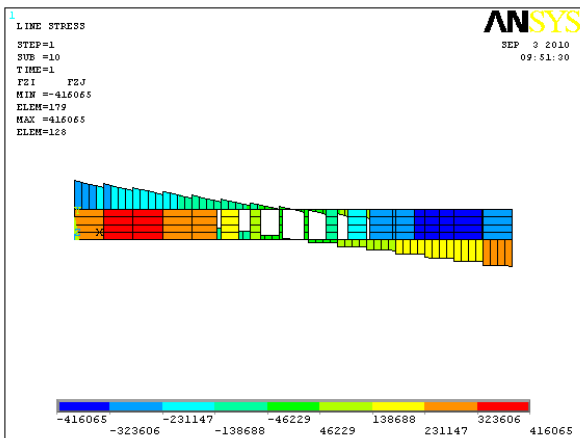


图 1.9a BEAM189 模型二剪力图

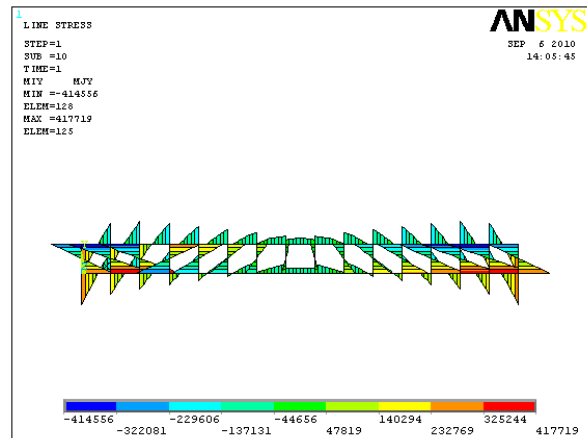


图 1.9b BEAM189 模型二弯矩图

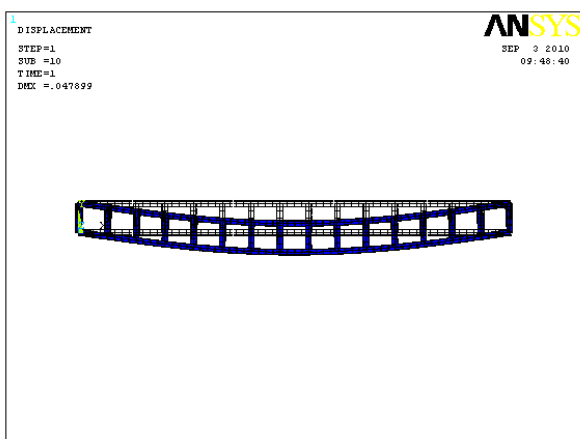


图 1.10a BEAM44 模型位移图

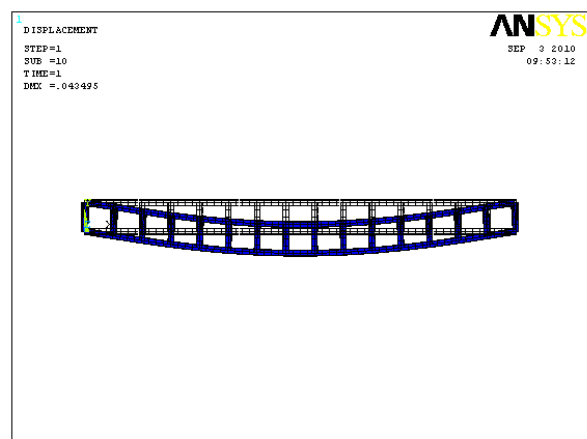


图 1.10b BEAM189 模型位移图

从上图可以看出，对空腹钢桁架模型一/二有限元模型进行静力分析有以下结论：

1、采用 BEAM44 以及 BEAM189 单元均可以很好的模拟此类梁，利用此两种单元对该梁进行有限元分析，得到的结果相同。

2、空腹钢桁架有限元模型一最大弯矩为 $674.87 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，最大剪力为 674.54 kN ，跨中位

移为 37.97mm。

3、空腹钢桁架有限元模型二最大弯矩为 417.64 kN·m，最大剪力为 416.07kN，跨中位移为 43.50mm。

附：静力分析命令流如下（模型一）：

```
!BEAM44 单元建模                                lsize,all,0.5
!单位 N, m                                       lmesh,all
/prep 7                                           lsel,u,,,all
et,1,beam44                                       /solu
!进行 beam189 分析 et,1,beam189                 nsel,s,loc,y,2
sectype,1,beam,hrec                               esln,s,1
secdata,0.4,0.4,0.016,0.016,0.016,0.016       sfbeam,all,2,pres,30e3
mp,ex,1,2.06e11 !Q235 钢材参数                 nsel,s,loc,x,0
mp,dens,1,7800                                    d,all,ux
mp,prxy,1,0.28                                   d,all,uy
                                                d,all,uz
!!!建立结构几何模型                             nsel,s,loc,x,30
k,1                                                d,all,ux
kgen,16,1,,,2,,,1                               d,all,uy
kgen,2,1,16,,,2,,16                            d,all,uz
*do,i,1,15                                       allsel,all
l,i,i+1                                           acel,,10
*enddo                                             antype,0
*do,i,1,15                                       time,1
l,i+16,i+17                                       nsub,10,20,5
*enddo                                             outres,all,all
*do,i,2,15                                       solve
l,i,i+16                                           save
*enddo                                             /post1
latt,1,1,1,,,1                                       etable,miy,SMISC,6 !Mz 弯矩
allsel,all                                           etable,mjy,SMISC,12
```

plls,miy,mjy

etable,Fzi,SMISC,2 !剪力

etable,Fzj,SMISC,8 !

plls,Fzi,Fzj,-1

/post1

pldisp,1,0 !变形图

1.2.2 采用 BEAM4 单元进行建模计算

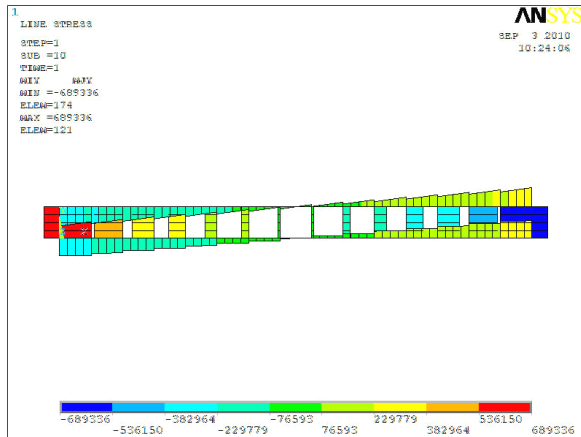


图 1.11a BEAM4 模型一剪力图

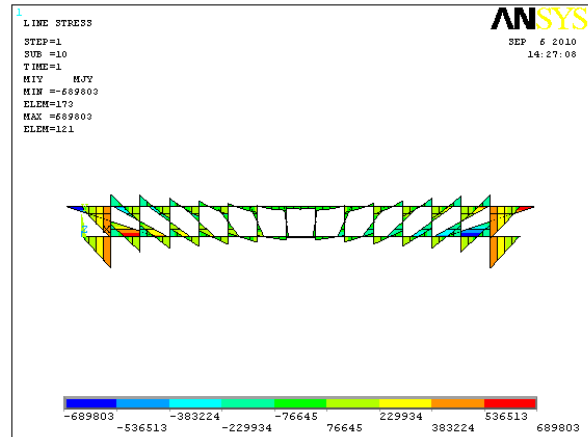


图 1.11b BEAM4 模型一弯矩图

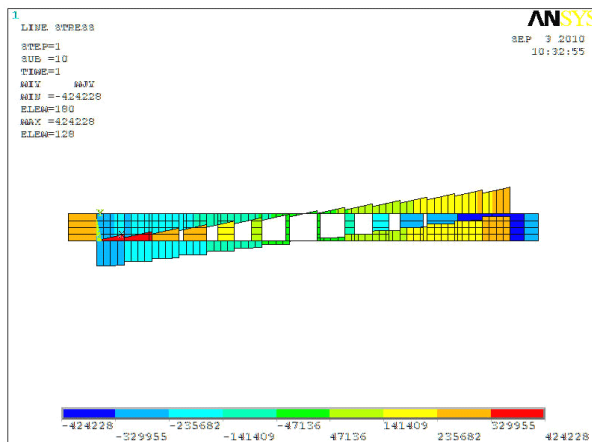


图 1.12a BEAM4 模型二剪力图

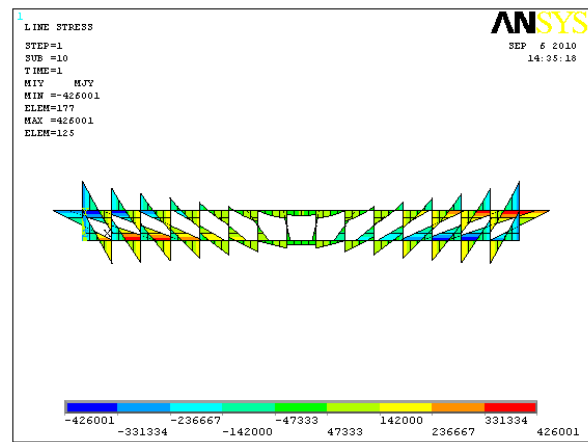


图 1.12b BEAM4 模型二弯矩图

从上图可以看出，用 BEAM4 对空腹钢桁架简支梁模型一/二有限元模型进行静力分析有以下结论：

1、采用 BEAM4 单元进行模型时，没有赋予剪切变形不均匀系数，没有考虑剪切变形的影响，计算结果与 BEAM44/189 单元结果有差距。

2、空腹钢桁架 BEAM4 单元有限元模型一最大弯矩为 689.34 kN·m，最大剪力为 689.80kN，跨中位移为 30.27mm。

3、空腹钢桁架 BEAM4 单元有限元模型二最大弯矩为 426.00kN·m，最大剪力为

424.23kN，跨中位移为 36.80mm。

4、相对于 BEAM189 单元，BEAM4 单元计算出的内力偏大，位移偏小。

1.3 空腹钢桁架模态分析

运用 ANSYS 对所建立的空腹钢桁架一/二模型进行模态分析。采用了 BEAM4/44/189 单元得出其自振频率与振型见下表所示：

表一：空腹钢桁架一模型模态计算数据

阶数	振型	BEAM189	BEAM44	BEAM4
1	上下振动	7.17	7.17	8.04
2	上下二阶	14.63	14.63	16.35
3	上下三阶	24.33	24.33	27.40
4	上下四阶	35.27	35.27	40.13
5	上下五阶	47.39	47.38	54.24
6	上下六阶	60.65	60.61	69.63
7	轴向振动	69.59	69.61	69.79
8	上下八阶	75.05	74.99	86.36
9	上下九阶	90.53	90.43	104.41
10	上下十阶	106.97	106.80	123.70

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =1
FREQ=7.167
DMX =1

ANSYS
SEP 3 2010
10:05:52
1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =2
FREQ=14.627
DMX =.999776

ANSYS
SEP 3 2010
10:06:42

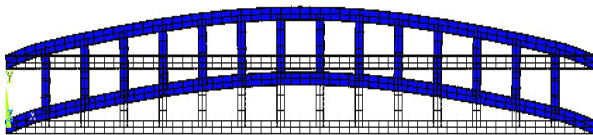


图 1.13a BEAM44/189 模型一振型图（一阶）

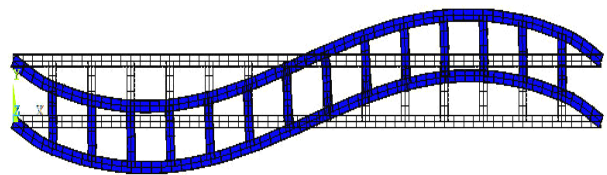


图 1.13b BEAM44/189 模型一振型图（二阶）

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =3
FREQ=24.33
DMX =1.004

ANSYS
SEP 3 2010
10:08:17

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =4
FREQ=35.273
DMX =1

ANSYS
SEP 3 2010
10:08:54

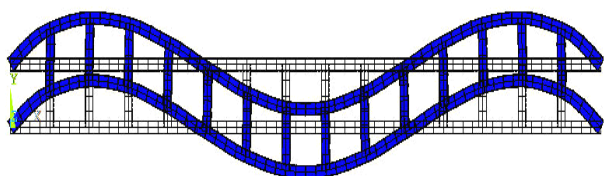


图 1.14a BEAM44/189 模型一振型图（三阶）

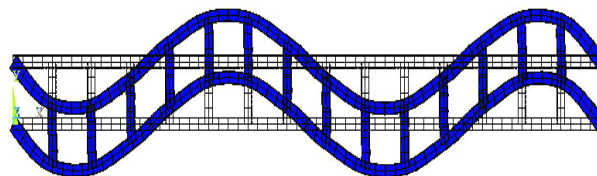


图 1.14b BEAM44/189 模型一振型图（四阶）

表二：空腹钢桁架二模型模态计算数据

阶数	振型	BEAM189	BEAM44	BEAM4
1	上下振动	6.76	6.76	7.33
2	上下二阶	16.19	16.19	18.14
3	上下三阶	27.47	27.47	31.65
4	上下四阶	38.49	38.50	44.03
5	上下五阶	46.27	46.27	50.50
6	上下六阶	51.34	51.35	59.69
7	轴向振动	64.81	64.83	75.43
8	上下八阶	78.77	78.80	91.11
9	上下九阶	91.67	91.70	97.63
10	上下十阶	94.15	94.20	109.51

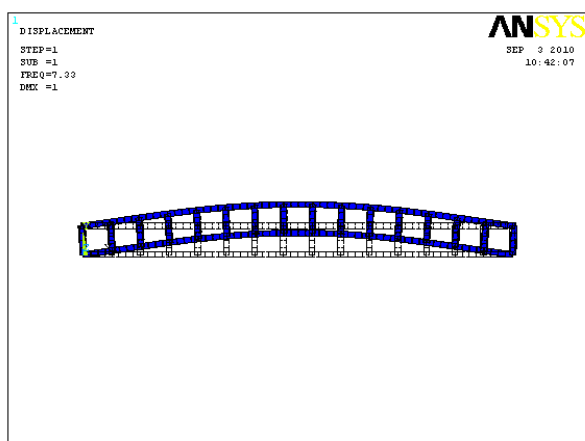


图 1.15a BEAM 系列模型二振型图（一阶）

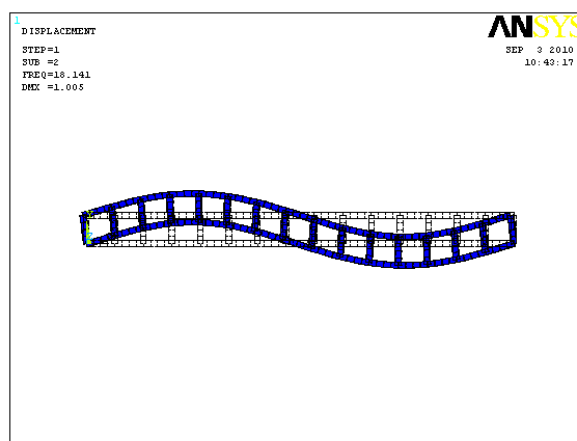


图 1.15b BEAM 系列模型二振型图（二阶）

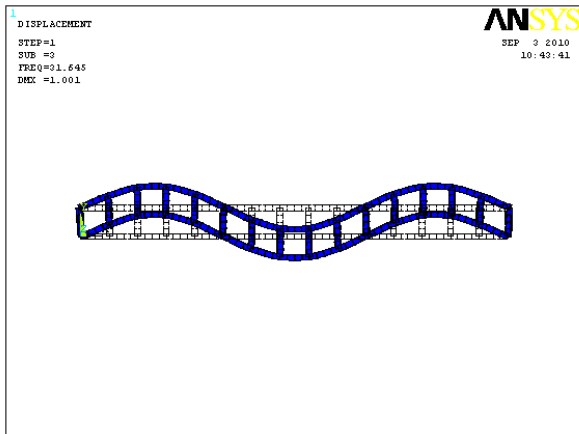


图 1.16a BEAM 系列模型二振型图（三阶）

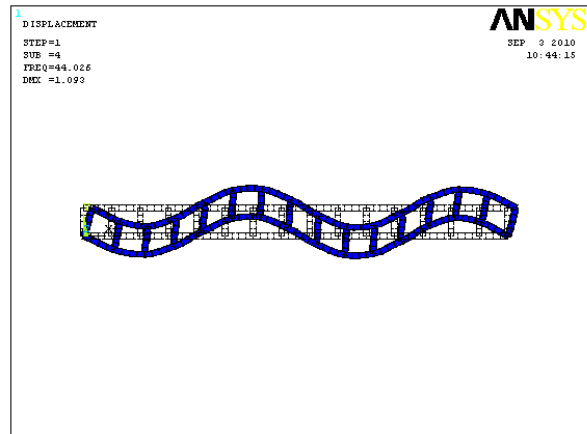


图 1.16b BEAM 系列模型二振型图（四阶）

以上两种模型约束了所有节点平面外的平动自由度，支撑处均为简支梁支撑形式。由上述结果可以看出，采用三种不同单元的模型振型均相同。Timoshenko 梁的频率低于 Euler 梁频率，且振型阶数越高，下降越明显。BEAM44 为 Euler 梁通过剪切变形不均匀系数计算的结果，与 Timoshenko 梁结果十分接近。

1.4 空腹钢桁架屈曲分析

1.4.1 结构失稳分类

结构失稳或结构屈曲是指当结构所受载荷达到某一值时，若增加一微小的增量，则结构的平衡将发生很大的改变，这种现象叫做结构失稳或结构屈曲。结构稳定问题一般分为两类，结构的弹性稳定分析为第一类稳定问题：

第一类失稳：又称平衡分岔失稳、分枝点失稳、特征值屈曲分析。结构失稳时相应的荷载可称为屈曲荷载、临界荷载、压屈荷载。

第二类失稳：结构失稳时，平衡状态不发生质变，也称极值点失稳。结构失稳时相应的荷载称为极限荷载或压溃荷载。

1.4.2 ANSYS 特征值屈曲分析（Buckling Analysis）

1、ANSYS进行特征值屈曲分析在创建模型阶段应注意：

(1) 特征值屈曲分析仅考虑线性行为。若定义了非线性单元将按线性单元处理。刚度计

算基于初始状态，并在后续计算中保持不变。

(2) 特征值屈曲必须定义材料的弹性模量或某种形式的刚度。非线性性质即便定义了也将被忽略。

(3) 单元网格密度对屈曲荷载系数影响较大。例如采用结构自然节点划分时（一个构件仅划分一个单元）可能产生100%的误差甚至出现错误结果，尤其对高阶屈曲模态的误差可能更大，其原因与形成单元应力刚度矩阵有关。经验表明，仅关注第一阶屈曲模态及其屈曲荷载系数时，每个自然杆应不少于三个单元。本文将每个自然杆划分为四个单元，单元长度为0.5m。

2、ANSYS进行特征值屈曲分析前需进行静力计算，此时应注意：

(1) 必须激活预应力效应：命令PSTRES设为ON便可考虑预应力效应。

(2) 由屈曲分析所得到的特征值是屈曲荷载系数，而屈曲荷载等于该系数乘以所施加的荷载。若施加单位荷载，则该屈曲荷载系数就是屈曲荷载。

(3) ANSYS容许的最大特征值是1000000。若求解时特征值超过此限值，可施加一个较大的荷载值。

3、ANSYS进行特征值屈曲分析获得特征值屈曲解的过程：

(1) 进入求解层：

命令格式：/solu

(2) 定义分析类型：

命令格式：ANTYPE, BUCKLE或ANTYPE, 1

(3) 定义求解控制选项：

命令格式：BUCOPT, METHOD, NMODE, SHIFT, LDMULTE用此命令定义特征值提取方法、拟提取的特征值个数、特征值计算的起始点等参数。一般情况下建议采用LANB（分块兰索斯法）、特征值数目为1。

(4) 定义模态扩展数目

命令格式：MXPAND, NMODE, FREQB, FREQE, Elcalc, SIGNIF

若想观察屈曲模态形状，应定义模态扩展数目，也可在提取特征值后再次进入求解层单独进行模态扩展分析。

(5) 定义荷载步输出选项

命令格式：OUTRES, Item, FREQ, Cname

命令格式：OUTPR, Item, FREQ, Cname

前者定义向数据库及结果文件中写入的数据，而后者定义向文件中写入的数据。

(6) 求解

命令格式：SOLVE

求解过程的输出主要有特征值（屈曲荷载系数）、屈曲模态形状、相对应力分布等。

(7) 退出求解层

命令格式：FINISH

4、查看结果

(1) 列表显示所有屈曲荷载系数

命令格式：SET,LIST

SET栏对应的数据为模态数阶次，TIME/FREQ栏对应的数据为该阶模态的特征值，即屈曲荷载系数。荷载步均为1，但每个模态都为一个子步，以便结果处理。

(2) 定义查看模态阶次

命令格式：SET,1,SBSTEP

(3) 显示该阶屈曲模态形状

命令格式：PLDISP

(4) 显示该阶屈曲模态相对应力分布

命令格式：PLNSOL或PLESOL等。

注意:BEAM4和BEAM188/189：需要约束绕单元轴的转动自由度，否则虽可进行静力分析，但会出现异常屈曲模态。

1.4.3 空腹钢桁架的侧倾屈曲分析

梁的侧倾屈曲也称为弯扭屈曲或梁丧失整体稳定，属于特征值屈曲分析的一种。梁单元中BEAM44和BEAM18X系列可以考虑梁的侧倾屈曲。本节在对空腹钢桁架进行屈曲分析时，采用了BEAM4、BEAM44、BEAM189单元，计算中为考虑重力的影响。当空腹刚桁架模型受单位竖向均布力，得出的一阶屈曲荷载影响系数即为一阶屈曲荷载，结果如下表所示：

表三：空腹钢桁架屈曲计算数据（单位：kN/m）

有限元模型	屈曲荷载		
	BEAM189	BEAM44	BEAM4
模型一	635.76	572.13	572.13
模型二	71.14	73.53	73.63

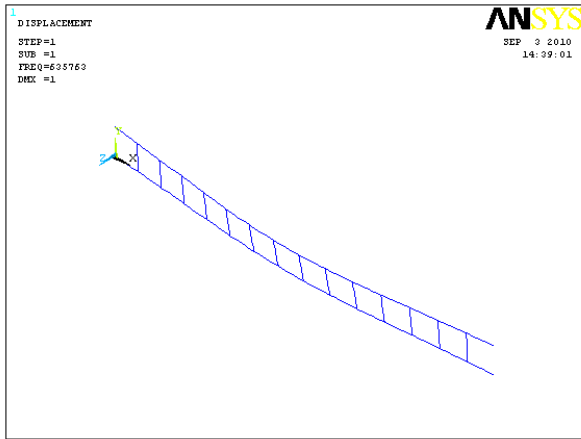


图 1.17a BEAM 系列简支梁 1 一阶屈曲模式

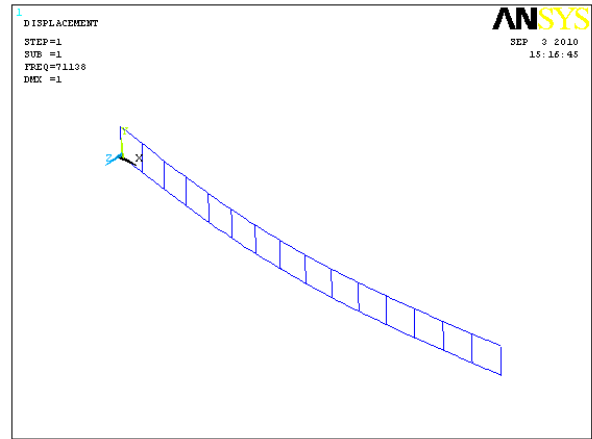


图 1.17b BEAM 系列简支梁 2 一阶屈曲模式

附：屈曲分析命令流如下（模型一）：

!!!!!!模型说明

!空腹桁架

!单位N, m

/prep 7

et,1,beam4

r,1,2.4576e-2,6.05e-4,6.05e-4,0.4,0.4

mp,ex,1,2.06e11 !Q235钢材

mp,dens,1,7800

mp,prxy,1,0.28

!!!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,2,15

l,i,i+16

*enddo

latt,1,1,1,1,,,1

allsel

lesize,all,0.5

lmesh,all

lsel,u,,,all

/eshape,0显示单元形状

/solu

nselect,s,loc,y,2

esln,s,1

sfbeam,all,2,pres,1e3

nselect,s,loc,x,0

d,all,ux

d,all,uy

d,all,uz

d,all,rotx

nselect,s,loc,x,30

d,all,ux

d,all,uy	solve
d,all,uz	finish
d,all,rotx	/solu
allsel	antype,1
antype,0	bucopt,lanb,5
pstres,on	mexpand,5
time,1	solve
nsub,10,20,5	/post1
outres,all,all	set,list