

2.7 索单元施加预应力的几种方法

侯晓武

索单元为只受拉的三维线性单元，只能传递轴向拉力，不能受压也不能受弯。可按如下方式定义索材料。

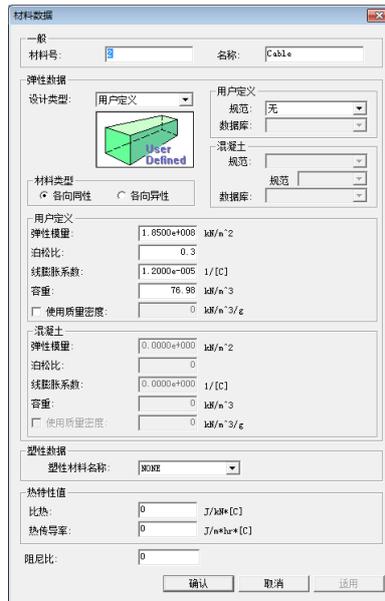


图 2.7.1 自定义索材料

如图 2.7.1 所示，设计类型选择“用户定义”，而后分别输入各种参数。泊松比、线膨胀系数、容重与钢材相同，弹性模量需单独定义。

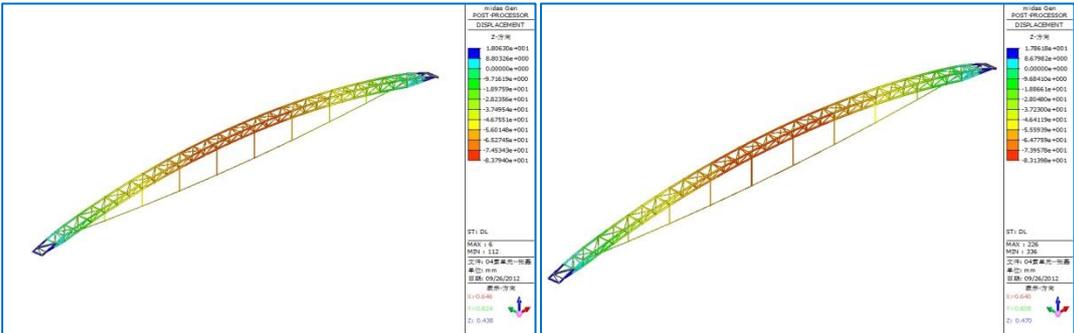
线性分析时，索单元将被等效为桁架单元，其刚度由弹性刚度和下垂刚度两部分组成。

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_E} + \frac{1}{K_{sag}}}$$

弹性刚度： $K_E = \frac{EA}{L}$

下垂刚度： $K_{sag} = \frac{12T^3}{w^2L^3}$

因而，进行线性分析时，用索单元建模和用桁架单元建模其结果会有差异。由于采用索单元建模时，考虑了下垂刚度后，会对结构的刚度进行折减。因而采用索单元建模时，其位移结果要大于采用桁架单元建模的结果（如图 2.7.2 所示）。



(a) 索单元

(b) 桁架单元

图 2.7.2 张弦梁恒载作用下线性分析结果

非线性分析时，悬索结构的刚度并不是一次性计算得到。而是通过多次重复计算，使结构达到平衡状态得到的。

在 midas Gen 中，有四种施加预应力的方法。

(1) 建立单元同时定义预应力

A. 无应力索长 L_u

$L_u < L$ 时：引入初拉力 $F = EA \cdot \Delta L / L$ ($\Delta L = L - L_u$)

L 为单元长度， EA 分别为弹性模量和横截面积；

$L_u > L$ 时：索下垂，折减刚度；

B. 初拉力：输入沿单元坐标系 X 轴方向的预应力荷载；

C. 水平力：输入沿水平方向的预应力荷载。

说明：

- 仅用于几何非线性分析，线性分析时将被忽略；

如图 2.7.3 所示，在下方张弦梁中的 324~332 号索单元施加初拉力 770KN，上方张弦梁中的索单元不施加初拉力。对两个模型进行线性分析，得到恒载作用下的位移结果相同，如图 2.7.4 所示。

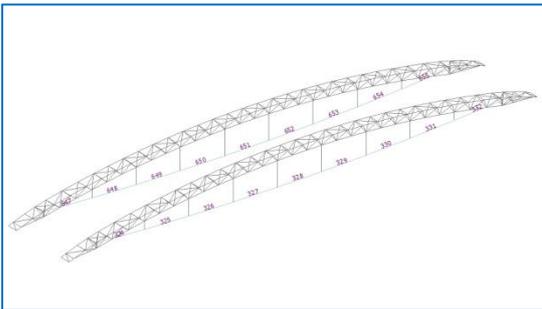


图 2.7.3 建立单元时施加初拉力



图 2.7.4 恒载作用下位移结果

- 对所有荷载工况结果都有影响；
 - 迭代计算时，第一步即产生初始刚度，该拉力对其它构件也有影响，如图 2.7.6 和图 2.7.7 所示。
- 菜单：荷载->静力荷载：

如图 2.7.5 所示，定义一个空工况，在该工况下不定义任何荷载。用于查看施加预应力后平衡状态下的构件内力和位移。

2.7 索单元施加预应力的几种方法



图 2.7.5 定义空工况

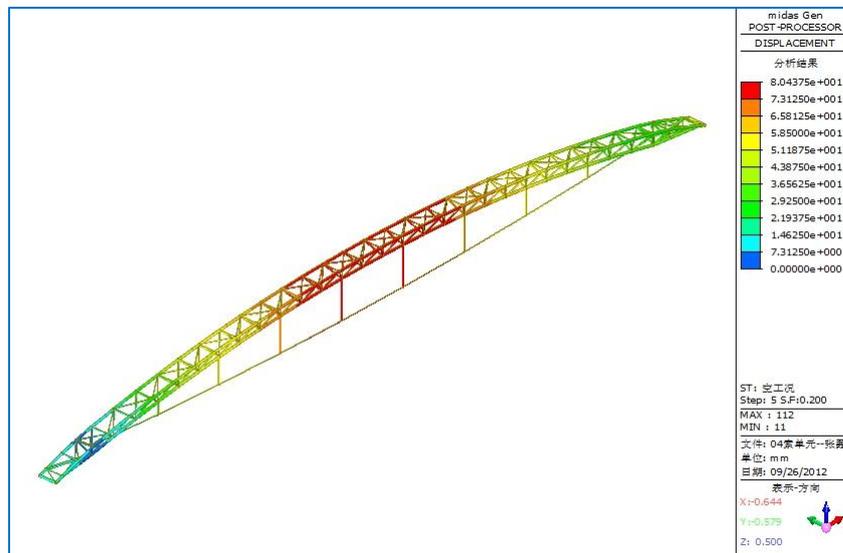


图 2.7.6 索单元施加预应力后结构位移

- 张拉后，索中拉力不为定义时添加的初拉力，如图 2.7.6 所示。

2.7 索单元施加预应力的几种方法

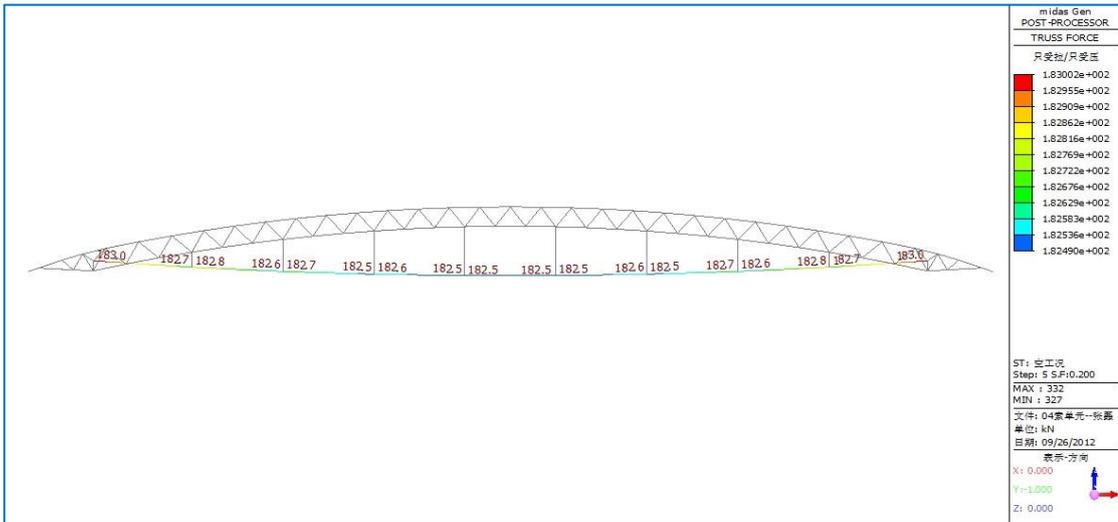


图 2.7.7 张拉后索单元内力

(2) 初拉力荷载

菜单：荷载->预应力荷载->初拉力荷载；

- 为外荷载，对其它构件有影响；
- 不产生初始刚度，因而分析可能不容易收敛。可以用几何刚度初始荷载对索单元添加一个较小的刚度；
- 需定义荷载工况，对该工况以外的其他荷载工况不起作用；
- 用于线性分析和非线性分析；
- 施工阶段分析时，可采用该方法对索分批张拉。

(3) 几何刚度初始荷载

菜单：荷载->初始荷载->大位移->几何刚度初始荷载；

- 只产生刚度，对其它构件的内力和位移没有影响。如图 2.7.8 与图 2.7.9 所示，索单元外其余构件的内力和位移为很小值，接近于 0。

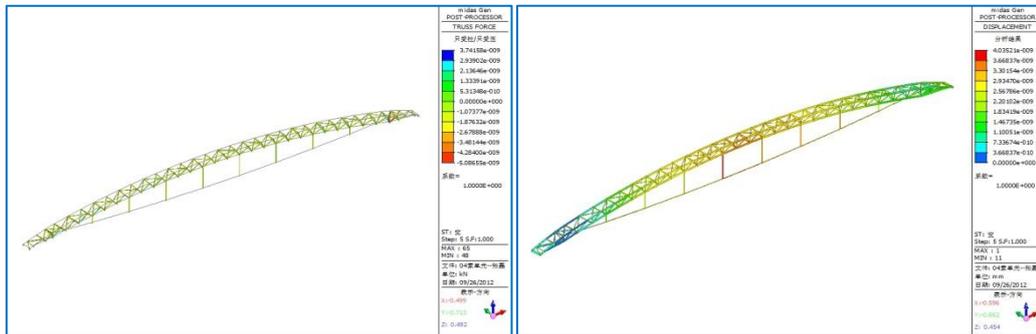


图 2.7.8 索单元外其余构件的内力

图 2.7.9 结构位移

- 索在该初始荷载作用下内力为初始荷载值，如图 2.7.10 所示。

2.7 索单元施加预应力的几种方法

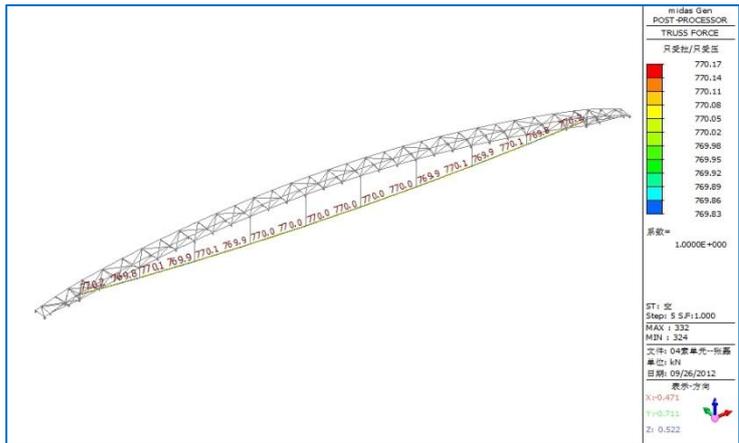


图 2.7.10 索单元内力

- 对所有工况结果均有影响；
- 仅用于非线性分析；
- 如果工程中需要计算的是索张拉后结构在其它荷载工况下效应，并且不考虑预应力作用下其它构件中的内力时，可采用该方法。

(4) 初始单元内力，如图 2.7.11 所示。

菜单：荷载->初始荷载->小位移->初始单元内力；

类型	单元	轴力-i (kN)	剪力(y)-i (kN)	剪力(z)-i (kN)	扭矩-i (kN*m)	弯矩(y)-i (kN*m)	弯矩(z)-i (kN*m)	轴力-j (kN)	剪力(y)-j (kN)	剪力(z)-j (kN)	扭矩-j (kN*m)	弯矩(y)-j (kN*m)	弯矩(z)-j (kN*m)
桁架	1	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
桁架	2	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
桁架	3	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
桁架	4	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
桁架	5	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
桁架	20	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
桁架	21	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
桁架	44	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00
桁架	45	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	1000.0000	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00	0.0000e+00

图 2.7.11 初始单元内力表格

荷载->初始荷载->小位移->初始荷载控制数据；如图 2.7.12 所示。



图 2.7.12 初始荷载控制数据

- 适用于线性分析和动力分析；
- 对所有工况都起作用，即各工况都会考虑初始单元内力引起的几何刚度；

2.7 索单元施加预应力的几种方法

- 初始单元内力会添加到指定的荷载工况中。

如图 2.7.11 所示，勾选“给单元添加初始荷载”，并在荷载工况列表中选择“DL”，分析结束后查看索单元内力如图 2.7.13 所示，不勾选“给单元添加初始荷载”时，索单元内力如图 2.7.14 所示。

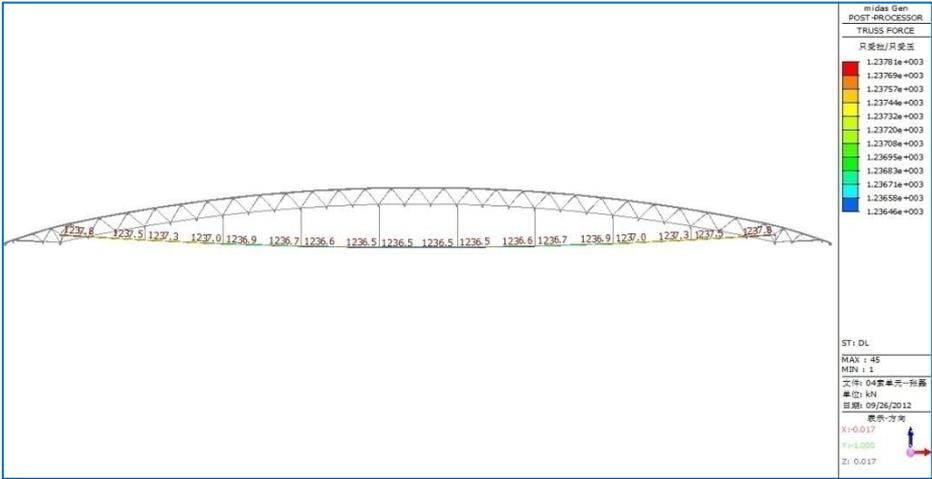


图 2.7.13 索单元内力 (添加初始荷载)

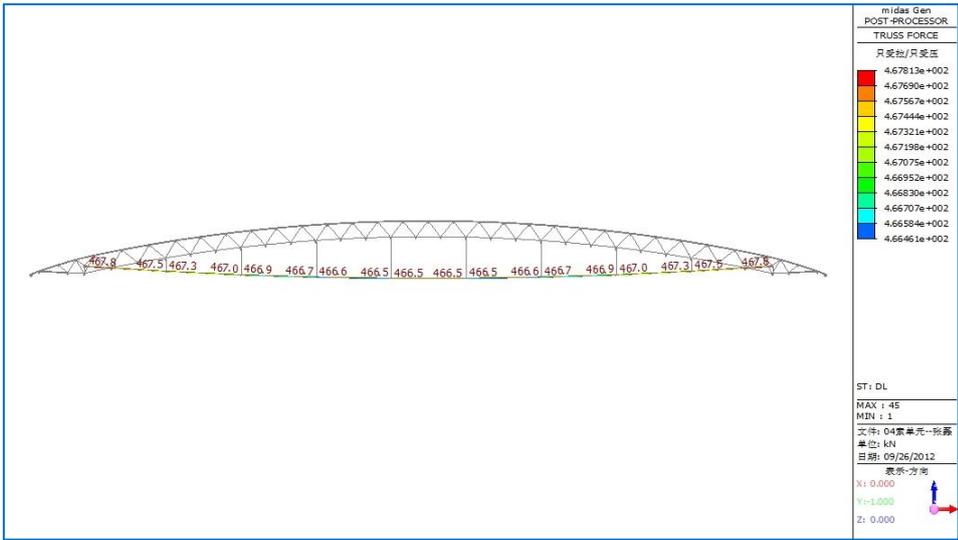
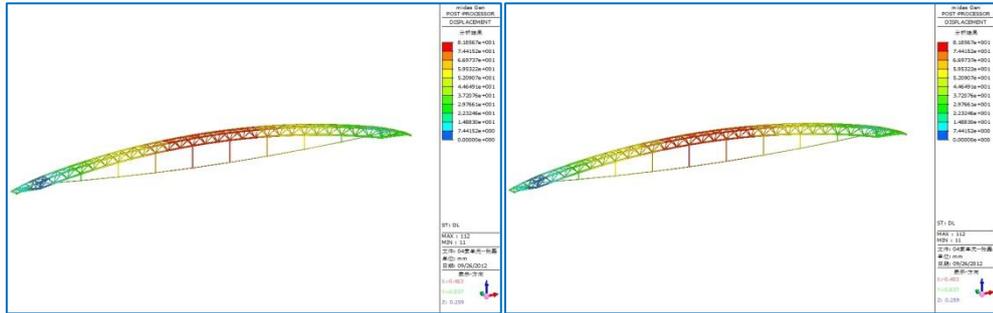


图 2.7.14 索单元内力 (不添加初始荷载)

2.7 索单元施加预应力的几种方法

“给单元添加初始荷载”勾选与否，对于其它结果并无影响，如图 2.7.15 所示。



(a) 勾选

(b) 不勾选

图 2.7.15 结构位移

菜单：荷载->初始荷载->小位移->初始荷载控制数据（图 2.7.16 所示）；



图 2.7.16 选择初始内力组合

该功能用于将某一工况的内力作为初始单元内力进行分析。初始单元内力值可通过菜单：结果->分析结果表格->初始单元内力（如图 2.7.17 所示）查看；

类型	号	构件内力-I					构件内力-J						
		轴力 (kN)	剪力 (y) (kN)	剪力 (z) (kN)	扭矩 (kN*m)	弯矩 (y) (kN*m)	弯矩 (z) (kN*m)	轴力 (kN)	剪力 (y) (kN)	剪力 (z) (kN)	扭矩 (kN*m)	弯矩 (y) (kN*m)	弯矩 (z) (kN*m)
梁	6	-4.5814e-001	3.6354e-001	-9.5406e-001	1.0380e-001	4.7341e-001	1.3495e+000	-4.5814e-001	3.6354e-001	9.7583e-001	1.0380e-001	4.5164e-001	6.2247e-001
梁	7	-6.0354e-001	-3.9185e-001	-9.8174e-001	-1.1637e-001	1.6708e-001	-1.2767e+000	-6.0354e-001	-3.9185e-001	9.4815e-001	-1.1637e-001	2.0066e-001	-4.9297e-001
梁	8	-9.9520e+001	-1.1062e+000	-1.7588e+001	7.4480e-002	-2.1182e+001	-3.2456e-001	-9.9428e+001	-1.1062e+000	-1.5784e+001	7.4480e-002	1.0066e+001	1.7469e+000
梁	9	-1.1035e+002	-1.3346e-001	-1.8125e+001	-7.4617e-001	-2.1137e+001	1.0711e-001	-1.1025e+002	-1.3346e-001	-1.6321e+001	-7.4617e-001	1.1116e+001	3.5704e-001
梁	10	-9.3332e+001	8.9959e-001	-1.1453e+001	-1.5197e-001	-1.5245e+001	1.4088e-001	-9.3239e+001	8.9959e-001	-9.6488e+000	-1.5197e-001	4.5145e+000	-1.5438e+000
梁	11	-1.0476e+002	2.0823e-001	-1.1918e+001	8.5215e-001	-1.5210e+001	-4.6531e-002	-1.0466e+002	2.0823e-001	-1.0114e+001	8.5215e-001	5.4199e+000	-4.3648e-001
梁	12	-6.7488e+000	-1.2042e+000	-2.4761e-001	5.2692e-002	-2.3996e-001	-5.3769e-001	-6.7898e+000	-1.2042e+000	-4.5893e-002	5.2692e-002	-1.3371e-001	3.3423e-001
梁	13	-2.7068e+000	1.1842e+000	-4.3256e-001	-4.0502e-002	-2.5076e-001	5.2915e-001	-2.7068e+000	1.1842e+000	-2.3085e-001	-4.0502e-002	-1.0593e-002	-3.2831e-001
梁	14	2.2125e+000	-4.2067e+000	-1.1217e-001	-9.0125e-001	-1.0060e-001	-2.8524e+000	1.9056e+000	-4.2067e+000	-1.0362e+001	-9.0125e-001	1.0380e-001	1.1105e+000
梁	16	3.6704e+000	-4.5814e-001	-1.1310e-001	6.3528e-001	-1.0355e-001	-8.6052e-001	3.6354e-001	-4.5814e-001	-1.0454e+001	6.3528e-001	-1.0380e-001	-4.3343e-001
梁	17	2.3101e+000	3.9306e+000	-1.1234e+001	5.8830e-001	-1.0063e+001	2.5574e+000	2.0032e+000	3.9306e+000	-1.0378e+001	5.8830e-001	1.1637e-001	-1.1453e+000
梁	19	3.6344e+000	6.0354e-001	-1.1283e+001	-3.5532e-001	-1.0352e+001	9.6848e-001	3.3275e+000	6.0354e-001	-1.0438e+001	-3.5532e-001	-1.1637e-001	3.9628e-001
梁	22	-7.1460e+001	1.5790e+000	3.9390e+000	-1.2284e-001	9.9677e+000	2.2955e+000	-7.1297e+001	1.5790e+000	7.1193e+000	-1.2284e-001	-8.2793e+000	-2.9154e+000
梁	23	-6.5662e+000	1.4143e-001	-1.7319e-001	-4.7332e-002	3.5574e-001	2.5032e-001	-6.5189e+000	1.4143e-001	8.0432e-001	-4.7332e-002	-7.5275e-001	-2.4648e-001
梁	24	-7.7675e+000	-1.9548e-001	4.3446e+000	-7.5008e-001	1.0814e+001	4.4385e-001	-7.7512e+000	-1.9548e-001	7.5249e+000	-7.5008e-001	-8.7717e+000	1.0890e+000
梁	25	-7.0450e+001	-1.4434e+000	1.7352e+000	5.8730e-002	4.4262e+000	-2.0845e+000	-7.0286e+001	-1.4434e+000	4.9155e+000	5.8730e-002	-6.5482e+000	2.6790e+000
梁	26	-6.4284e+000	-1.3202e-001	-2.9629e-001	1.5236e-002	1.8914e-002	-2.3269e-001	-6.3812e+000	-1.3202e-001	6.8122e-001	1.5236e-002	-6.5717e-001	2.3107e-001
梁	27	-7.6346e+001	1.0277e-001	2.1974e+000	8.1765e-001	5.4271e+000	-5.3146e-001	-7.6183e+001	1.0277e-001	5.3777e+000	8.1765e-001	-7.0726e+000	-8.7081e-001
梁	30	-6.7440e+002	6.9480e-003	1.5234e+000	2.7396e-004	5.9945e-001	-3.5538e-002	-6.7379e+002	6.9480e-003	4.4406e+000	2.7396e-004	-8.6102e+000	-5.6997e-002
梁	31	-6.8149e+002	-6.1957e-002	2.0583e+000	5.8680e-004	2.3348e+000	-6.6898e-002	-6.8088e+002	-6.1957e-002	4.9756e+000	5.8680e-004	-8.5270e+000	1.2436e-001
梁	32	-2.0776e+002	-3.4609e-001	0.0000e+000	0.0000e+000	7.2760e-014	5.1159e-015	-2.0835e+002	-3.4609e-001	0.0000e+000	0.0000e+000	4.2281e+001	3.1915e-001
梁	33	-9.1412e+001	-4.2690e-001	3.5145e+001	0.0000e+000	-6.8394e-013	-9.7316e-014	-9.2002e+001	-4.2690e-001	3.5145e+001	0.0000e+000	-3.2409e+001	3.9367e-001
梁	38	7.9804e+001	-2.9991e+000	-2.5246e+000	-1.6359e-001	-4.6425e+000	-6.1852e+000	7.9098e+001	-2.9991e+000	-4.0886e-001	-1.6359e-001	-1.2524e+000	7.7372e-001
梁	40	8.3118e+001	2.9466e+000	-2.8128e+000	8.5966e-002	-5.6494e+000	4.6490e+000	8.2412e+001	2.9466e+000	-6.9702e-001	8.5966e-002	-1.5933e+000	-2.1615e+000
梁	41	7.7886e+001	3.1223e+000	-7.9385e-001	1.9173e-001	-2.4092e+000	6.5413e+000	7.7281e+001	3.1223e+000	1.3218e+000	1.9173e-001	-3.0197e+000	-6.7536e-001

图 2.7.17 初始单元内力表格

2.7 索单元施加预应力的几种方法

表 2.7.1 列出了几种预应力方法下不同结果的数值比较

表 2.7.1 几种预应力方法的比较表格

施加方法	建立索单元时施加预应力 (1)	几何刚度初始荷载 (2)	初拉力荷载 (3)
类型	类似于外力	内力	外力
荷载工况	适用于所有工况	适用于所有工况；但初始荷载仅添加到指定工况的内力中结构处于初始的平衡状态，可以作为其他荷载工况的初始状态。	只属于某特定荷载工况
空工况	内力≠初拉力；为自重与初拉力平衡下的内力；有位移；	内力=初始荷载； 无位移	无初始刚度，分析不收敛。 需在建立索单元时施加一比较小的预应力值，如 1KN；
优先级	1, 2 同时考虑时 1 不起作用；其它情况共同作用。		
分析类型	只适用于非线性分析，对线性分析不起作用	大位移下几何刚度初始荷载用于非线性分析，而小位移下初始荷载用于线性分析或动力分析	线性,非线性都起作用
应用	可用于找形分析	可用于其他荷载工况的分析	可用于施工阶段分析，如分批张拉等