

CSI 程序在隔震应用中的常见问题精选

筑信达 曾亚

隔震结构因其在抗震性能上的优越性，成为国内外工程界关注与应用的热点之一。随着隔震技术的发展与成熟，隔震建筑被广泛应用于大量实际工程中，如学校、住宅、医院、体育场馆、机场航站楼以及一些工业类建筑等。CSI（SAP2000、ETABS）程序在隔震分析方面具有独特的优势，是工程师们实现隔震结构设计的常用软件。

很多用户通过筑信达官方在线支持系统，就软件应用问题与我们进行沟通和交流，展开广泛而深入的讨论与研究，其中也不乏隔震设计在程序中实现的相关问题。在此，特别精选出最具有代表性的几个问题，将解答过程进行梳理，呈现给更多的用户。希望能够帮助用户避开常见应用误区、拓展思路，更好地使用程序完成隔震分析及设计相关的工作。

在此，要特别感谢提出文中问题的工程师们！因为你们严谨的工作态度和积极钻研的精神，促使我们之间的深入探讨与研究，过程中彼此都收获了很多知识和经验。同时，也欢迎更多的用户关注和使用[在线支持系统](#)。

【问题 1】进行 FNA 分析时，应选择何种模态分析方法？

首页 > 问题详情

编号	1233	主题	带damper单元的结构非线性动力时程分析方法选择及设置		状态	已关闭 修改
版本号	V9.7.4	产品	CSI-ETABS-NLC-2015(已购)	创建日期	2016/04/22 17:16:28	结束日期
关键词	damper单元，非线性动力时程分析，模态分析方法				提交人	
客户名称						

当对带damper单元的结构进行非线性动力时程分析时，存在以下两个问题：

(1) 模态分析方法采用特征向量法和Ritz法得到的时程计算结果差别很大；

(2) 当采用Ritz法时，振型数取得不同时，尽管振型质量参与系数已经远远满足90%的要求，但计算结果仍然相差很大。

下图以时程分析得到的层剪力为例，将特征向量法和不同振型数的Ritz法的层剪力曲线画出，且将不同方法的振型参与质量系数列出。可以看到，特征向量法计算结果偏小，而Ritz法振型数少时计算结果几乎呈直线分布，明显不合理，只有当振型数超过150（本模型为例）时才能得出正确的结果（该结果已采用直接积分法进行验证过）。

麻烦请对带damper单元的结构进行非线性动力时程分析时如何正确进行模态分析方法的选择及参数设置作出解答，谢谢~

方案	UX (%)	UY (%)	RZ (%)
特征向量法	97.7943	97.7943	97.7943
Ritz-30	98.1373	79.1413	76.5953
Ritz-80	99.9988	99.9988	100
Ritz-150	100	99.9991	100
Ritz-200	100	100	100

图 1 用户问题

解答：

程序（SAP2000、ETABS）中提供两种模态分析方法：特征向量法和 Ritz 向量法。

特征向量法用于求解结构在无阻尼自由振动状态下的模态和频率，自振模态的结果对于理解结构本身的动力特性是非常有帮助的。Ritz 向量法用于求解由特定荷载激励的模态，这

种方法可有效避免计算不参与动态响应的、对结果精度没有贡献的振型。基于初始荷载向量的 Ritz 向量模态，不像自由振动模态那样表达结构的固有特性。但在考虑相同计算振型数目的前提下，使用 Ritz 向量法能够获取更高的结构质量参与系数。在基于模态叠加法的反应谱和时程分析中，Ritz 向量法是 CSI 推荐的模态分析方法。

对于隔震结构，通常采用 FNA 法进行分析，该方法基于模态分析的结果。为保证 FNA 法结果计算的高效和准确性，强烈建议模态分析采用 Ritz 向量法。

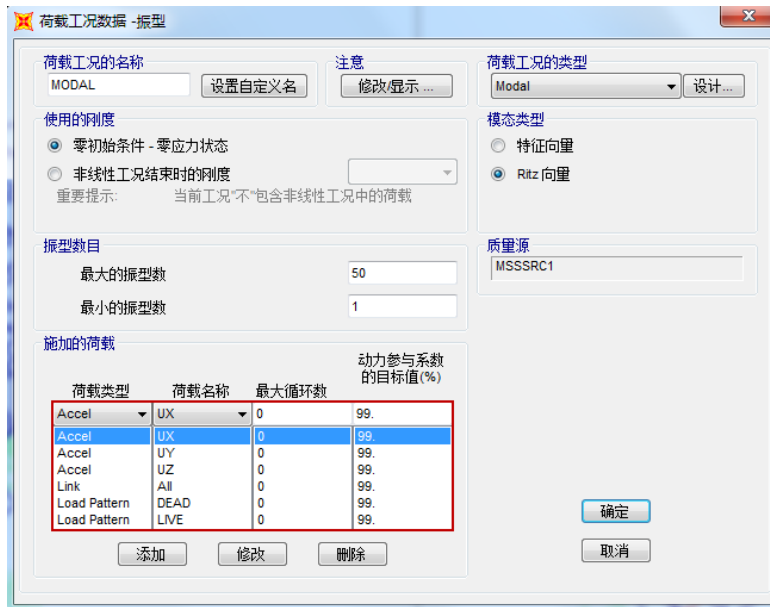


图 2 Ritz 向量法模态工况

如图 2 所示，在定义 Ritz 向量法模态工况时，用户需要输入【振型数目】和【施加的荷载】。

对于模态数的取值，需保证足够的模态数量，这要通过多次试算的过程来确定。一般初次输入估算的模态数量，应大于连接单元非线性自由度数与结构自身自由度数及考虑的荷载数之和。模态数量需满足荷载参与系数达到一定要求（其中，静力荷载质量参与系数必须达到 100%，动力荷载参与系数尽量高），而非仅仅考察质量参与系数结果。更多内容，详见【问题 2】解答。

另外，用户需保证模态工况中包络所有的激励荷载自由度。在定义【施加的荷载】时可选择三种荷载类型：加速度荷载、荷载模式、内置的非线性变形荷载。

对于常规结构，一般考虑 X、Y 方向的加速度作为施加的荷载，此时，可基于模态分析的结果进行水平方向上的地震作用求解。若要考虑竖向地震作用，则需要同时施加 Z 方向的加速度。

对于隔震结构或消能减震结构，由于模型中存在使用连接单元模拟的隔震器或者消能减震器，在进行模态分析时（如图 2），需要在施加的荷载中考虑连接单元的非线性变形荷载和恒、活荷载（地震时程工况的初始条件）。

【问题 2】如何判断 Ritz 模态数量是否足够？

首页 > 问题详情

编号	1921	主题	隔震结构层剪力问题		状态	已回复 修改
版本号	18.1.1	产品	CSI-SAP2000-ADC-18(已购)	创建日期	2017/03/28 14:40:01	结束日期
关键词	隔震, 层剪力					提交人
客户名称						
问题描述	以user1地震波为例, Y向基底地震剪力为13043kN, 其上一层(组为GZC)的柱底剪力为21906kN, 而一层的剪力值为14000kN均大于基底剪力, 请问什么原因? 采用截面切割计算各层地震剪力					
模型附件						
附件描述						
模型导入						

图 3 用户问题

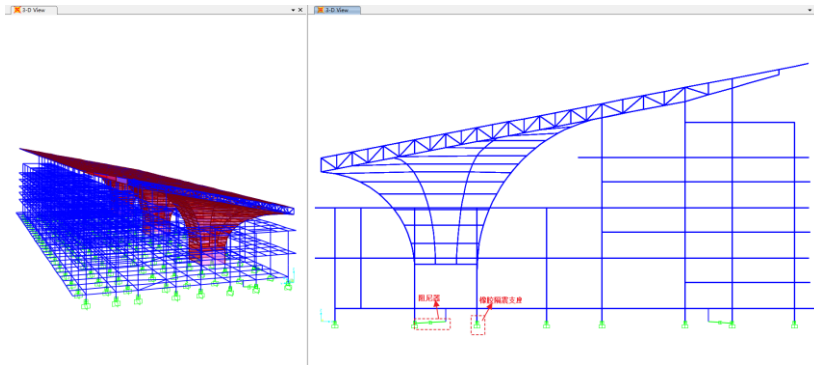


图 4 用户模型

解答:

用户模型为底部隔震结构, 使用基于 Ritz 向量法的 FNA 进行时程分析。出现底层柱底剪力大于基底剪力的现象, 这是由于模态工况中的模态数量不足造成的。

模型(图 4)中底部放置橡胶隔震支座, 其中铅芯橡胶支座(两个水平方向考虑非线性属性)共 82 个, 以及 4 个阻尼器(轴向考虑非线性属性)。由此可知, 该模型的连接单元非线性自由度数量为 168 (即 $82*2+4*1$)。

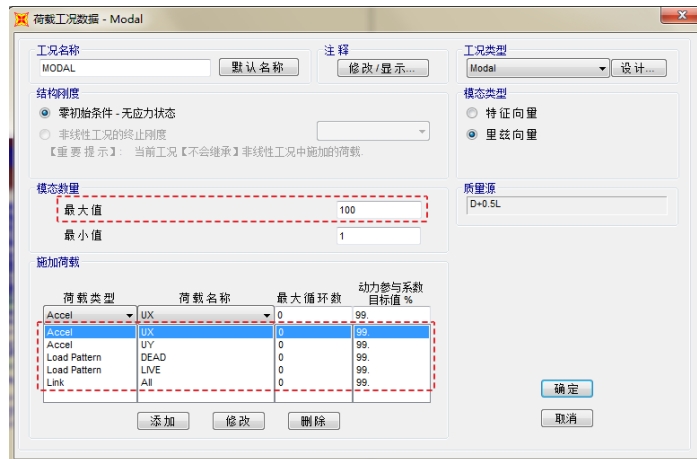


图 5 模态工况设置

模态数量取值应大于结构本身的自由度数 (N_S) 与连接单元非线性自由度数 (N_{Link}) 及考虑的荷载数 (N_{Load}) 之和; 其中, N_S 一般取为楼层数的 3 倍; 初始荷载向量考虑 DEAD、LIVE 工况时, 一个荷载工况对应一个模态即可, 则 N_{Load} 取为 2。

按照上述原则, 初次估算的模态数量 $N_0=3*9+168+2=197$, 取为 200。而原模型中模态工况考虑的模态数量最大值为 100 (图 5), 当模态求解数量小于连接单元非线性自由度时, 很难得到静力荷载质量参与系数达到 100% 的结果, 故无法保证分析结果的准确性。那么,

模态数量取何值时才能保证分析结果的准确性？

唯一的处理方法是，基于初次估算的 N_0 ，逐级增加模态数进行试算，即取多组模态数 N_0 、 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 （该数组是以 N_{Link} 为公差等差数列，即 $N_1 = N_0 + N_{Link}$ 、 $N_2 = N_0 + 2 * N_{Link}$ 、 $N_3 \dots$ 以此类推），直到求得稳定的结果。Ritz 向量法的好处就是随着模态数量的增加结果逐渐逼近真实值，这一点对于特征值向量法不一定适用。

基于上述方法，对于用户模型取四组模态数 200、368、536、704 进行试算，观察不同模态数量时的计算结果（本例以时程工况下 X 向基底反力作为观测量）。

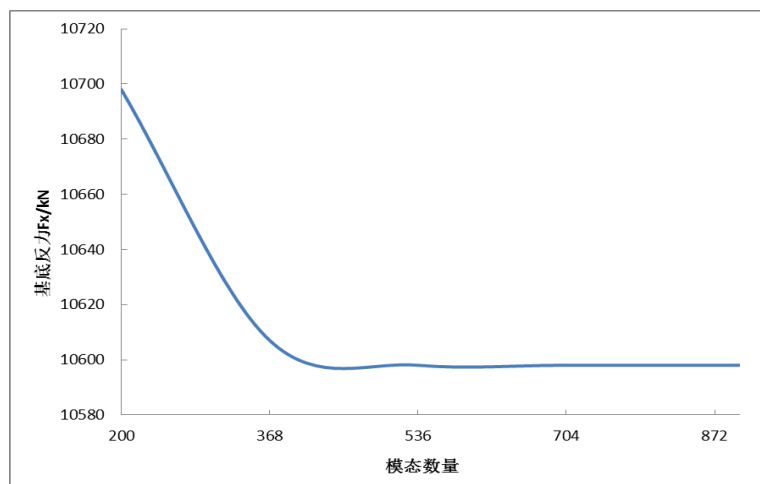


图 6 结果对比图

从图 6 可以直观地了解到，随着模态数量的增加，底部剪力的结果逐步趋于稳定，当模态数量取 536 时结果已收敛。原则上讲模态数量越多结果越精确，但计算耗时也越长。用户需平衡计算精度与计算效率。对于该模型，建议取模态数量为 536，能满足工程精度的要求即可。

完成分析后，查看荷载参与系数（图 7），命令路径：**【显示】>【表格】>【结构输出】>【Model Information】>【Table: Model Load Participation Ratios】**。

OutputCase	ItemType Text	Item Text	Static Percent	Dynamic Percent
MODAL	Acceleration	UX	100	100
MODAL	Acceleration	UY	100	100
MODAL	Load Pattern	DEAD	100	87.4129
MODAL	Load Pattern	LIVE	100	83.9082
MODAL	Link	1 (U1)	100	80.378
MODAL	Link	1 (U2)	100	70.0184
MODAL	Link	1 (U3)	100	80.378
MODAL	Link	1 (R1)	100	80.378
MODAL	Link	1 (R2)	100	80.378
MODAL	Link	1 (R3)	100	80.378
MODAL	Link	2 (U1)	100	73.877
MODAL	Link	2 (U2)	100	75.1675
MODAL	Link	2 (U3)	100	73.877
MODAL	Link	2 (R1)	100	73.877
MODAL	Link	2 (R2)	100	73.877
MODAL	Link	2 (R3)	100	73.877
MODAL	Link	3 (U1)	100	79.7137
MODAL	Link	3 (U2)	100	75.924
MODAL	Link	3 (U3)	100	79.7137
MODAL	Link	3 (R1)	100	79.7137
MODAL	Link	3 (R2)	100	79.7137
MODAL	Link	3 (R3)	100	79.7137
MODAL	Link	4 (U1)	100	81.0486
MODAL	Link	4 (U2)	100	68.6723
MODAL	Link	4 (U3)	100	81.0486
MODAL	Link	4 (R1)	100	81.0486
MODAL	Link	4 (R2)	100	81.0486
MODAL	Link	4 (R3)	100	81.0486
MODAL	Link	5 (U1)	100	78.0792
MODAL	Link	5 (U2)	100	79.7207
MODAL	Link	5 (U3)	100	78.0792
MODAL	Link	5 (R1)	100	78.0792
MODAL	Link	5 (R2)	100	78.0792
MODAL	Link	5 (R3)	100	78.0792
MODAL	Link	6 (U1)	100	82.4218
MODAL	Link	6 (U2)	100	82.8464
MODAL	Link	6 (U3)	100	82.4218

a) 模态数取 536

OutputCase	ItemType Text	Item Text	Static Percent	Dynamic Percent
MODAL	Link	108 (U3)	100	14.3428
MODAL	Link	108 (R1)	100	14.3428
MODAL	Link	108 (R2)	100	14.3428
MODAL	Link	108 (R3)	100	14.3428
MODAL	Link	109 (U1)	100	11.0809
MODAL	Link	109 (U2)	100	8.4147
MODAL	Link	109 (U3)	100	11.0809
MODAL	Link	109 (R1)	100	11.0809
MODAL	Link	109 (R2)	100	11.0809
MODAL	Link	109 (R3)	100	11.0809
MODAL	Link	110 (U1)	85.183	0.7203
MODAL	Link	110 (U2)	77.2305	0.2094
MODAL	Link	110 (U3)	85.183	0.7203
MODAL	Link	110 (R1)	85.183	0.7203
MODAL	Link	110 (R2)	85.183	0.7203
MODAL	Link	110 (R3)	85.183	0.7203
MODAL	Link	111 (U1)	88.4618	1.4312
MODAL	Link	111 (U2)	76.7627	0.046
MODAL	Link	111 (U3)	88.4618	1.4312
MODAL	Link	111 (R1)	88.4618	1.4312
MODAL	Link	111 (R2)	88.4618	1.4312
MODAL	Link	111 (R3)	88.4618	1.4312
MODAL	Link	112 (U1)	86.8141	3.0237
MODAL	Link	112 (U2)	66.3712	0.0996
MODAL	Link	112 (U3)	86.8141	3.0237
MODAL	Link	112 (R1)	86.8141	3.0237
MODAL	Link	112 (R2)	86.8141	3.0237
MODAL	Link	112 (R3)	86.8141	3.0237
MODAL	Link	113 (U1)	75.3093	0.5166
MODAL	Link	113 (U2)	67.1897	0.0315
MODAL	Link	113 (U3)	75.3093	0.5166
MODAL	Link	113 (R1)	75.3093	0.5166
MODAL	Link	113 (R2)	75.3093	0.5166
MODAL	Link	113 (R3)	75.3093	0.5166
MODAL	Link	114 (U1)	83.7395	0.1198
MODAL	Link	114 (U2)	79.7088	0.0316
MODAL	Link	114 (U3)	83.7395	0.1198
MODAL	Link	114 (R1)	83.7395	0.1198

b) 模态数取 200

图 7 不同模态数量下的荷载参与系数

如图 7 a)，当模态数量取 536 时，静力荷载参与系数均达到 100%，连接单元的动力荷载参与系数均值达到 70% 以上，满足要求。对比模态数量取 200 时，如图 7 b)，部分连接单元对应的静力荷载参与系数未达到 100%，并且连接单元的动力荷载参与系数非常低，远达不到要求的水平。这也印证了图 6 呈现的模态数量与计算结果的关系。

当 Ritz 模态数量取 536 时，时程工况下 X 向的基底反力和柱底剪力结果如下，没有出现原始问题中描述的底层柱底剪力大于基底剪力的现象。

分析结果	Fx/kN
底层柱底剪力	10202
水平向基底反力	10598

小结：

基于 FNA 法的隔震时程分析，必须考虑足够的模态数量，使之满足荷载参与系数达到一定数量的要求，来确保 FNA 法计算结果的准确性。模态数量不足会导致非真实的分析结果。模态数量的取值，应注意以下几点：

1. 初次计算的模态数量 $N_0 \geq N_S + N_{Link} + N_{Load}$

式中 N_S 为结构本身的自由度数，可按 3 倍的楼层数量估算； N_{Link} 为连接单元非线性自由度数； N_{Load} 为考虑的荷载数（例如恒载、活载）。注意，Ritz 模态工况中要包络所有的激励荷载自由度。

2. 判断模态数量是否足够，可查看荷载参与系数。一般要求静力荷载参与系数全部达到 100%，动力荷载参与系数应尽可能大。

静力荷载参与系数用于衡量计算的模态表达给定静力荷载响应的优劣程度。100% 的静

力荷载参与系数，代表这些模态能够准确地表达给定的静力荷载。

类似地，动力荷载参与系数衡量计算的模态表达给定动力荷载响应的优劣程度，它是质量参与系数概念的延伸。当动力荷载质量参与系数达到 100%时，代表计算的模态可以准确地捕捉到结构的高频响应。但多数情况很难得到 100%的结果，也没有必要。一般要求动力荷载参与系数尽量达到较高水平即可。

3. 采用逐步增加模态数量的方式多次试算，可以验证模态数量是否足够。即基于初次估算模态数量 N_0 ，逐级（按 N_{Link} 的倍数）增加模态数进行多次试算，直到求得稳定的结果。

【问题 3】FNA 法中如何考虑 P-Delta 效应？

解答：

定义 FNA 时程分析工况时，并没有几何非线性选项来考虑 P-Delta 效应。这时，应在模态工况定义时考虑 P-Delta 效应，同时在定义连接单元时设置 P-Delta 参数。

1. 在模态分析中考虑 P-Delta 效应

在 ETABS 中预设 P-Delta 荷载工况后（命令路径：【定义】>【P-Delta 选项】），模态工况将自动考虑 P-Delta 效应，如图 8 所示。

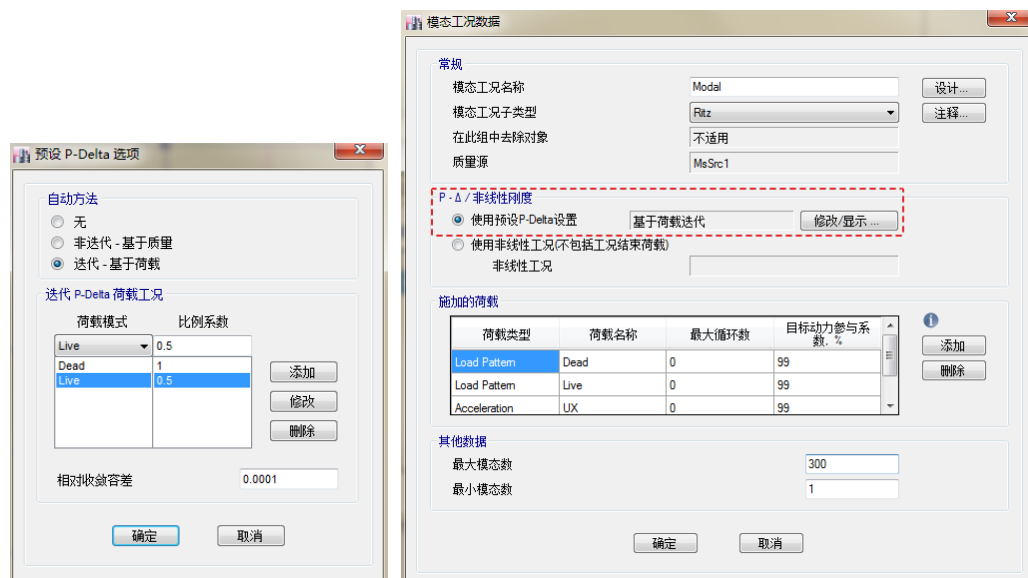


图 8 预设 P-Delta 效应

在 SAP2000 中，需要提前定义非线性静力工况作为模态工况的初始条件，在此工况中通过几何非线性选择考虑 P-Delta 效应，如图 9 所示。然后，在模态工况中将初始条件选择为接力先前定义的非线性工况，如图 10 所示。

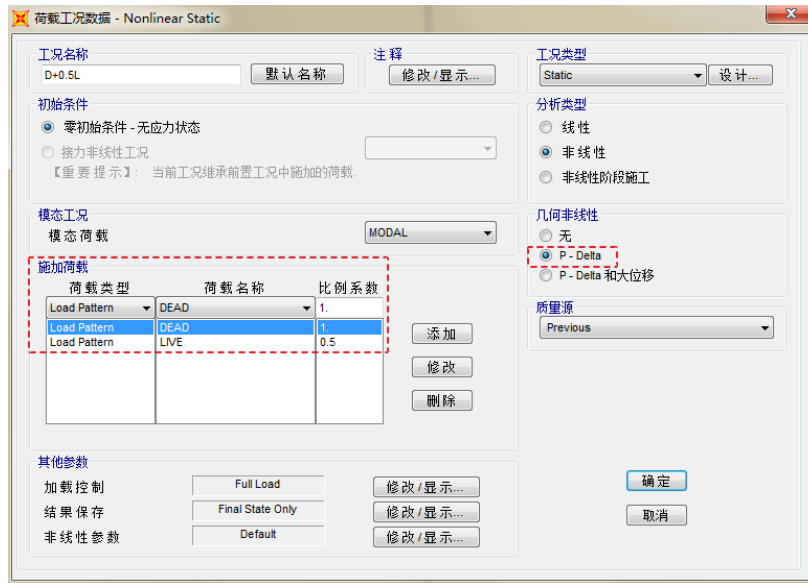


图 9 考虑 P-Delta 效应的非线性静力工况

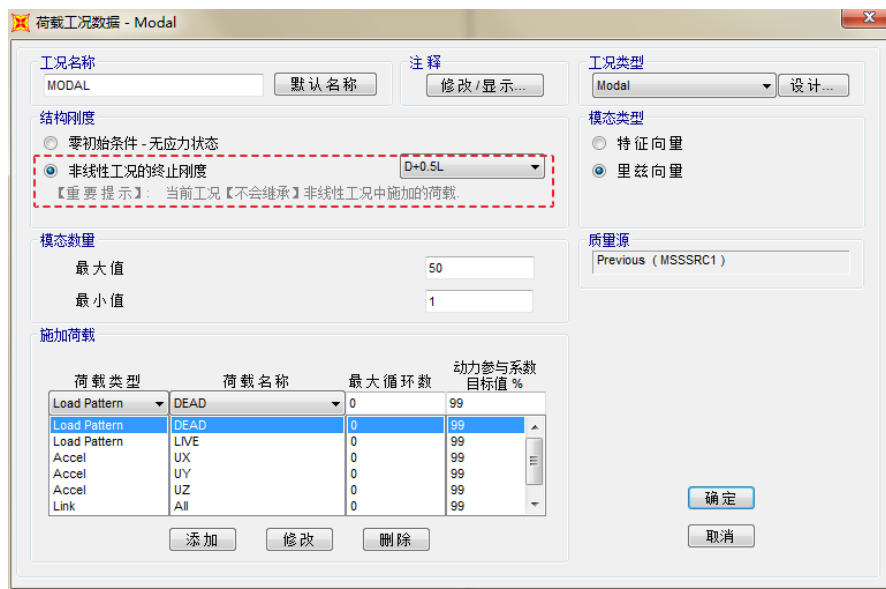


图 10 模态工况设置

2. 在连接单元中设置 P-Delta 参数

水平位移 U2 或 U3 在轴力作用下会产生附加弯矩，总的 P-Delta 弯矩可以按下列三种方式分配至节点：

- 由两端的等值反向的剪力在单元长度上产生的弯矩
- 在端部 I 的弯矩
- 在端部 J 的弯矩

用户可以在连接单元的 P-Delta 参数中输入相应的比例系数，来设定总的 P-Delta 弯矩的分配方式。因三种分配方式的比例系数之和为 1，故仅开放前两个参数进行输入。一般情况下，隔震器只使用弯矩项（即剪力项设为 0），如图 11 所示；阻尼器仅使用剪力项；对于摩擦摆隔震器，一般将所有弯矩分配在底盘一端，滑动器一端不分配弯矩值。

对于零长度的连接单元，程序将自动忽略对剪力指定的系数；若其余项的分配系数为零，则默认设置为 0.5。

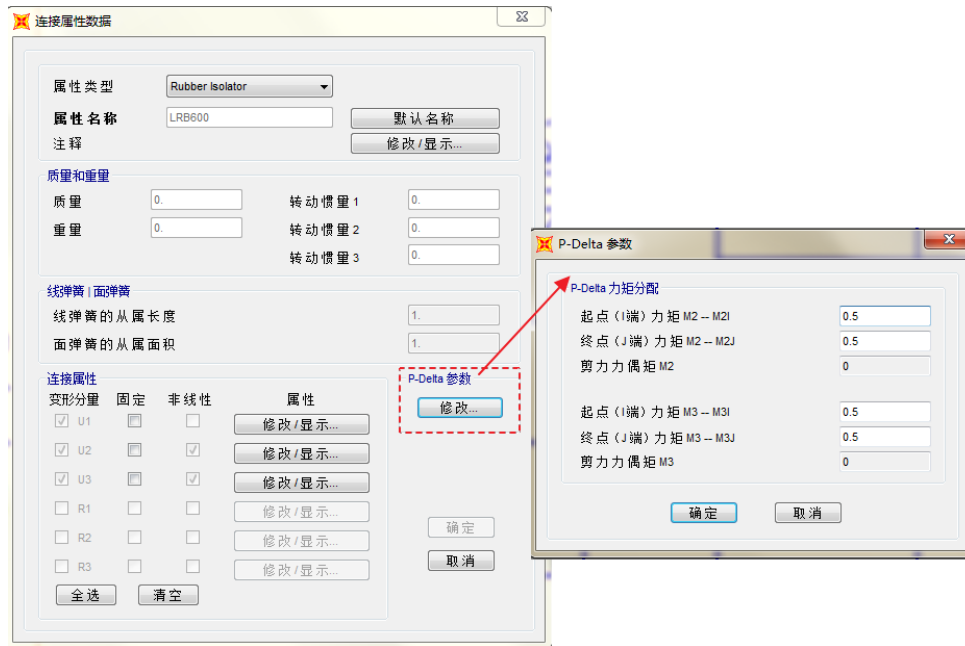


图 11 连接单元 P-Delta 参数

【问题 4】 隔震结构警告信息如何处理？

如图 13 模型为普通的混凝土框架结构，底部布置普通橡胶支座和铅芯橡胶支座，对隔震结构进行基于 Ritz 模态的快速非线性（FNA 法）分析的过程中，程序给出一系列警告信息如图 12。

首页 > 问题详情

编号	1861	主题	隔震模型报错	状态	已回复 修改
版本号	18.2.0	产品	CSI-SAP2000-ADC-18(已购)	创建日期	2017/02/23 12:18:42
关键词	隔震, 计算, 错误			结束日期	
客户名称				提交人	
问题描述	隔震模型报错, 找不到什么原因, 请帮模型计算是否有误? 如何处理? 谢谢				
模型附件					
附件描述					
模型导入					

```

*** WARNING ***
FOR STARTING LOAD VECTOR:   LOAD =   DEAD
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE HASELESS DEGREES OF FREEDOM,
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCUAPATE FOR DYNAMICS

*** WARNING ***
FOR STARTING LOAD VECTOR:   LINK/DEF =   1/2
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE HASELESS DEGREES OF FREEDOM,
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCUAPATE FOR DYNAMICS

*** WARNING ***
FOR STARTING LOAD VECTOR:   LINK/DEF =   1/3
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE HASELESS DEGREES OF FREEDOM,
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCUAPATE FOR DYNAMICS

*** WARNING ***
FOR STARTING LOAD VECTOR:   LINK/DEF =   2/2
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE HASELESS DEGREE OF FREEDOM,
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCUAPATE FOR DYNAMICS

*** WARNING ***
FOR STARTING LOAD VECTOR:   LINK/DEF =   2/3
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE HASELESS DEGREES OF FREEDOM,
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCUAPATE FOR DYNAMICS

*** WARNING ***
FOR STARTING LOAD VECTOR:   LINK/DEF =   3/2
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE HASELESS DEGREES OF FREEDOM,
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCUAPATE FOR DYNAMICS

*** WARNING ***
FOR STARTING LOAD VECTOR:   LINK/DEF =   3/3
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE HASELESS DEGREES OF FREEDOM,
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCUAPATE FOR DYNAMICS

```

图 12 用户问题

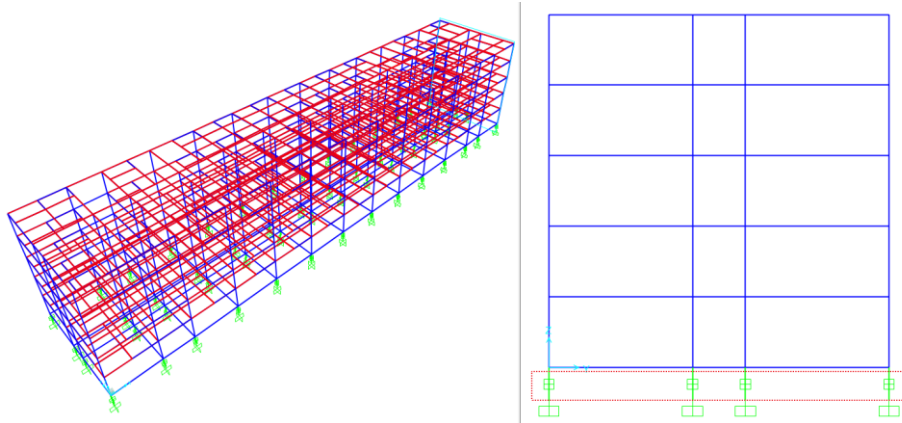


图 13 用户模型

解答:

问题中出现的警告信息可分为①、②两类，下面分别说明这两类警告信息产生的原因和解决方法。

1. Ritz 向量法与非节点荷载

基于 Ritz 向量法的模态分析中，如果用户指定的某个初始荷载向量包含结构的自重荷载，则程序在运行分析的过程中会提示警告信息①如下。

```

*** WARNING ***
FOR STARTING LOAD VECTOR:          LOAD =          DEAD
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE MASSLESS DEGREES OF FREEDOM,
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCURATE FOR DYNAMICS
    
```

该警告信息表明：由于初始荷载向量作用在无质量的自由度上，故程序可能会得到无效或错误的 Ritz 模态，进而可能会影响后续的动力分析结果的准确性。

这个问题涉及非节点荷载与质量自由度的关系。用户可以在对象模型（几何模型）中施加的各种非节点荷载，例如：

- 框架对象内部的集中荷载
- 框架对象的均布或非均布（如三角形或梯形分布）线荷载
- 面对象的均布面荷载或非均布的表面压力荷载（如静水压力、土压力等）
- 其它荷载（如自重荷载、温度荷载、孔隙压力等等）

程序在生成分析模型（有限元模型）的过程中，将以上的非节点荷载全部转换为等效节点荷载。这与结构力学中矩阵位移法处理非节点荷载的方法是完全一致的，如图 16 所示。

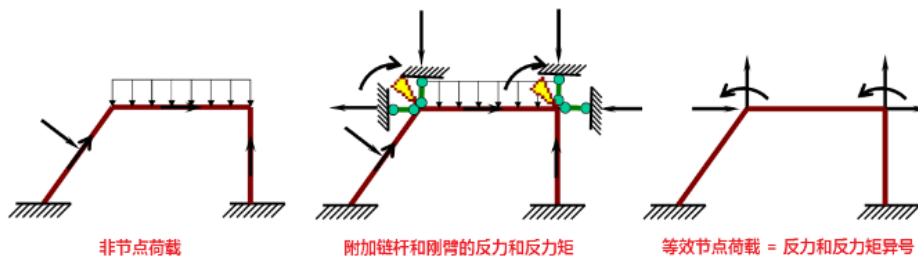


图 16 等效节点荷载

由上可知，非节点荷载的等效节点荷载包括两部分：等效的集中力荷载和等效的集中力矩荷载。而 CSI 程序（包括 SAP2000、ETABS、CSiBridge 等等）中的单元质量矩阵只有平

动质量，并无转动质量（即转动惯量）。由此不难推断引起警告信息①的原因：即等效的集中力矩荷载作用在无转动惯量的节点上。基于上述分析，可以采用以下方法来避免该警告信息：

1. 直接约束所有节点的转动自由度。该方法虽然可以避免该警告信息，但绝对不能使用！具体原因显而易见，此处不再赘述。不过，如果计算模型为纯桁架结构（即：模型中的所有杆件均为拉压杆），该方法是没有任何问题的。

2. 为所有节点指定非零的转动惯量。通过指定节点附加质量来实现，命令路径：**【指定】>【节点】>【质量】**。（需要强调的是，此时应在质量源定义中勾选**【附加质量】**选项。）

事实上，在常规的结构动力分析中，通常无需考虑构件的转动惯量。所以，由非节点荷载所引起质量自由度问题其实是可以忽略的。

不过，对于某些布置形式的 ETABS 减隔震模型中提示的质量自由度问题，却是一定不能忽略的，否则将影响时程分析中连接单元的计算精度，感兴趣的读者可阅读筑信达知识库文档《[质量源定义与阻尼器布置](#)》。

2. 剪切变形与无质量自由度

前面提到“用户模型”中布置了铅芯橡胶支座，程序中用于模拟铅芯橡胶支座的连接单元考虑 U2 和 U3 方向（即水平方向）的非线性属性。基于此，程序在运行 Ritz 向量法的模态分析时警告信息②，如下。

```

* * * W A R N I N G * * *
FOR STARTING LOAD VECTOR:      LINK/DEF =      1/U2
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE MASSLESS DEGREES OF FREEDOM,
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCURATE FOR DYNAMICS
  
```

```

* * * W A R N I N G * * *
FOR STARTING LOAD VECTOR:      LINK/DEF =      1/U3
LOAD IS APPLIED TO ONE OR MORE MASSLESS DEGREES OF FREEDOM,
CORRESPONDING RITZ MODES MAY BE UNAVAILABLE OR INACCURATE FOR DYNAMICS
  
```

类似地，该警告信息也是提示用户，模型中存在“荷载作用于无质量自由度上”的问题。不同的是，此类问题涉及连接单元的剪切变形与质量自由度的关系。

首先，连接单元的变形由两端节点的平动位移和转动位移共同产生（图 17）。例如，1-2 平面内的剪切变形由两部分组成：沿 2 轴的平动位移和绕 3 轴的转动位移。

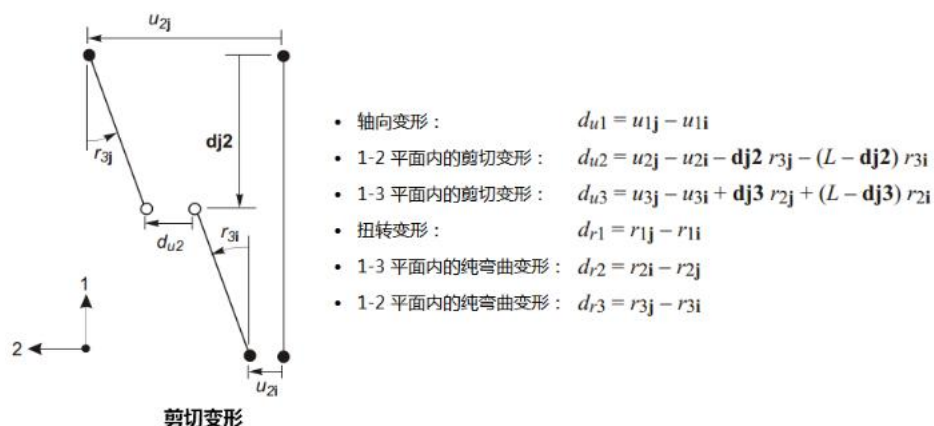


图 17 连接单元的变形

在 Ritz 向量法的模态分析中，如果用户指定连接单元的非线性变形荷载，程序将施加

相应的节点荷载使其产生平动或转动位移。对于轴向变形，程序只需施加集中力荷载即可产生平动位移；对于扭转或纯弯曲变形，程序只需要施加集中力矩荷载即可产生转动位移；而对于剪切变形，程序需要同时施加集中力和集中力矩荷载，用以产生平动位移和转动位移。

如前所述，在 CSI 程序（包括 SAP2000, ETABS, CSiBridge 等）中，单元质量矩阵只包含节点的平动质量，并不包含节点的转动质量（即转动惯量）。因此，造成上述“无质量自由度”警告信息的原因在于：连接单元的剪切变形所需要的集中力矩荷载作用在无转动惯量的节点上。从连接单元的剪切变形计算公式可以看出，只要同时满足以下两点即可避免上述警告信息：

- 连接单元的长度等于零
- 剪切变形位置到 J 端的距离（即 d_{j2} 或 d_{j3} ）为零

若满足以上两点，转动位移对剪切变形的贡献为零，则程序不再施加相应的集中力矩荷载，“无质量自由度”的警告信息也就无从产生。另外，在《CSI 分析参考手册》的“连接单元>质量”章节中，作者也明确指出了非线性剪切变形与转动惯量的“共存”条件，感兴趣的读者可自行阅读相关内容。

通过上述分析，用户可尝试以下两种方法来消除这类警告：

- 1) 绘制零长度的连接单元，并将连接属性中水平剪切变形位置设为零。
- 2) 为连接单元指定非零的转动惯量。

然而，隔震结构主要是通过橡胶支座较大的水平变形能力来耗散地震能量，故一般来讲该警告信息不会对计算结果产生太大影响，可以忽略。

综上，该问题中提及的两类警告信息在通常情况下是可以忽略的。通过以上分析，希望让更多用户了解其中的原理，能知其所以然，融会贯通地处理其他类似的问题。

结束语

文中部分内容已总结成知识库文章，感兴趣的读者可进入链接查看阅读。

《[如何在 FNA 法中合理考虑 P-Delta 效应](#)》

《[里兹向量法与非节点荷载](#)》

《[剪切变形与无质量自由度](#)》

另外，访问[筑信达官网](#)可以获取到更多的、持续更新的技术资源：

1) 技术支持→软件培训→案例教程，提供一些典型工程案例程序实现的具体方案，了解如何应用软件处理一些典型问题。例如，可免费下载《[隔震案例](#)》，了解隔震设计在程序中实现的完整流程。

2) 技术支持→软件培训→教学视频 或 [优酷主页](#)，包括软件功能演示、网络课堂视频回放（例如观看与隔震主题相关的视频 [SAP2000 隔震设计](#)）、专家讲演录像等。

3) 通过筑信达[知识库](#)，获取常见典型问题的解决方案，用户可随时查阅和学习相关问题的详细解答和说明。