

# YJK 减隔震设计中的疑难问题解析（一）

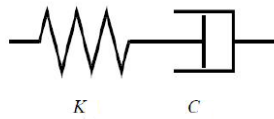
YJK 梅雨辰

## 引言

随着国务院令两区八类建筑应使用减震隔震技术，越来越多的设计师用 YJK 做减隔震设计，该文基于 YJK 5.1 版本整理和总结了设计师在用 YJK 进行减隔震设计的时候最常遇见的 4 个较典型的疑难问题，后续将持续更新。

## 一 粘滞阻尼器阻尼系数的单位换算与串联刚度的取值

粘滞阻尼器国际通用的模型是 MAXWELL 模型，它是弹簧单元和阻尼单元的串联模型



Maxwell 模型

其中阻尼单元产生的阻尼力采用业界广泛采用的模型为美国 Taylor 公司提出的  $F = CV^{\text{exp}}$  本构模型，在大多数情况下采用阻尼指数  $\text{exp} < 1$  的非线性粘滞阻尼器，因而阻尼系数  $C$  的单位是带指数的，减震厂家一般采用  $KN(s/mm)^{\text{exp}}$ ，YJK 统一用国际单位  $KN(s/m)^{\text{exp}}$ ，如下：

类型:	阻尼器麦克斯韦					
	有效刚度KE kN/m, kN. m/radCE (kN. s/m)	有效阻尼	非线性	刚度 K (kN/m)	阻尼C kN(s/m) <sup>exp</sup>	阻尼指数 exp
<input type="checkbox"/> U1	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0
<input type="checkbox"/> U2	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> U3	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	56400	282	0.25

这两者之间的换算关系要特别注意，不是简单的 1000 倍，而是和阻尼指数相关的如下关系：

$$KN(s/m)^{\text{exp}} = KN(s/mm)^{\text{exp}} \times 1000^{\text{exp}}$$

比如厂家给出的阻尼指数  $\text{exp}=0.25$ ，阻尼系数  $C=50 KN(s/mm)^{0.25}$ ，则 YJK 所填入的阻尼系数  $C[KN(s/m)^{0.25}]$  换算关系如下：

$$\frac{281 KN(s/m)^{0.25}}{\text{YJK } C} = \frac{50 KN(s/mm)^{0.25}}{\text{厂家 } C} \times 1000^{0.25}$$

另外，串联弹簧的初始刚度  $K$  实际是粘滞液体的压缩刚度与装置刚度的串联，一般为有限值，需要通过试验测得，建筑隔震及消能减震技术规程(DG/TJ 08-2326-2020/J 15292-2020)5.5.5 条明确提出产品性能中应给出初始刚度，并在附录 B 中建议采用正弦激励法，按照输入位移  $D = A\sin(2\pi f_1 t)$  来控制试验机的加载，其中  $f_1$  为结构基频。

### 3 初始刚度

试验方法:把第2款设计位移  $D_d$  幅值输入工况得到的阻尼力与位移关系数据放入 EXCEL 表,取横坐标为位移 (mm),竖向坐标为阻尼力 (kN) 绘制滞回曲线。在滞回曲线上选择两点  $A(d_1, F_{\max}/3)$ 、 $B(d_2, -F_{\max}/3)$ , 见图 B.0.2-2, 则阻尼器初始刚度按式(B.0.2)取值:

$$K_1 = \frac{2}{3} F_{\max} / (d_1 - d_2) \quad (\text{B.0.2})$$

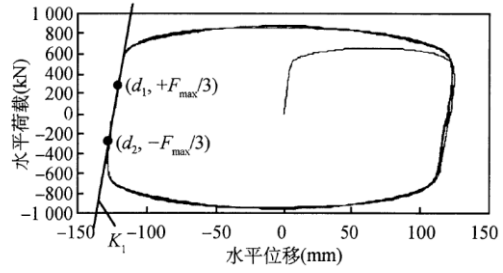


图 B.0.2-2 黏滞消能器初始刚度取值示意图

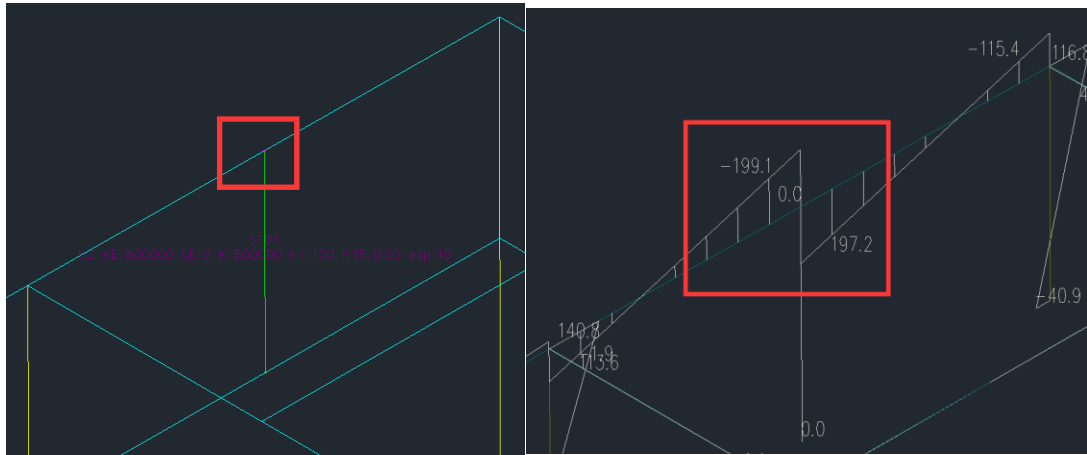
当没有试验数据时,一般根据初始刚度  $K$  与阻尼系数  $C$  的正比关系,取  $K$  为阻尼系数  $C$  的  $\beta$  倍。对于常见的粘滞流体阻尼器 VFD, 阻尼指数  $\exp$  在 0.15~0.4 的范围内,当  $K$  和  $C$  中长度量纲都取 mm 时,常见的  $\beta$  可取 2~4,当  $K$  和  $C$  中长度量纲都取 YJK 的 m 时,常见的  $\beta$  可取 200~1000;对于常见的粘滞阻尼墙 VFW, 阻尼指数  $\exp$  在 0.35~0.5 的范围内,当  $K$  和  $C$  中长度量纲都取 mm 时,常见的  $\beta$  可取 7~10,当  $K$  和  $C$  中长度量纲都取 YJK 的 m 时,常见的  $\beta$  可取 600~1000, 不同单位之间  $\beta$  的换算关系如下:

$$\beta [\text{长度量纲}m] = \beta [\text{长度量纲}mm] \times 1000^{1-\exp}$$

需要注意的是,在结构正常的阻尼系数范围内,串联刚度越大,减震器耗能越多,附加阻尼比也越大,  $K$  值超过实际值较多会过高估计结构的阻尼比,所以串联刚度的取值需要引起重视。

## 二 连接单元考虑剪切位置造成弯矩突变现象

下图描述的是一建筑顶层金属剪切阻尼器与楼层梁相交节点出现左右两侧梁弯矩突变现象。



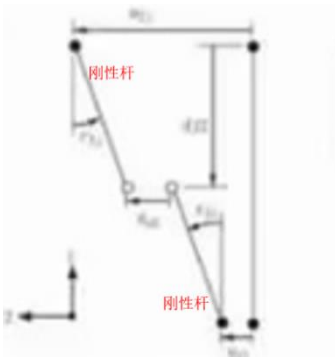
计算简图

Y 向地震单工况梁面内弯矩图

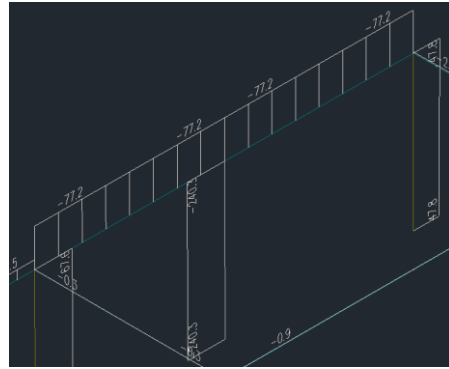
初看定义阻尼器连接属性的斜杆弯矩为 0, 该节点出现了明显的“力矩不平衡”现象。这其实并不是软件力学计算有误,是因为软件默认考虑了连接单元的剪切位置,默认剪切变形发生的位置在连接单元的中点,前处理中“连接单元考虑剪切位置”选项默认勾选。



软件内部按下图力学模型来处理，在连接单元的中点位置有两个断开的节点分别与两个端点用刚性杆相连，在水平力作用下，两个断开节点之间发生剪切位移进而产生剪力，通过与端点相连的刚性杆来模拟其附加弯矩作用



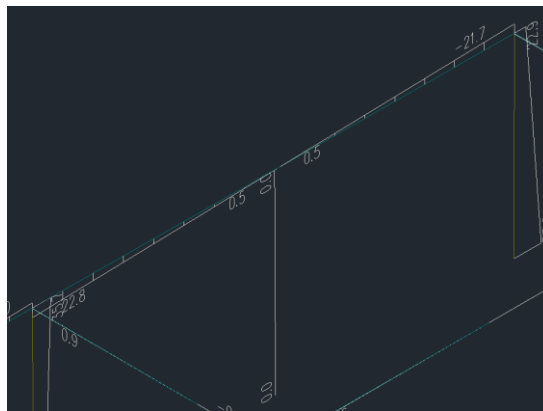
连接单元考虑剪切位置力学模型



连接单元 Y 向地震剪力

根据 Y 向地震连接单元的剪力，可以很容易计算出其对楼层梁产生的附加弯矩=连接单元剪力\*连接单元长度/2=240.3\*3300/2=396.5KN\*m 与弯矩突变值 199.1+197.2=396.3KN\*m 基本一致，完全满足力的平衡条件。

当不勾选连接单元考虑剪切位置选项时，剪切发生在连接单元的两个端点之间，由于力臂为 0，连接单元端点的剪力无法产生附加弯矩，导致梁的弯矩不会产生突变，和正常的 Y 向地震弯矩分布一致。



不勾选连接单元考虑剪切位置的 Y 向地震弯矩图

然而对于实际情况，剪切型阻尼器与上下横梁或连接墙一般是刚接，随着阻尼器高度的增加，产生的附加弯矩也是增加的，当阻尼器高度不可忽略时（如下图的粘滞阻尼墙 VFW），应

考虑其附加弯矩对子结构的不利影响。由于剪切型阻尼器合力作用点的位置一般近似位于阻尼器的高度方向的中点，YJK 默认考虑连接单元中心作为剪切位置的模型能较真实地反映实际剪切型阻尼器对结构的附加弯矩作用。



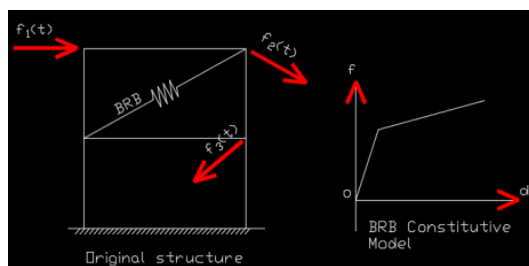
连接单元附加弯矩不可忽略的粘滞阻尼墙 (VFW)

### 三 YJK 减震结构弹性时程分析振型叠加法与直接积分法附加阻尼比差异很大的原因

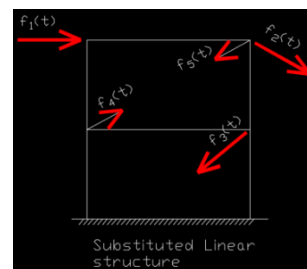
YJK 弹性时程分析提供两种算法，分别是振型叠加法和直接积分法，这是线性体系时程分析两大类分析方法。其中振型叠加法是将多自由度运动方程投影到各振型坐标下，由多个单自由度方程积分解叠加得到，而直接积分法则是直接对多自由度方程积分得到，YJK 默认采用结构动力学最著名的隐式 Newmark 平均加速度法，对于线性体系其具有无条件稳定的数值特性。

对于减隔震结构，因其减隔震连接单元一般具有非线性属性，其运动方程一般为非线性方程。直接积分法本身很适合求解非线性方程，而由于非线性体系严格来说没有振型的概念，因而振型叠加法无法直接用于减隔震结构计算。对于带有非线性连接单元的体系选择振型叠加法时，软件采用结构动力学权威 WILSON 教授提出的快速非线性分析法（简称 FNA 法）。经常遇到设计师用这两种方法计算结构的附加阻尼比，差别非常大，很多时候甚至 FNA 法的附加阻尼比是直接积分法的数倍，此时直接积分法的出错率相对较低，主要是 FNA 法的问题，下面具体来讨论。

FNA 法本质是一种非线性振型叠加法，其核心是把非线性连接力当成外荷载加在等效线性体系上进行振型叠加时程分析，如下：



(a) 原体系



(b) FNA 等效体系

原减隔震体系及其 FNA 法等效线性体系

由于非线性单元力外荷载是连接单元变形或速度的函数，而单元变形或速度又是未知的，因而 FNA 法需要反复迭代求解，如下：

FNA 法迭代求解步骤

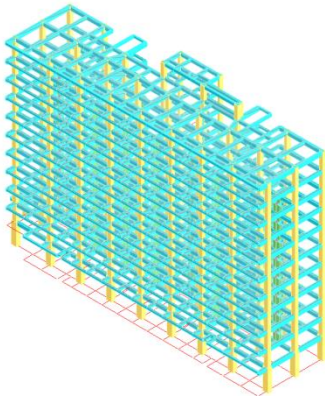
表 18.1 非线性求解算法一览

I 初始计算 - 在逐步求解之前	
1.	为无非线性单元的结构计算 $N$ 荷载相关的 Ritz 向量 $\Phi$ 。这些向量具有 $N_d$ 位移 DOF。
2.	计算 $N$ 乘 $L$ 矩阵 $B$ 。其中 $L$ 是所有非线性单元中的 DOF 总数。
3.	计算积分常量 $A_1$ --- 用于每个模式的模态方程的分段精确积分。
II 非线性求解 - 在时间 $\Delta t, 2\Delta t, 3\Delta t, \dots$	
1.	在时间 $t$ 处使用泰勒级数求解。
	$\dot{Y}(t) = \dot{Y}(t - \Delta t) + \Delta t \ddot{Y}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t^2}{2} \dddot{Y}(t - \Delta t)$
	$= \dot{Y}(t - \Delta t) + \Delta t \ddot{Y}(t - \Delta t)$
2.	为迭代 $j$ ，计算 $L$ 非线性变形和速度。
	$d(t)^j = B Y(t)^j \quad \text{和} \quad \dot{d}(t)^j = B \dot{Y}(t)^j$
3.	根据非线性单元中的变形和速度历史，计算 $L$ 非线性力 $f(t)^j$ 。
4.	计算新模态力向量 $\bar{F}(t)^j = F(t) - B^T [f(t)^j - k_d d(t)^j]$ 。
5.	为下次迭代使用分段精确积分法求解模态方程。
	$Y(t)^j, \dot{Y}(t)^j$
6.	计算误差范数： $Err = \frac{\sum_{n=1}^N  \bar{F}(t)_n^j  - \sum_{n=1}^N  \bar{F}(t)_n^{j-1} }{\sum_{n=1}^N  \bar{F}(t)_n^j }$
7.	检验收敛 - 此处公差 $Tol$ 是指定的。
	如果 $Err > Tol$ ，则转到步骤 2， $i = i + 1$
	如果 $Err < Tol$ ，则转到步骤 1， $t = t + \Delta t$

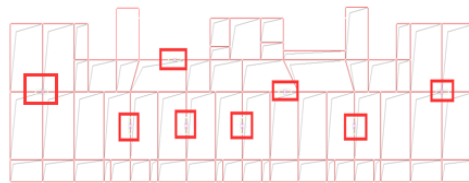
上式中  $B$  为单元变形及模态坐标转换矩阵，从 FNA 法计算过程可以总结以下几点：

- 1 整个过程迭代必须收敛，当不收敛时手动减小时间步长（积分步长）；
- 2 非线性位移是模态力叠加得到的，必须保证足够的振型数以捕捉非线性单元行为，当振型数不充分时，会高估非线性连接单元的响应和结构的附加阻尼比；
- 3 减少振型数最可靠的方法是采用基于荷载的 RITZ 向量生成振型；
- 4 FNA 法等效线性体系的振型和周期影响主结构的模态阻尼，默认采用振型阻尼（建议用可靠的有效刚度作为线性体系）；

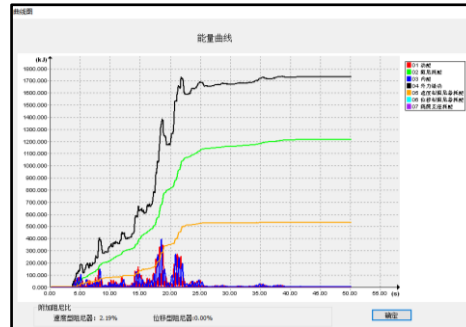
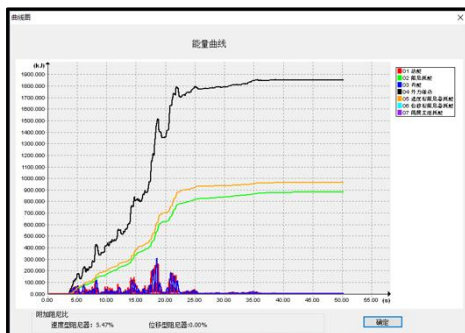
尤其第二点是高频易错点，振型数量不够时导致附加阻尼比差异很大，比如下面的案例，FNA 法与直接积分法的对比。



地上 12 层的教学楼



墙式粘滞阻尼器平面布置图（数量共 64 个）



FNA 法（100 振型）（附加阻尼比 5.47%）

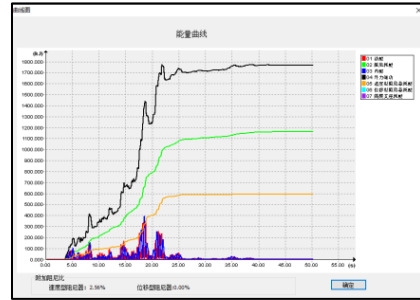
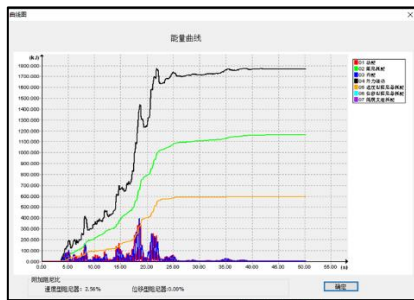
直接积分法（附加阻尼比 2.19%）

X 向平动振型参与质量系数统计：100%

Y 向平动振型参与质量系数统计：100%

从上图可看出 100 振型的振型叠加法的能量曲线和直接积分法差异非常大，FNA 法的附加阻尼比超过直接积分法的 2 倍，振型特征值分析选择特征向量 LANCZOS 算法，选择 100 振型数其质量参与系数已接近 100%，但其实 FNA 法所需振型数和质量参与系数完全没有关系，这个模型 100 振型根本不能充分考虑连接单元的行为。

继续增加振型数至 200 和 300，附加阻尼比急剧减小最后稳定至 2.56%，实际 FNA 法已接近收敛，由此可见振型数是否足够对 FNA 计算结果有重大影响，应引起足够重视。为了减小振型数，用 YJK 自带的 RITZ 向量法计算相比 LANCZOS 和 WYD-RITZ 达到相同精度时，能稍微降低振型数的数量，但仍然要增加振型数试算直到能量曲线和滞回曲线收敛为止，目前这种试算方法是 FNA 法得到正确可靠结果的一种可采用的方法。



FNA 法（200 振型）（附加阻尼比 2.56%）

FNA 法（300 振型）（附加阻尼比 2.56%）

另外，FNA 法 300 阶振型（附加阻尼比 2.56%）与直接积分法（附加阻尼比 2.19%）的结果仍然存在超过 10% 的差距，这个差距是两种算法固有阻尼模型的不同所导致的，FNA 法采用的各阶振型定义阻尼比的振型阻尼模型，而直接积分法采用的是质量和刚度线性加权后的瑞利阻尼模型，当主体结构为同种材料时，两种阻尼模型如下图所示：

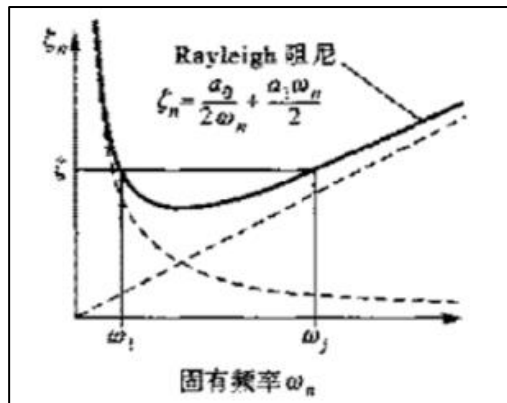
$$c = (\Phi^T)^{-1} C \Phi^{-1} = m \Phi M^{-1} C M^{-1} \Phi^T m$$

其中  $M$  为广义质量系数矩阵， $\Phi$  为振型矩阵， $C$  为广义阻尼系数矩阵，注意到  $M^{-1} C M^{-1}$  为对角阵，可表示为：

$$d = M^{-1} C M^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2\zeta_1 \omega_1}{M_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{2\zeta_2 \omega_2}{M_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{2\zeta_N \omega_N}{M_N} \end{bmatrix}$$

则结构阻尼阵可表示为：  
$$c = m \Phi d \Phi^T m$$

YJK FNA 振型阻尼



YJK 直接积分法瑞利阻尼

从上图可看出，同种材料的结构，FNA 法的振型阻尼各阶模型的阻尼比都是恒定的结构固有阻尼比，而直接积分法的瑞利阻尼是只有两个周期（频率）满足固有阻尼比，在两个周期（频率）之间的振型阻尼比小于固有阻尼比，两个周期（频率）以外的振型阻尼比大于固有阻尼比。显然两个周期值距离越近，结构固有阻尼耗能就越大，反之，则结构固有阻尼耗能越小，这两个周期确定了瑞利阻尼的函数关系，其确定方法不唯一，国内外有很多学者有不同的建议，一般有以下四种。

瑞利阻尼系数的 4 种确定方法：①假定质量矩阵和刚度矩阵对瑞利阻尼的贡献相等，那么有：

$$\alpha = \xi \omega_1, \beta = \xi / \omega_1 \quad (2)$$

由结构的基频，得到两个阻尼系数。②定义结构的敏感频率范围为  $f_a \sim f_b$ ，在频率边界处，阻尼比为：

$$\xi_a = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{\omega_a} + \beta \omega_a \right), \xi_b = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{\omega_b} + \beta \omega_b \right) \quad (3)$$

联立方程，求出  $\alpha$  和  $\beta$ 。③在方法②的基础上，令

$$\frac{d\xi}{d\omega} = -\frac{\alpha}{2\omega^2} + 2\frac{\beta}{2} = 0 \quad (4)$$

有  $\omega = \sqrt{\alpha/\beta}$ ， $\xi_{\min} = \sqrt{\alpha\beta}$ 。在选定的频率边界处，阻尼比为：

$$\xi_{\max} = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{\omega_a} + \beta \omega_a \right), \xi_{\min} = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{\omega_b} + \beta \omega_b \right) \quad (5)$$

定义  $\xi_0 = (\xi_{\max} + \xi_{\min}) / 2$ ，根据式 (5) 可以求出阻尼系数，当计算得到的阻尼比  $\xi < \xi_0$  时，取  $\xi = \xi_0$ ，求得  $\alpha, \beta$ 。④用  $\omega_1$  和  $\omega_2$  两个频率来确定  $\alpha$  和  $\beta$ ， $\omega_1$  为结构的基频， $\omega_2 = n\omega_1$ ， $n$  是大于  $\omega_2/\omega_1$  的奇数，

其中  $\omega_e$  为地震波的主频。此法既考虑结构频率特性，也考虑地震动频率特性。

YJK 默认采用 T1 和 T3，就是默认上图中方法 2 中的敏感范围为前三周期，这对于规则简单的低矮剪切型结构是合适的，这些结构基本前三振型质量参与系数都接近 90%，但对于一些不规则或高层结构，其高阶振型对结构反应也有不小的影响，这时选 T1 和 T3 是不合适的，会导致阻尼耗能偏大，因而结构动力学权威 CLOUGH 教授建议取 T1 和对结构反应影响较大的某个高阶频率，综合文献方法 2 和 CLOUGH 教授的建议，参考下图的振型质量参数系数可看出第 6 周期是最后一个高阶振型质量参与系数较大的周期，取 T1 和 T6 作为确定瑞利阻尼系数的两个周期，填入瑞利阻尼设置的对话框。

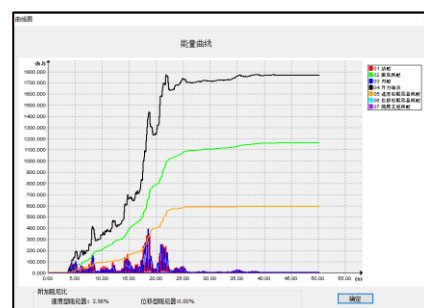
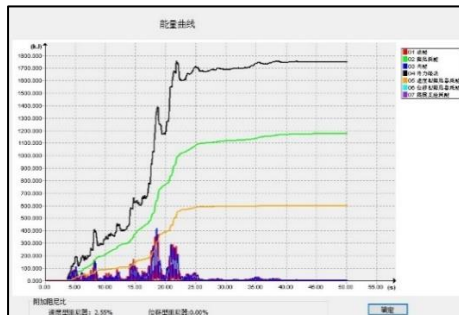
考虑扭转耦联时的振动周期(秒)、X、Y 方向的平动系数、扭转系数				振型号	X向平动质量系数%(sum)	Y向平动质量系数%(sum)	Z向扭转质量系数%(sum)
振型号	周期	转角	平动系数(X+Y)	扭转系数(Z)			
1	1.4276	0.00	1.00(0.00+1.00)	0.00	0.06( 0.06)	76.00( 76.00)	0.13( 0.13)
2	1.3401	0.00	0.04(0.03+0.00)	0.96	2.50( 2.55)	0.13( 76.13)	73.81( 73.94)
3	1.1737	0.00	0.97(0.97+0.00)	0.03	74.36( 77.41)	0.03( 76.16)	2.58( 76.51)
4	0.4839	0.00	1.00(0.00+1.00)	0.00	0.01( 77.42)	12.48( 88.64)	0.03( 76.54)
5	0.4502	0.00	0.03(0.02+0.01)	0.97	0.21( 77.73)	0.04( 88.68)	10.98( 87.52)
6	0.3951	0.00	0.98(0.98+0.00)	0.02	10.29( 88.02)	0.00( 88.69)	0.25( 87.76)
7	0.2877	0.00	1.00(0.00+1.00)	0.00	0.00( 88.02)	4.41( 93.09)	0.01( 87.77)
8	0.2534	0.00	0.03(0.02+0.01)	0.97	0.13( 88.15)	0.01( 93.10)	4.26( 92.03)
9	0.2261	0.00	0.98(0.98+0.00)	0.02	4.22( 92.37)	0.00( 93.11)	0.09( 92.12)
10	0.1864	0.00	1.00(0.00+1.00)	0.00	0.00( 92.38)	2.56( 95.66)	0.00( 92.12)
11	0.1756	0.00	0.03(0.02+0.01)	0.97	0.08( 92.46)	0.00( 95.67)	2.57( 94.59)
12	0.1560	0.00	0.98(0.98+0.00)	0.02	2.53( 95.08)	0.00( 95.67)	0.06( 94.75)
13	0.1383	0.00	1.00(0.00+1.00)	0.00	0.00( 95.08)	1.70( 97.37)	0.00( 94.75)
14	0.1264	0.00	0.03(0.02+0.01)	0.97	0.07( 95.16)	0.00( 97.37)	1.60( 96.36)
					1.71( 96.87)	0.00( 97.37)	0.07( 96.42)
					0.00( 96.87)	1.06( 98.44)	0.01( 96.43)
					0.06( 96.94)	0.00( 98.44)	1.14( 97.53)
					0.95( 97.89)	0.05( 98.48)	0.03( 97.61)

结构的周期和质量参与系数

瑞利阻尼

振型A: 1.42764, 振型B: 0.395

阻尼比: 0.05, 0.05



直接积分法选择 T1 和 T6 时（附加阻尼比 2.55%）

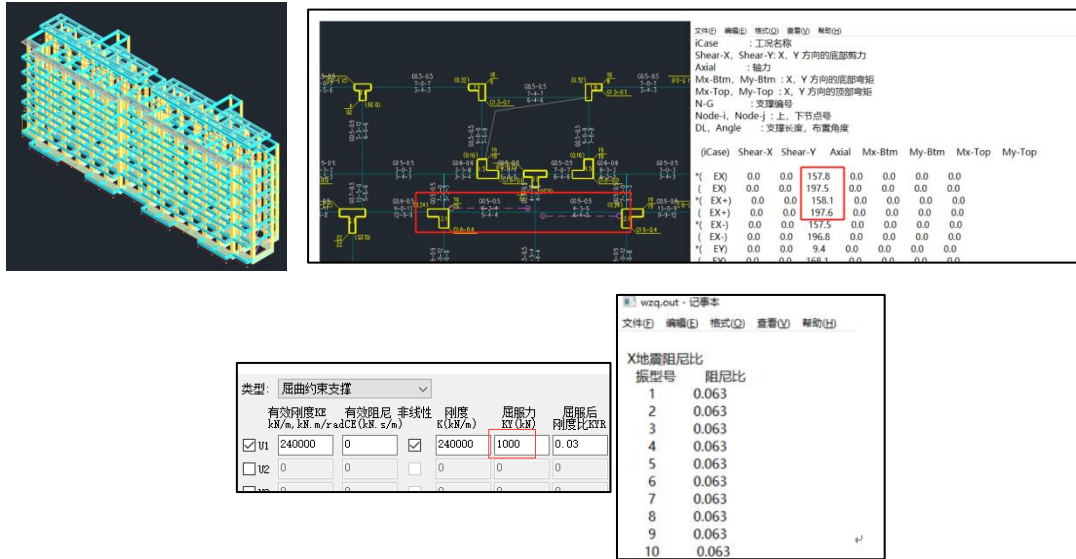
FNA 法（300 振型）（附加阻尼比 2.56%）

从以上结果可知，固有阻尼耗能降低，阻尼器耗能增大，附加阻尼比增大与 FNA 法

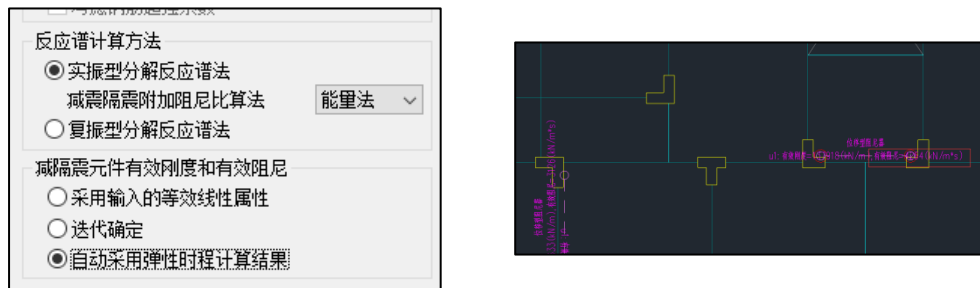
(300阶振型) 接近收敛的结果就基本一致了, 从而说明阻尼模型也是影响两种算法差异的一个客观原因。目前来说, 两种方法个人更推荐直接积分法, 其容错率较低, 虽然瑞利阻尼对计算结果有一定影响, 但其一般不会产生无法使用的错误结果。

#### 四 BRB 轴力远小于屈服力却出现了附加阻尼比

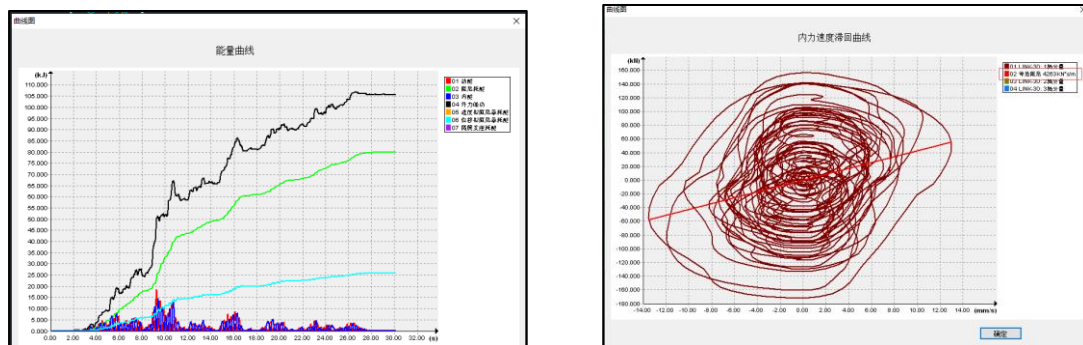
下面讲屈曲约束支撑 BRB 的一个典型问题, 一栋如图所示的布置 BRB 的教学楼, 小震最大出力 200kN 不到, 阻尼器定义中设置的屈服力为 1000kN, 却在反应谱中出现了附加阻尼比



这类问题都会勾选自动采用弹性时程计算有效刚度和阻尼, 可以很明显看出其有效阻尼不为 0。



显然其弹性时程分析结果的能量曲线和滞回曲线都明显存在 BRB 的耗能。



这类问题主要是由 BRB 连接属性中的参数屈服指数造成的, 软件用塑性 wen 模型来模拟 BRB, 该本构模型如下:

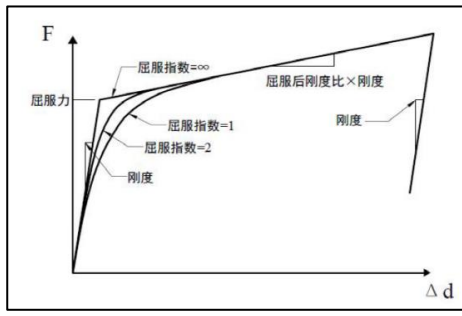


该单元用于屈服约束支撑或塑形单元的时程分析时，单元6个内力-变形关系均独立，其内力 $f$ 与变形 $z$ 的关系如下：

$$f = rkd + (1 - r)Yz \quad (1)$$

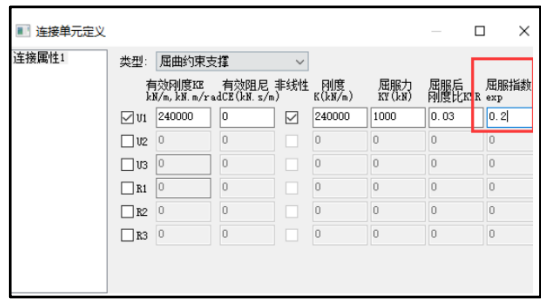
式中各参数含义如表2。

其中奇异变量 $z$ 的初始值为0，其根据如下微分方程(2)算出

$$\dot{z} = \begin{cases} \frac{k}{Y} d (1 - |z|^{exp}) & \text{if } zd > 0 \\ \frac{k}{Y} d & \text{if } zd \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$


塑性 WEN 模型本构

其通过奇异变量  $Z$  光滑连接屈服前和屈服后两条直线，避免双折线模型的拐点困难，使时程分析相较于双折线模型收敛性提高，屈服指数  $exp$  控制过渡段的曲率，屈服指数越大，过渡段曲线长度越短、曲率越大；屈服指数越小，过渡段曲线长度越长、曲率越小，当屈服指数  $exp$  无穷大时，WEN 模型退化为有明显拐点的双折线模型，上面展示了这个屈服指数对本构曲线的影响，可以很明显的发现当屈服指数很小时，其曲线过渡段的起始点所对应的力远小于屈服力。正是这个原因，该模型的屈服指数只有 0.2，导致在远小于屈服力时本构曲线产生非线性，出现了塑性耗能，因而这个参数的取值是否合适很多时候对时程分析的结果影响很大，需引起足够的重视。另外该参数仅对时程分析起作用，不影响反应谱迭代的结果，反应谱迭代仍然是双折线模型。



实际上对于 BRB，工程中常见的屈服指数一般在 5 到 20 之间，当填常见的最小值 5 时，过渡曲线的开始段接近屈服力，阻尼耗能和等效阻尼接近于 0，反应谱读取弹性时程也没有附加阻尼比了。

