



盈建科软件
YJK Building Software

YJK减隔震结构设计易错点和难点解析

梅雨辰

2022.11.30



YJK V5.1

北京盈建科软件股份有限公司

Beijing YJK Building Software Co., Ltd

目录

一、 YJK减震结构设计易错点及难点

二、 YJK隔震结构设计易错点及难点

三、 YJK组合减隔震结构设计要点



一、YJK减震结构设计易错点 及难点

问题1 粘滞阻尼器阻尼系数的单位换算与串联刚度的取值

常见三种粘滞阻尼器



筒式黏滞流体消能器 (VFD) 支撑型

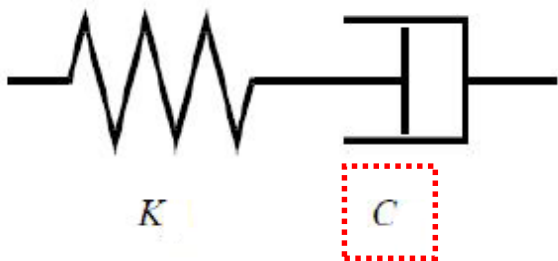


筒式黏滞流体消能器 (VFD) 墙式

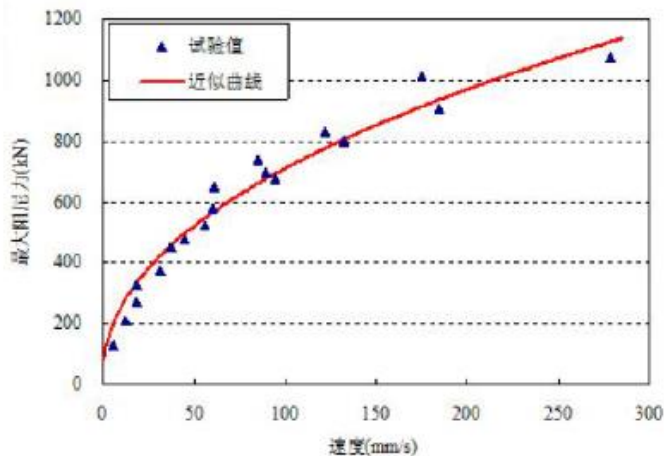


粘滞阻尼墙 (VFW)

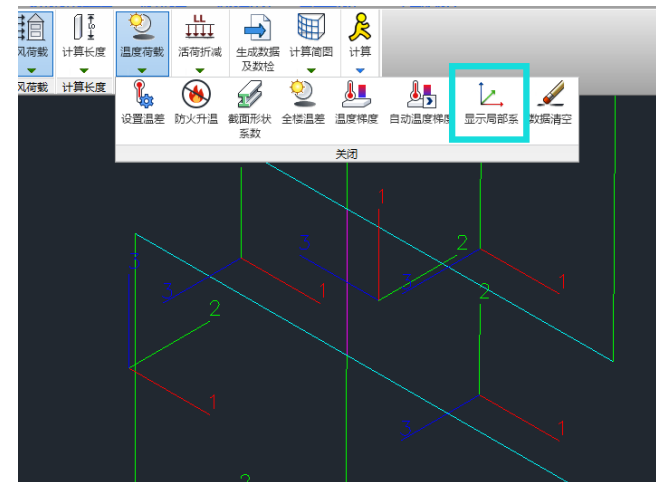
问题1 粘滞阻尼器阻尼系数的单位换算与串联刚度的取值



Maxwell 模型



阻尼力 - 速度关系曲线 $F_d = CV^{\exp}$



连接单元定义

连接属性1	类型:	有效刚度KE kN/m, kN. m/rad	有效阻尼 CE (kN. s/m)	非线性	刚度 K (kN/m)	阻尼c kN (s/m) ^{exp}	阻尼指数 exp
<input type="checkbox"/> U1	阻尼器麦克斯韦	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
<input type="checkbox"/> R1		0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0
<input type="checkbox"/> R2		0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0
<input type="checkbox"/> R3		0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0

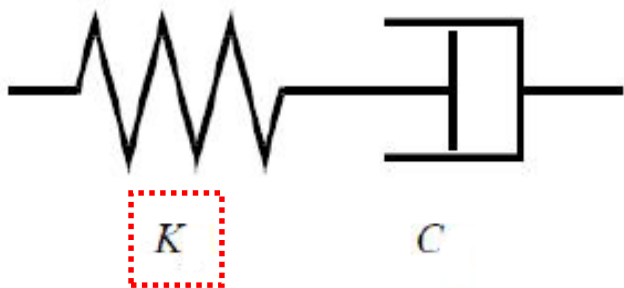
抗震时阻尼指数 $\exp < 1$

YJK 阻尼系数 C 单位: $KN (s / m)^{\exp}$

厂家阻尼系数 C 单位: $KN (s / mm)^{\exp}$

$$YJK C = \text{厂家} C * 1000^{\exp}$$

问题1 粘滞阻尼器阻尼系数的单位换算与串联刚度的取值



Maxwell 模型

初始串联刚度 K 是粘滞液体压缩刚度和固体装置的串联，是有限值！

正常阻尼系数范围内， K 越大，附加阻尼比增大最后趋于稳定

K 应根据试验值取，不宜填写过高，导致附加阻尼比过高计算，偏于不安全

建筑隔震及消能减震技术规程(DG/TJ 08-2326-2020/J 15292-2020)

5.5.5 黏滞消能器的力学行为可采用麦克斯韦(Maxwell)模型描述。产品性能指标中应给出初始刚度、阻尼系数、阻尼指数、最大阻尼力。一般阻尼力的表达宜用式(5.5.5)。

附录B 正弦激励法 ($D = A \sin(2\pi f_1 t)$)

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:

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

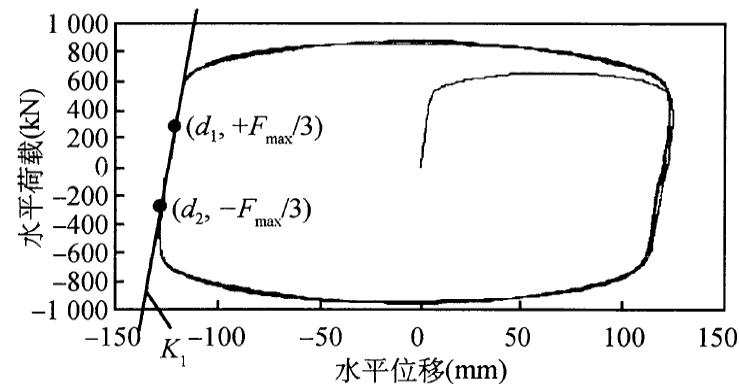


图 B.0.2-2 黏滞消能器初始刚度取值示意图

问题1 粘滞阻尼器阻尼系数的单位换算与串联刚度的取值

初始串联刚度 K 一般和阻尼系数 C 成正比

$$K = \beta C$$

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

阻尼指数 exp 一般在0.15~0.4，筒式流体粘滞阻尼器VFD经验值

$$\beta [\text{长度量纲}mm] = 2 \sim 4$$

厂家

$$\beta [\text{长度量纲}m] = 200 \sim 1000$$

YJK

某厂家VFD参数

规格型号	线性属性		非线性属性						设计速度 (预估)	最大阻尼力
	有效刚度	有效阻尼	刚度 K		阻尼系数 C		阻尼指数 α			
			ETABS	YJK	ETABS	YJK		无量纲		
kN/m	kN/ (m/s)	kN/mm	kN/m	kN/ (mm/s) ^α	kN/ (m/s) ^α	无量纲	m/s	kN		
SDE-VFD-NL×208×70	0	0	150	150000	50	281	0.25	0.3	208	
SDE-VFD-NL×250×70	0	0	180	180000	60	337	0.25	0.3	250	
SDE-VFD-NL×292×70	0	0	210	210000	70	394	0.25	0.3	292	
SDE-VFD-NL×334×70	0	0	240	240000	80	450	0.25	0.3	334	
SDE-VFD-NL×375×70	0	0	270	270000	90	506	0.25	0.3	375	
SDE-VFD-NL×416×70	0	0	300	300000	100	562	0.25	0.3	416	

粘滞阻尼墙VFW阻尼指数 exp (0.35~0.5)

$$\beta [\text{长度量纲}mm] = 7 \sim 10$$

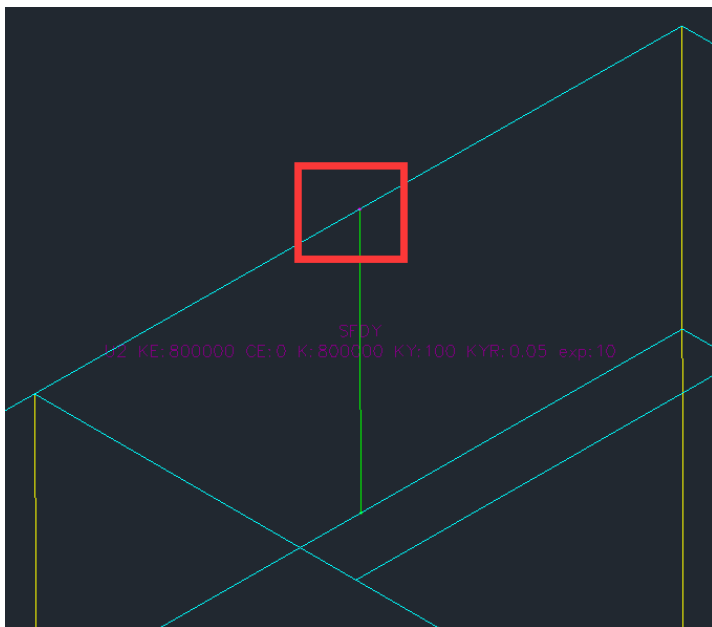
厂家

$$\beta [\text{长度量纲}m] = 600 \sim 1000$$

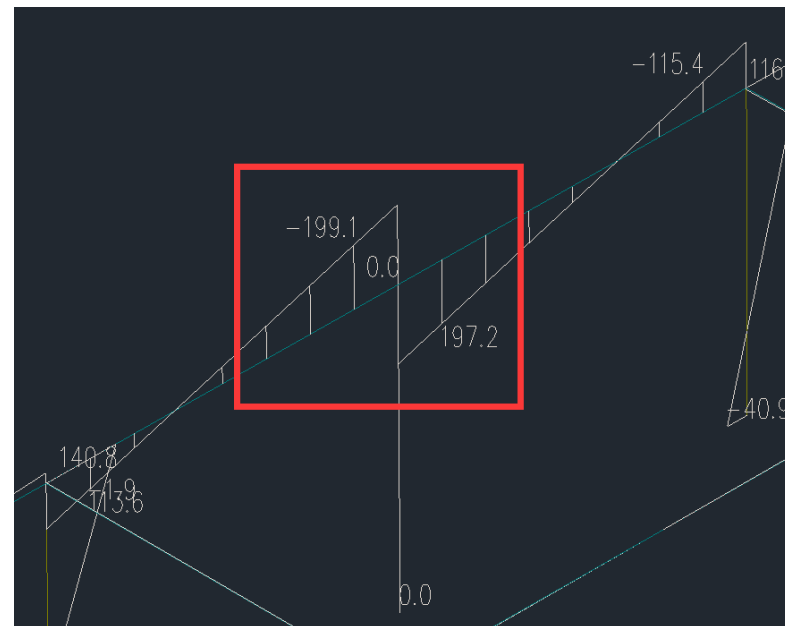
YJK

问题2 连接单元考虑剪切位置造成弯矩突变现象

“弯矩不平衡”现象



计算简图



Y向地震单工况梁面内弯矩图

连接单元定义

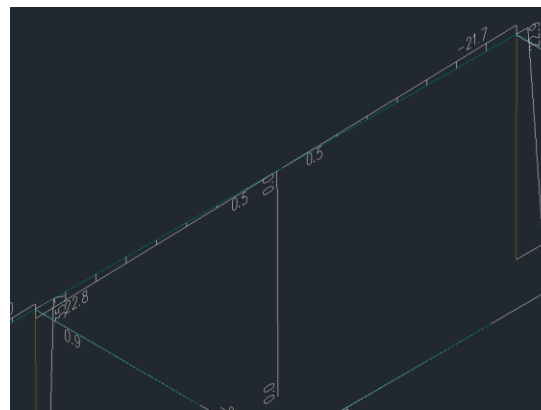
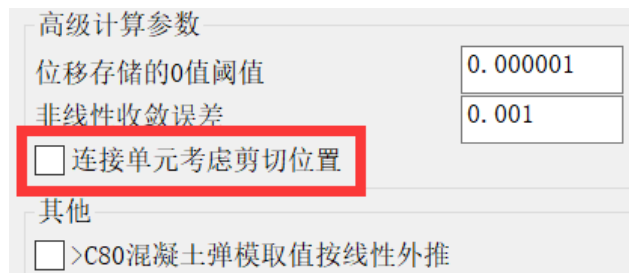
SFDY

类型: 塑性单元 (Wen)

	有效刚度KE kN/m, kN·m/rad	有效阻尼CE kN·s/m	非线性	刚度 K (kN/m)	屈服力 KY (kN)	屈服后 刚度比KYR	屈服指数 exp
<input type="checkbox"/> U1	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> U2	800000	0	<input checked="" type="checkbox"/>	800000	100	0.05	10
<input type="checkbox"/> U3	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> R1	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> R2	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> R3	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0

仅定义剪切刚度未定义弯曲刚度

问题2 连接单元考虑剪切位置造成弯矩突变现象



Y向地震弯矩图

剪切型阻尼器合力作用点一般近似在阻尼器的高度方向的中点



高度低，附加弯矩较小

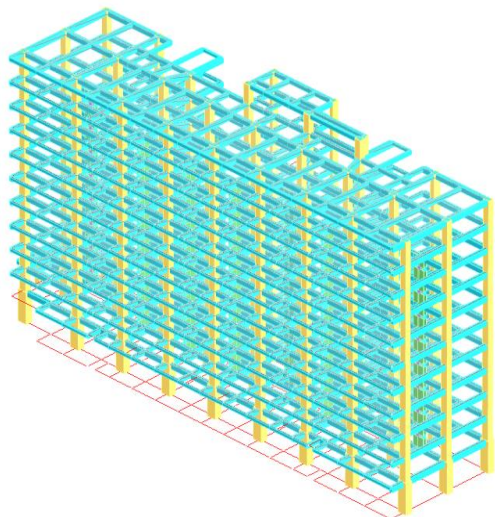


高度高，附加弯矩较大

问题3

减震结构弹性时程分析振型叠加法比直接积分法附加阻尼比大很多的主要原因

地上12层的教学楼

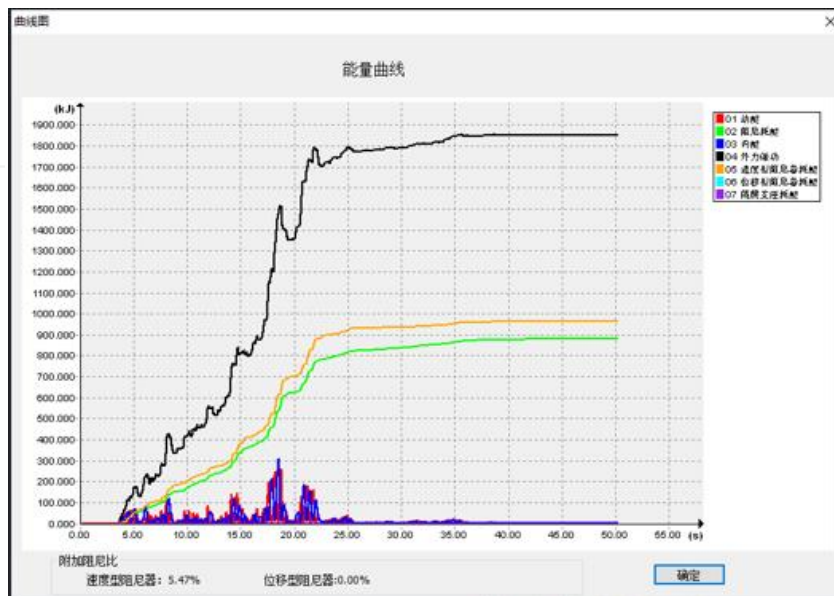


墙式粘滞阻尼器平面布置图（共64个）

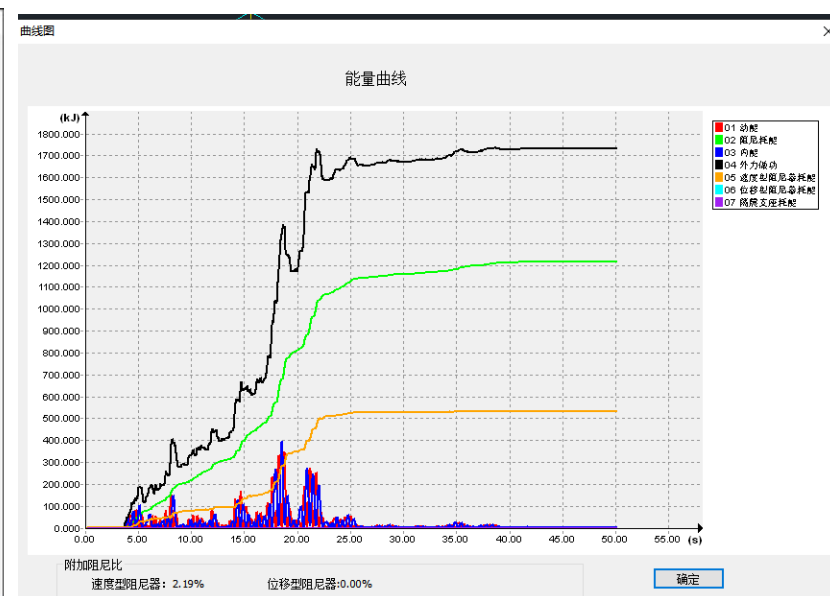
特征值分析参数
分析类型: LANCZOS
用户定义振型数: 100

文件(F)	编辑(E)	格式(O)	查看(V)	帮助(H)
79	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.40)	
80	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.40)	
81	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.40)	
82	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.40)	
83	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.40)	
84	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.40)	
85	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.08(99.48)	
86	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.48)	
87	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.02(99.50)	
88	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.50)	
89	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.10(99.61)	
90	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.61)	
91	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.61)	
92	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.61)	
93	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.62)	
94	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.01(99.63)	
95	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.02(99.65)	
96	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.14(99.79)	
97	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.79)	
98	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.00(99.80)	
99	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.01(99.81)	
100	0.00(100.00)	0.00(100.00)	0.04(99.84)	

X向平动振型参与质量系数总计: 100.00%
Y向平动振型参与质量系数总计: 100.00%
第1扭转周期(1.3401)/第1平动周期(1.4276) = 0.94



振型叠加法 (100振型)



直接积分法

问题3

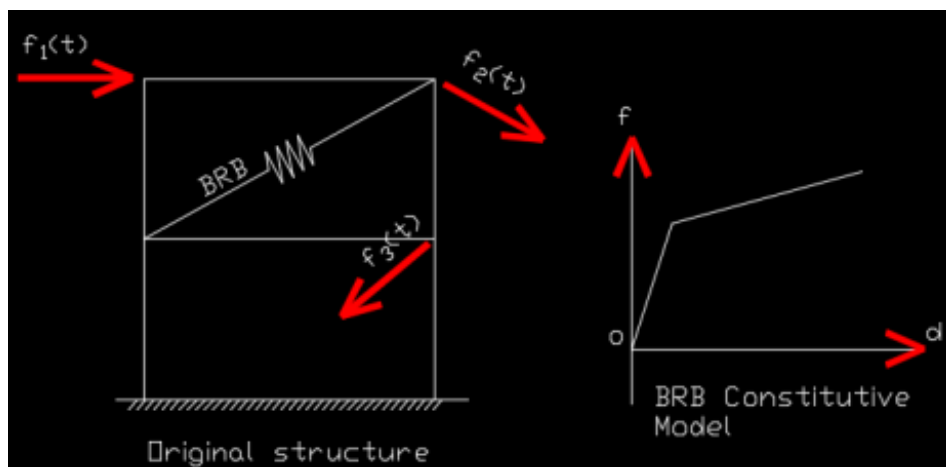
减震结构弹性时程分析振型叠加法比直接积分法附加阻尼比大很多的主要原因



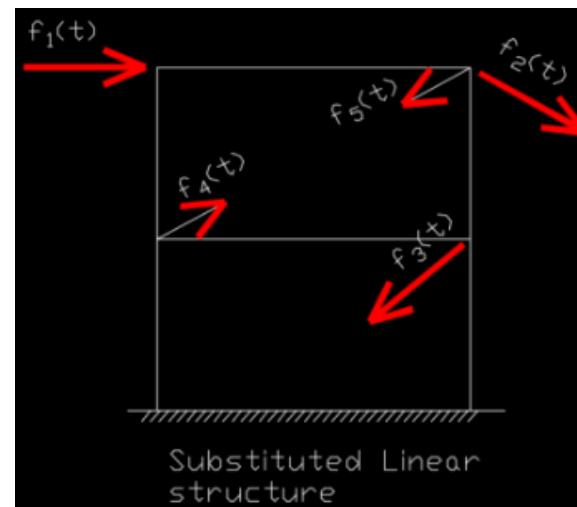
非线性连接单元弹性时程分析



问题大多数情况出在FNA法上



(a) 原体系



(b) 等效线性体系

FNA法核心:非线性连接单元力作为外荷载加在等效线性体系

问题3

减震结构弹性时程分析振型叠加法比直接积分法附加阻尼比大很多的主要原因



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，FNA法需要反复迭代求解

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 Φ 。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。 $Y(t) = Y(t - \Delta t) + \Delta t \dot{Y}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{Y}(t - \Delta t)$ $= \dot{Y}(t - \Delta t) + \Delta t \ddot{Y}(t - \Delta t)$
2. 为迭代 i ，计算 L 非线性变形和速度。 $d(t)^i = BY(t)^i \quad \text{和} \quad \dot{d}(t)^i = B\dot{Y}(t)^i$
3. 根据非线性单元中的变形和速度历史，计算 L 非线性力 $f(t)^i$ 。
4. 计算新模式力向量 $\bar{F}(t)^i = F(t) - B^T[f(t)^i - k_e d(t)^i]$ 。
5. 为下次迭代使用分段精确积分法求解模态方程。 $Y(t)^i, \dot{Y}(t)$
6. 计算误差范数： $Err = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{f}(t)_n^i - \sum_{n=1}^N \bar{f}(t)_n^{i-1} }{\sum_{n=1}^N \bar{f}(t)_n^i }$
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， $t = t + \Delta t$

说明

- 1 B为单元变形及模态坐标转换矩阵。
- 2 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）。（应对FNA计算失败的方案）
3. 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。
- 4 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。
5. 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（各阶振型定义阻尼比）。（建议用可靠的有效刚度作为线性体系）

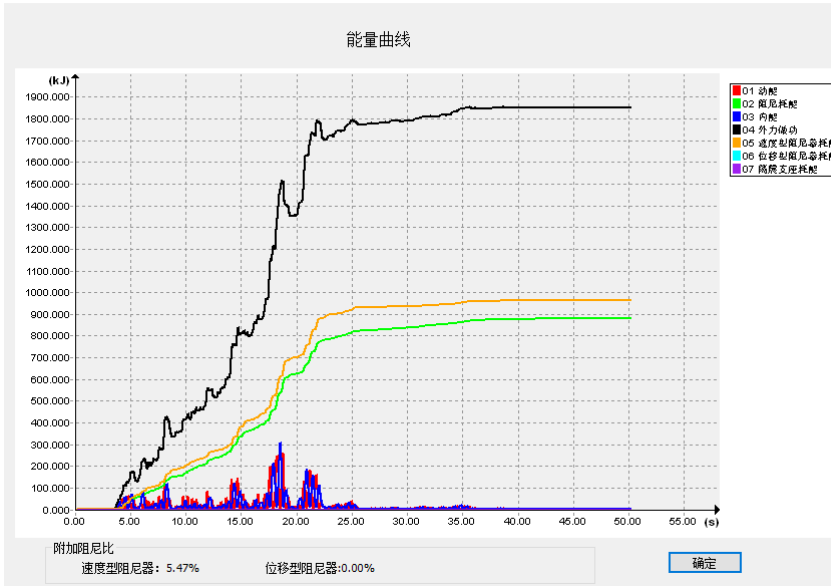
问题3

减震结构弹性时程分析振型叠加法比直接积分法附加阻尼比大很多的主要原因

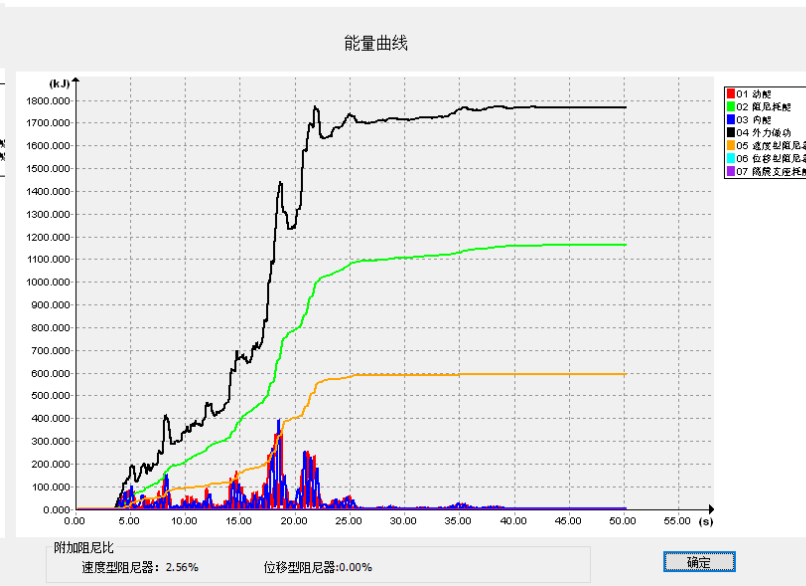


盈建科软件
YJK Building Software

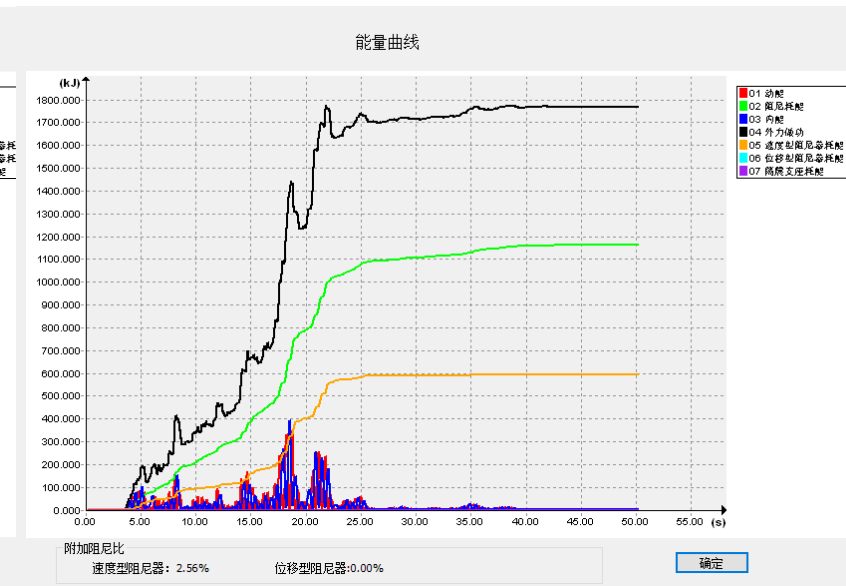
曲线图



曲线图



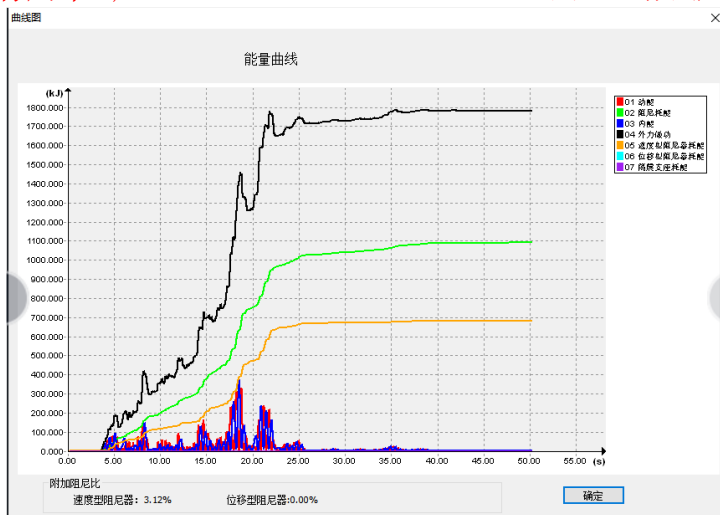
曲线图



FNA法100阶振型（附加阻尼比5.47%）

FNA法200阶振型（附加阻尼比2.56%）

FNA法300阶振型（附加阻尼比2.56%）



特征值分析参数

分析类型

用户定义振型数

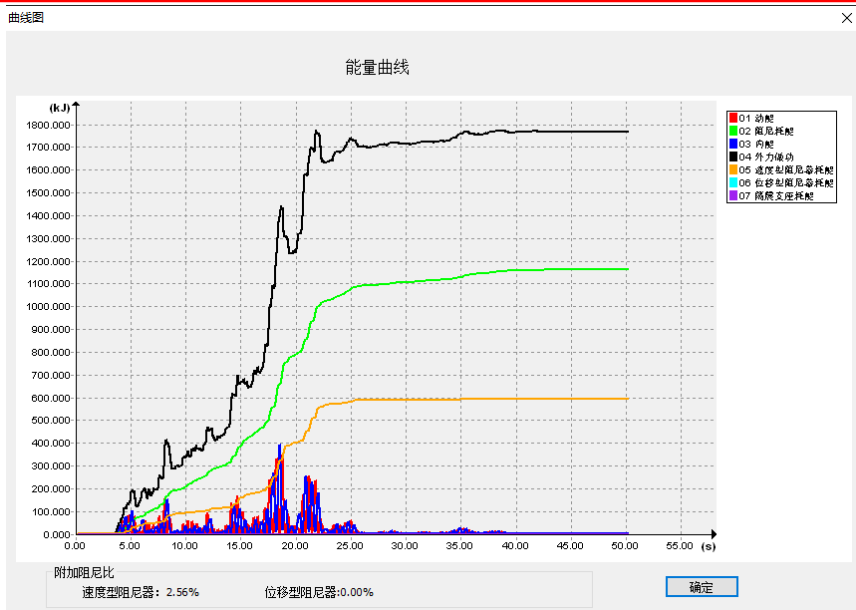
FNA（附加阻尼比3.12%）

精度有所提高

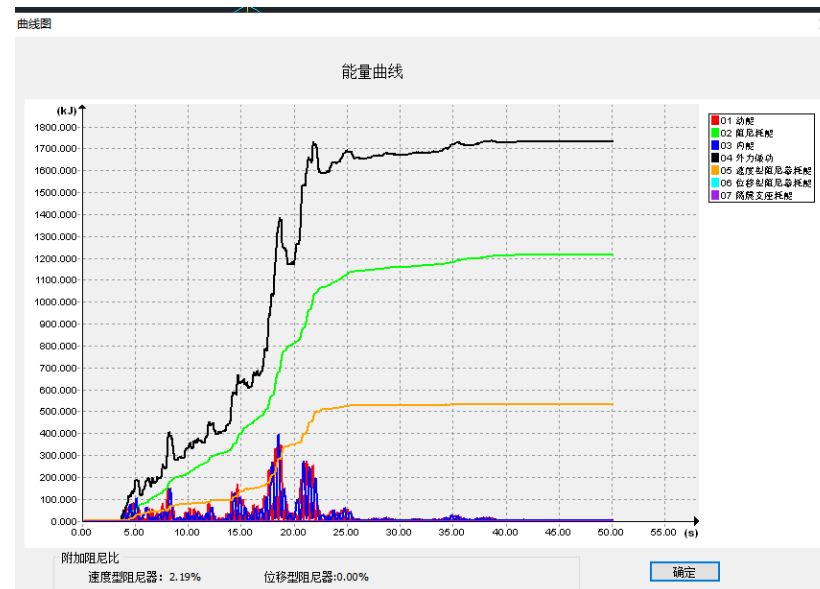
建议：实际采用FNA法计算绝对不能以质量参与系数来作为衡量振型是否足够的指标，需要增加振型数试算直到非线性滞回和能量曲线收敛为止，这是FNA高频出错点

问题3

减震结构弹性时程分析振型叠加法比直接积分法附加阻尼比大很多的主要原因



FNA法300阶振型（附加阻尼比2.56%）



直接积分法（附加阻尼比2.19%）

接近但仍然有差距



固有阻尼模型的差异

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

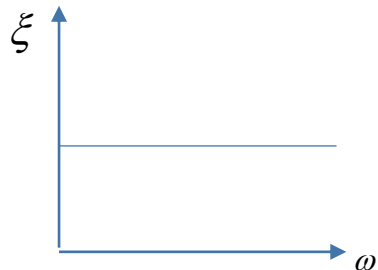
其中M为广义质量系数矩阵，Φ为振型矩阵，C为广义阻尼系数矩阵，注意到M⁻¹C M⁻¹

为对角阵，可表示为：

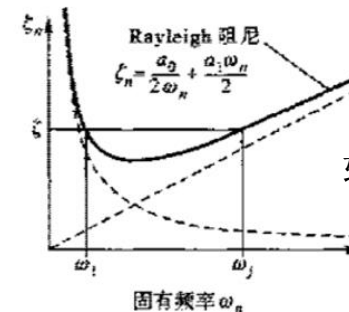
$$d = M^{-1} C M^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{2\zeta_1 \omega_1}{M_1} & 0 & L & 0 \\ 0 & \frac{2\zeta_2 \omega_2}{M_2} & L & 0 \\ M & M & O & M \\ 0 & 0 & L & \frac{2\zeta_N \omega_N}{M_N} \end{bmatrix}$$

则结构阻尼阵可表示为：

$$c = m \Phi d \Phi^T m$$



YJK FNA振型阻尼（固有阻尼比为常数同种材料）



软件默认两个周期取T1和T3

YJK直接积分法瑞利阻尼（两个周期影响固有阻尼比）

问题3

减震结构弹性时程分析振型叠加法比直接积分法附加阻尼比大很多的主要原因

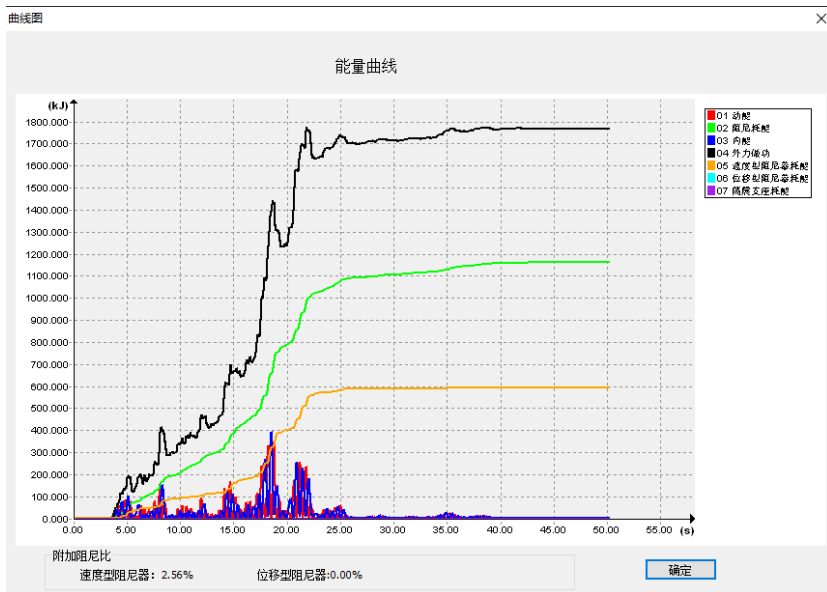
瑞利阻尼取第1周期和质量参与较大的高阶第6周期

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	周期	转角	平动系数(X+Y)	扭转系数(Z)	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)
1	1.4276	0.00	1.00(0.00+1.00)	0.00	1	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	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	3	74.86(77.41)	0.03(76.16)	2.58(76.51)
4	0.4839	0.00	1.00(0.00+1.00)	0.00	4	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	5	0.31(77.73)	0.04(88.68)	10.98(87.52)
6	0.3951	0.00	0.98(0.98+0.00)	0.02	6	10.29(88.02)	0.00(88.69)	0.25(87.76)
7	0.2677	0.00	1.00(0.00+1.00)	0.00	7	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	8	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	9	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	10	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	11	0.08(92.46)	0.00(95.67)	2.57(94.69)
12	0.1560	0.00	0.98(0.98+0.00)	0.02	12	2.63(95.08)	0.00(95.67)	0.06(94.75)
13	0.1383	0.00	1.00(0.00+1.00)	0.00	13	0.00(95.09)	1.70(97.37)	0.00(94.75)
14	0.1204	0.00	0.03(0.02+0.01)	0.97	14	0.07(95.16)	0.00(97.37)	1.60(96.36)
					15	1.71(96.87)	0.00(97.37)	0.07(96.42)
					16	0.00(96.87)	1.06(98.44)	0.01(96.43)
					17	0.06(96.94)	0.00(98.44)	1.14(97.58)
					18	0.95(97.89)	0.05(98.48)	0.03(97.61)
					19	0.00(97.89)	0.00(98.48)	0.00(97.61)

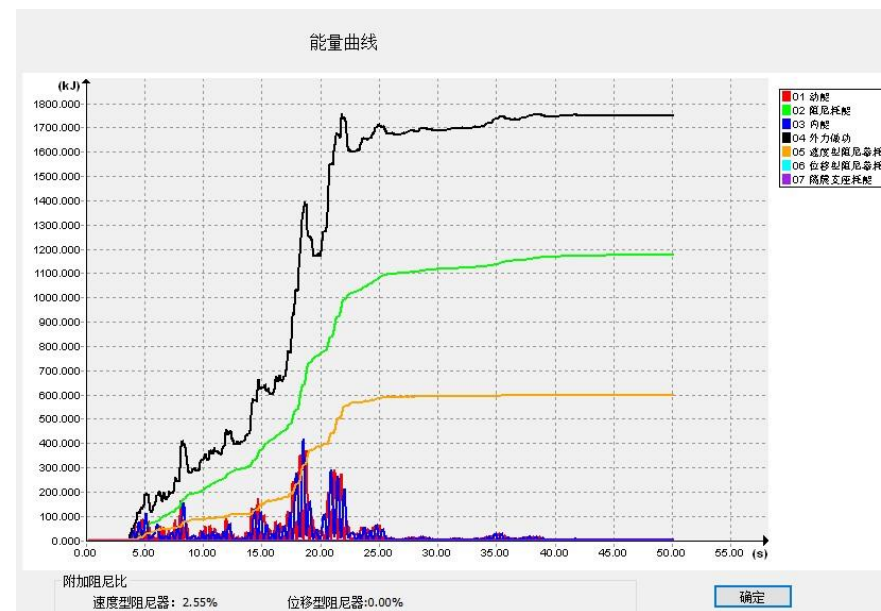
瑞利阻尼

	振型A	振型B
周期:	1.42764	0.395
阻尼比:	0.05	0.05



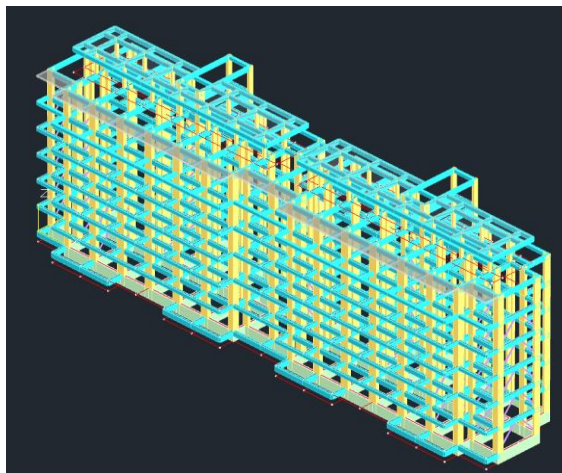
FNA法30阶振型（附加阻尼比2.56%）

基本一致



直接积分法选择T1和T6时（附加阻尼比2.55%）

问题4 BRB轴力远小于屈服力却出现了附加阻尼比



类型: 屈曲约束支撑

有效刚度KE kN/m, kN.m/rad	有效阻尼非线性 kN.s/m	非线性	刚度 K (kN/m)	屈服力 KY (kN)	屈服后 刚度比KYR	
<input checked="" type="checkbox"/> V1	240000	0	<input checked="" type="checkbox"/>	240000	1000	0.03
<input type="checkbox"/> V2	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0
<input type="checkbox"/> V3	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

iCase : 工况名称
Shear-X, Shear-Y: X, Y 方向的底部剪力
Axial : 轴力
Mx-Btm, My-Btm : X, Y 方向的底部弯矩
Mx-Top, My-Top : X, Y 方向的顶部弯矩
N-G : 支撑编号
Node-i, Node-j : 上, 下节点号
DL, Angle : 支撑长度, 布置角度

(iCase)	Shear-X	Shear-Y	Axial	Mx-Btm	My-Btm	Mx-Top	My-Top
*(EX)	0.0	0.0	157.8	0.0	0.0	0.0	0.0
(EX)	0.0	0.0	197.5	0.0	0.0	0.0	0.0
*(EX+)	0.0	0.0	158.1	0.0	0.0	0.0	0.0
(EX+)	0.0	0.0	197.6	0.0	0.0	0.0	0.0
*(EX-)	0.0	0.0	157.5	0.0	0.0	0.0	0.0
(EX-)	0.0	0.0	196.8	0.0	0.0	0.0	0.0
*(EY)	0.0	0.0	9.4	0.0	0.0	0.0	0.0
(EY)	0.0	0.0	168.1	0.0	0.0	0.0	0.0

轴力远小于屈服力
→
产生附加阻尼比

wzq.out - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

X地震阻尼比

振型号	阻尼比
1	0.063
2	0.063
3	0.063
4	0.063
5	0.063
6	0.063
7	0.063
8	0.063
9	0.063
10	0.063
11	0.063
12	0.063
13	0.063
14	0.063
15	0.063
16	0.063
17	0.063
18	0.063
19	0.063
20	0.063
21	0.063
22	0.063

参数检查

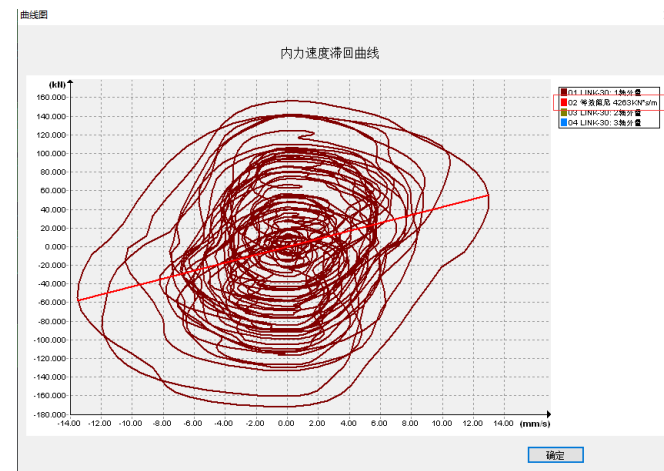
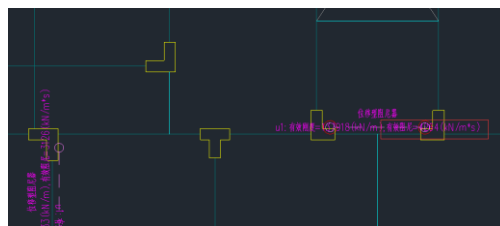
反应谱计算方法

实振型分解反应谱法
减震隔震附加阻尼比算法 能里法

复振型分解反应谱法

减隔震元件有效刚度和有效阻尼

采用输入的等效线性属性
 迭代确定
 自动采用弹性时程计算结果



问题4 BRB轴力远小于屈服力却出现了附加阻尼比

屈服指数取值不合理（该参数只对时程分析有效，反应谱迭代不起作用）



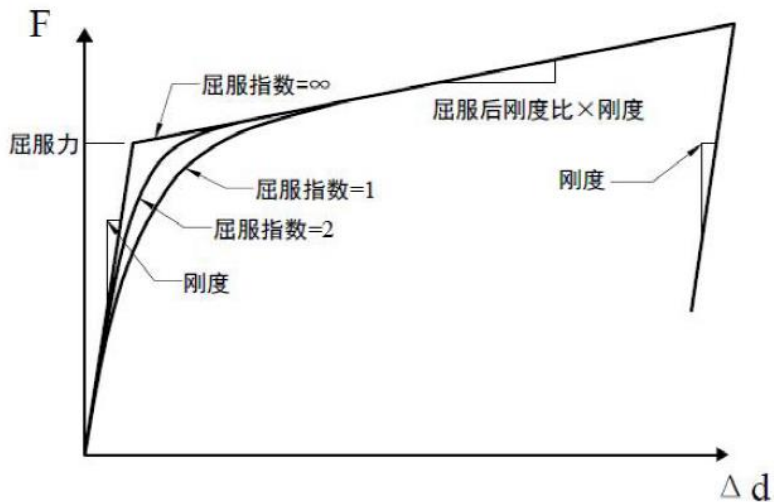
该单元用于屈曲约束支撑或塑形单元的时程分析时，单元6个内力-变形关系均独立，其内力 f 与变形 d 的关系如下：

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

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

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

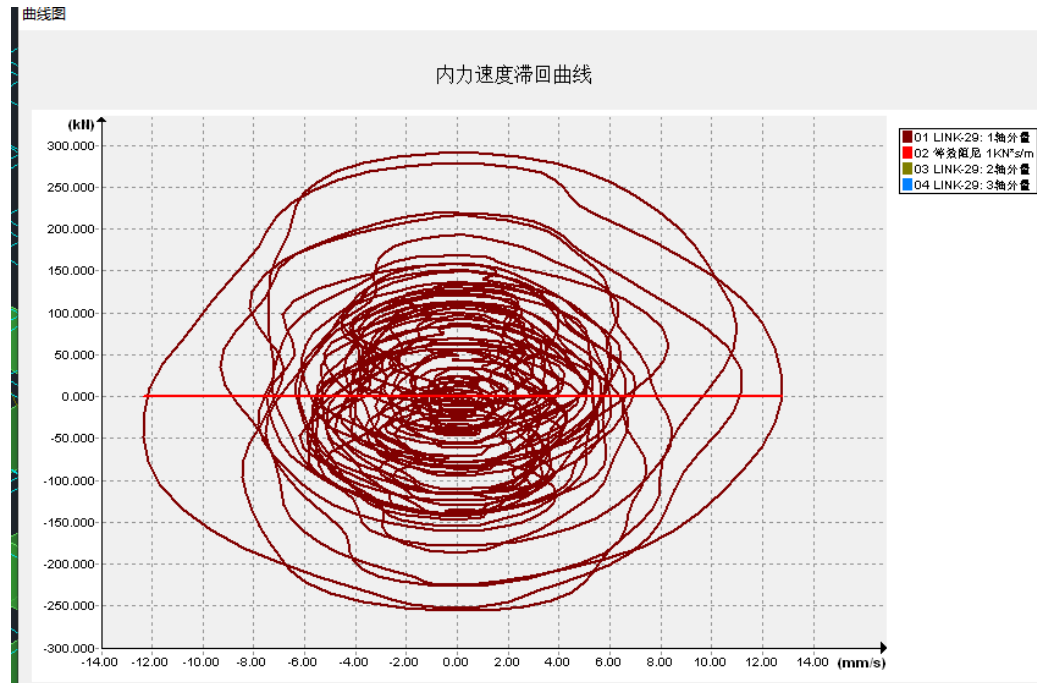


对于BRB，实际的屈服指数一般在5到20之间
软件参数表中默认取10

BRB型号	有效刚度(kN/m)	有效阻尼(kN.s/m)	刚度(kN/m)	屈服力(kN)	屈服后刚度比	屈服指数
BRB-Cx500x3500	104167	0	104167	500	0.035	10
BRB-Cx500x4000	89285.7	0	89285.7	500	0.035	10
BRB-Cx500x4500	79365.1	0	79365.1	500	0.035	10
BRB-Cx500x5000	73529.4	0	73529.4	500	0.035	10
BRB-Cx500x5500	65789.5	0	65789.5	500	0.035	10

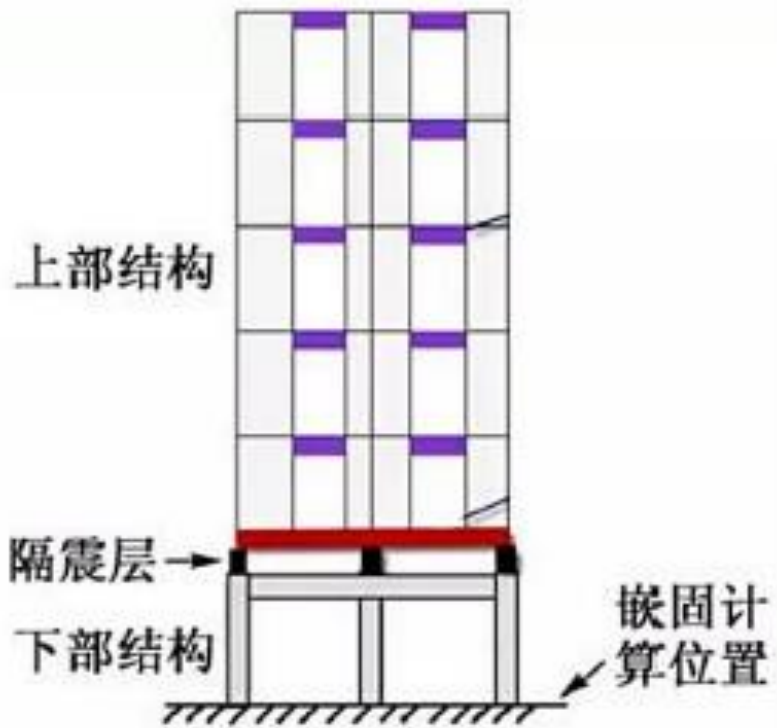
问题4 BRB轴力远小于屈服力却出现了附加阻尼比

比如屈服指数填最小的5，基本不耗能



X地震阻尼比 振型号	阻尼比
1	0.050
2	0.050
3	0.050
4	0.050
5	0.050
6	0.050
7	0.050
8	0.050
9	0.050
10	0.050
11	0.050
12	0.050
13	0.050
14	0.050
15	0.050
16	0.050
17	0.050
18	0.050

屈曲指数填常见范围对时程分析影响不大，但是过小的屈服指数，将会显著影响计算结果，应对该参数引起重视！



二、YJK隔震结构设计易错点及难点

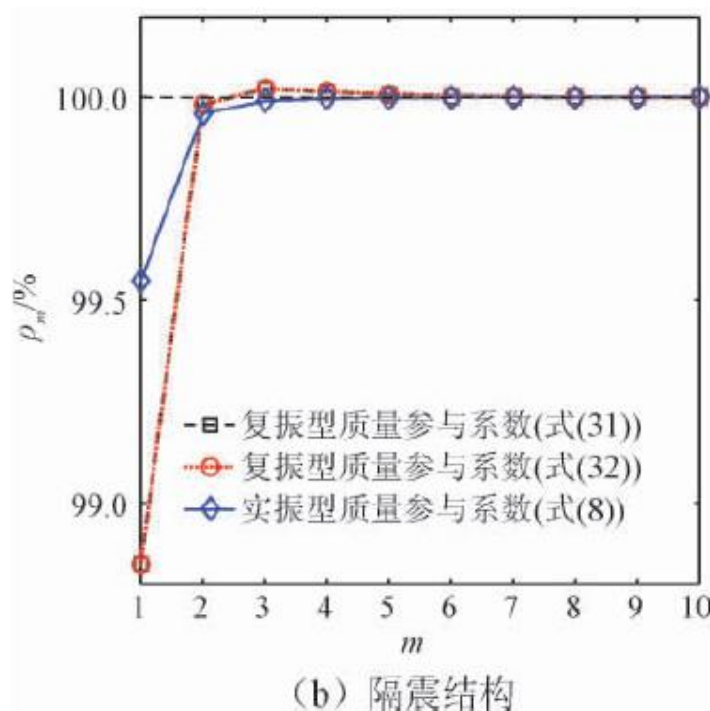
问题1 复振型反应谱迭代振型数量的确定

振型数量不能像实振型一样直接以高规规定的累积质量参与系数90%来判断

复振型质量参与系数表达式

$$\gamma_i = - \frac{2 \operatorname{Re} \left[\frac{\nu^T \phi_i}{a_i \lambda_i} (\phi_i^T M r) \right]}{\nu^T K^{-1} M r}$$

基于基底剪力得到的



振型号	X向平动质量系数%(sum)	Y向平动质量系数%(sum)
1	1.25 (1.25)	92.93 (92.93)
2	100.90 (102.15)	1.31 (94.23)
3	-0.39 (101.76)	7.19 (101.42)
4	-0.00 (101.76)	-1.60 (99.82)
5	-2.14 (99.62)	-0.01 (99.81)
6	0.00 (99.63)	0.01 (99.82)
7	-0.00 (99.63)	-0.48 (99.34)
8	0.56 (99.07)	-0.00 (99.34)
9	0.00 (99.07)	-0.01 (99.33)
10	-0.00 (99.07)	-0.08 (99.25)
11	-0.08 (98.99)	-0.00 (99.25)
12	-0.00 (98.99)	-0.01 (99.23)
13	-0.01 (98.98)	-0.13 (99.11)
14	-0.13 (98.85)	-0.01 (99.10)
15	-0.00 (98.84)	-0.00 (99.09)
16	-0.00 (98.84)	-0.07 (99.02)
17	-0.07 (98.77)	-0.00 (99.02)
18	-0.00 (98.77)	-0.00 (99.02)
19	0.04 (98.81)	-0.00 (99.02)
20	-0.00 (98.81)	0.02 (99.04)
21	0.00 (98.81)	0.02 (99.06)
22	0.00 (98.81)	0.00 (99.06)
23	0.00 (98.81)	0.37 (99.43)
24	0.00 (98.81)	0.00 (99.43)
25	0.03 (98.84)	0.00 (99.43)
26	0.07 (98.91)	0.04 (99.47)
27	0.00 (98.91)	-0.03 (99.44)
28	0.10 (99.01)	-0.00 (99.44)
29	0.01 (99.02)	-0.00 (99.44)
30	0.00 (99.02)	0.02 (99.46)
31	0.00 (99.02)	-0.00 (99.46)
32	0.00 (99.02)	0.00 (99.46)
33	-0.00 (99.02)	0.01 (99.47)

YJK5.1输出复振型质量参与系数

- 1 复振型质量参与系数并非随着振型数量增加单调递增，其有正有负，累积质量参与系数很多时候会超过100%再下降，最后趋于100%
- 2 实振型质量参与系数所估计的振型数量明显偏少，会造成计算精度不够，复振型质量参与系数趋于稳定仅代表基底剪力收敛

问题1 复振型反应谱迭代振型数量的确定

振型数量确定的推荐方法：不断增加结构振型数试算各层剪力是否收敛，辅助观察复振型质量参与系数是否趋于稳定且接近100%，另外结合概念判断剪力分布是否合理

=====各楼层地震剪力系数调整情况=====

层号	塔号	X向调整系数	Y向调整系数	调整后X向剪力	调整后Y向剪力
振型数24	1	1.000	1.000	8098.35	8117.45
	2	1.000	1.000	8097.72	8116.84
	3	1.000	1.000	7398.93	7505.92
	4	1.000	1.000	5272.42	5287.90
	5	1.000	1.000	3821.76	3847.97
	6	1.000	1.000	2188.93	2220.89
	7	1.000	1.000	244.24	263.33

=====各楼层地震剪力系数调整情况=====

层号	塔号	X向调整系数	Y向调整系数	调整后X向剪力	调整后Y向剪力
振型数36	1	1.000	1.000	8102.19	8119.90
	2	1.000	1.000	8097.89	8117.01
	3	1.000	1.000	7400.01	7506.95
	4	1.000	1.000	5273.11	5288.61
	5	1.000	1.000	3822.43	3848.61
	6	1.000	1.000	2189.44	2221.39
	7	1.000	1.000	244.35	263.44

层号	塔号	X向调整系数	Y向调整系数	调整后X向剪力	调整后Y向剪力
振型数48	1	1.000	1.000	8102.21	8158.08
	2	1.000	1.000	8097.89	8117.67
	3	1.000	1.000	7399.98	7509.75
	4	1.000	1.000	5273.11	5290.40
	5	1.000	1.000	3822.46	3850.24
	6	1.000	1.000	2189.44	2222.57
	7	1.000	1.000	244.33	263.66

X向平动振型参与质量系数总计: 98.76%
Y向平动振型参与质量系数总计: 99.29%

1 基底隔震结构接近单自由度体系，只需较少的振型数就能达到可靠的精度

2 层间隔震结构、错层隔震结构等复杂隔震结构建议按上述步骤确定振型数

问题1 复振型反应谱迭代振型数量的确定

振型数量不足导致的剪力分布反常现象

=====各楼层地震剪力系数调整情况=====

层号	塔号	X向调整系数	Y向调整系数	调整后X向剪力	调整后Y向剪力
1	1	1.000	1.000	54912.93	64106.81
2	1	4.336	1.000	992.27	6475.91
3	1	4.049	1.000	1113.05	6473.21
4	1	3.067	1.000	2245.96	5261.46
5	1	2.885	1.000	2862.18	4260.36
6	1	2.817	1.000	2623.60	3089.36
7	1	2.784	1.000	1518.99	1582.29

振型数6（不收敛的结果）

复振型的收敛速度明显低于实振型，考虑二阶效应很多时候会降低收敛速度

X向平动振型参与质量系数总计: 89.51%
Y向平动振型参与质量系数总计: 92.72%

实振型质量参与系数

X向平动振型参与质量系数总计: 66.00%
Y向平动振型参与质量系数总计: 91.61%

复振型质量参与系数

=====各楼层地震剪力系数调整情况=====

层号	塔号	X向调整系数	Y向调整系数	调整后X向剪力	调整后Y向剪力
1	1	1.000	1.000	68079.10	70245.55
2	1	1.000	1.000	6655.95	6641.06
3	1	1.000	1.000	6653.50	6639.56
4	1	1.000	1.000	5243.31	5238.87
5	1	1.000	1.000	3963.75	3969.90
6	1	1.000	1.000	2635.33	2651.27
7	1	1.000	1.000	1233.90	1249.92

振型数24

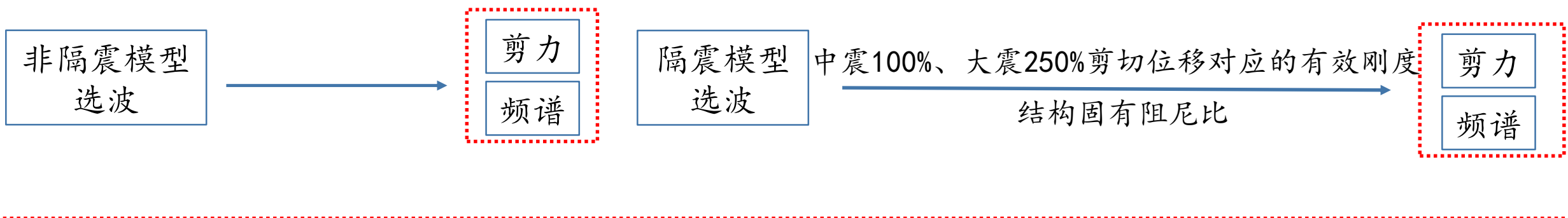
X向平动振型参与质量系数总计: 99.88%
Y向平动振型参与质量系数总计: 99.92%

复振型质量参与系数

问题2 橡胶（铅芯）隔震支座模型如何合理选波

基于分部设计法的传统选波

隔震模型与非隔震模型同时选波



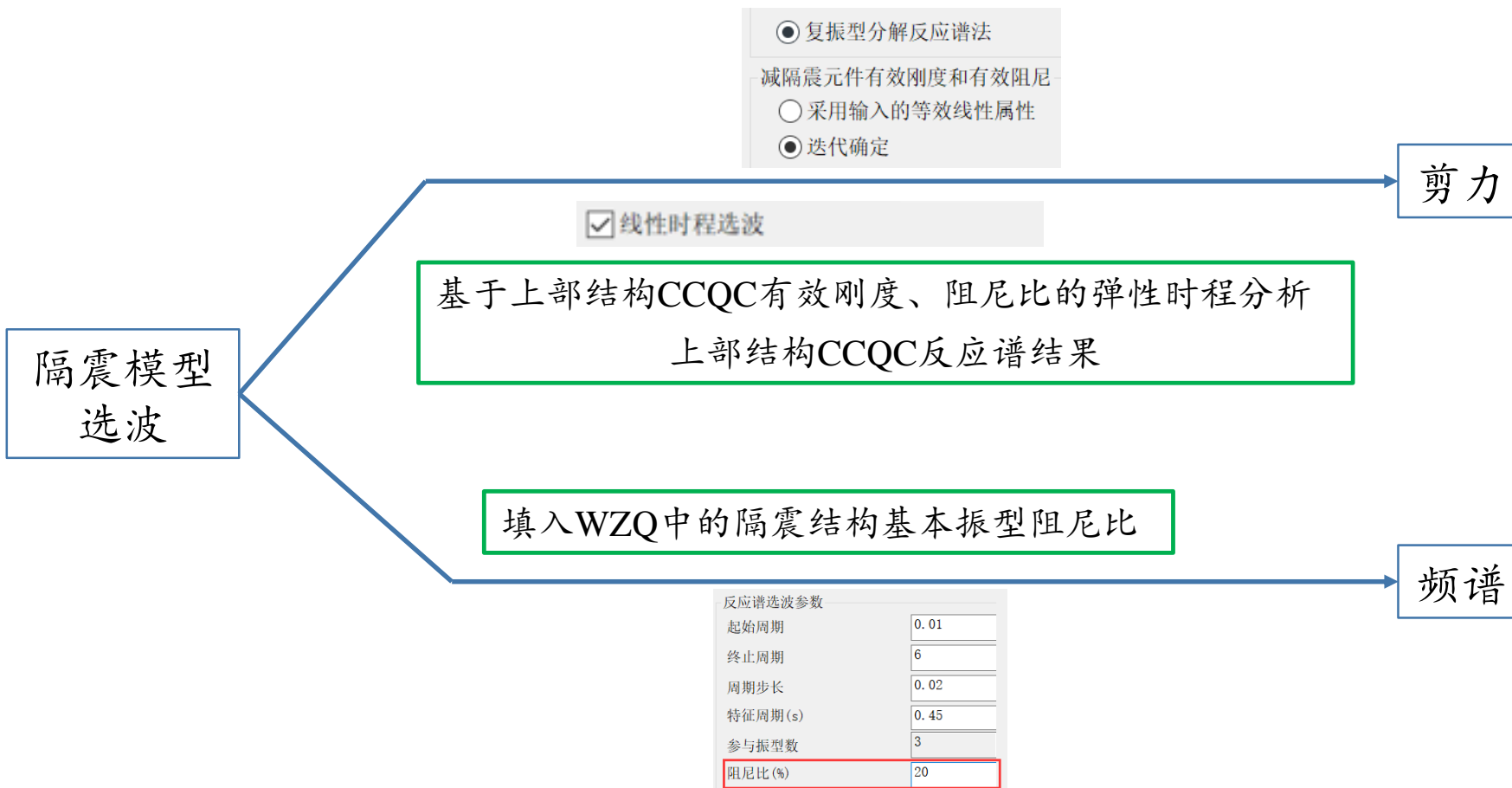
传统选波的缺陷

- 1 有效刚度取经验值导致很多时候和实际情况差异很大
- 2 多数情况隔震结构阻尼比很大，超过结构固有阻尼比很多，规范谱与地震波反应谱特性随着阻尼比的增加有一定的变化
- 3 任何情况都需要隔震和非隔震模型同时选波，增加了选波工作量和地震波库的要求

问题2 橡胶（铅芯）隔震支座模型如何合理选波

个人建议的基于直接设计法的选波方法

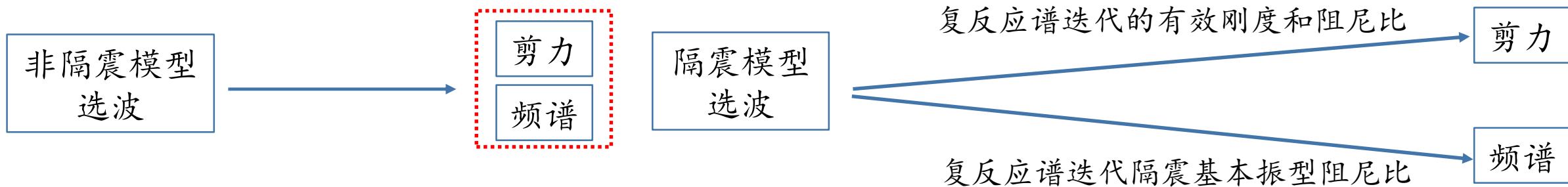
情况1 无需用时程算底部剪力比时（大震弹塑性或用复反应谱确定中震底部剪力比）



问题2 橡胶（铅芯）隔震支座模型如何合理选波

情况2 需要用时程算底部剪力比时（复杂隔震结构）

隔震模型与非隔震模型同时选波



上述选波方法的评价

- 1 有效刚度和阻尼比取复反应谱迭代，有理论依据，较经验值更合理
- 2 采用隔震基本振型所对应的阻尼比进行地震波与规范谱的频谱性能比较，相较固有阻尼比，更符合实际隔震结构实际特性
- 3 一部分情况（情况1）不需要隔震和非隔震模型同时选波，减少选波工作量和地震波库的要求

问题3 隔震时程分析中地震波是否需要考虑正负方向输入

以弹性时程分析模块为例

生成默认组合

隔震

生成方法: 时程方法 重力荷载代表值系数: 0.5

简化方法竖向地震取重力荷载代表值: 0.2 倍

峰值加速度(cm/s²): 主 510 次 433.5 竖 331.5

确定 取消

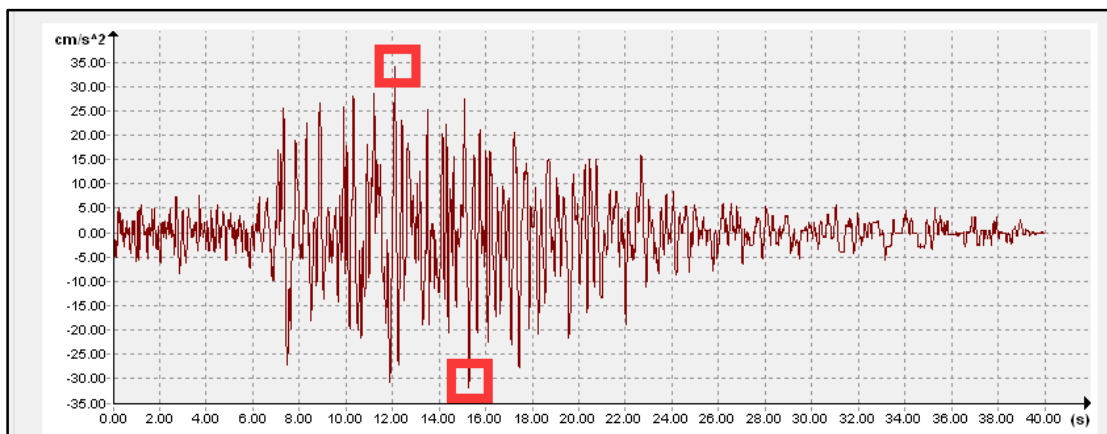
工况组合

序号	恒载系数	活载系数	峰值加速度类型	主方向峰值加速度(cm/s ²)	次方向峰值加速度(cm/s ²)	竖向峰值加速度(cm/s ²)
1	0.000	0.000	PGA	510.000	433.500	0.000
2	1.000	0.500	PGA	510.000	433.500	0.000
3	1.000	0.500	PGA	510.000	433.500	132.600
4	1.000	0.000	PGA	510.000	433.500	165.750

注: 组合1是用于计算水平地震作用的默认组合。除含有摩擦摆隔震支座或弹性滑板隔震支座的模型之外, 该组合不考虑竖向荷载作用, 且不能被删除。

增加组合 默认组合 删除组合 确定 取消

很多工程师对加速度的正负号提出疑问, 是否需要增加负号工况?



1. 地震波是随着时间瞬态往复不均匀变化的 (不随时间正负周期性对称变化)
2. 与反应谱不同, 地震波最大峰值正加速度和负加速度一般也不相等, 导致时程分析正向加载和负向加载构件的最大和最小内力并不相等
3. 一些天然波还存在主、次方向和竖方向不是同号的可能, 这种情况下, 三向加载时支座拉压应力会更加复杂

严格意义上来说, 隔震时程分析应考虑正负方向双向加载来校核隔震支座拉压应力的

问题3 隔震时程分析中地震波是否需要考虑正负方向输入

目前现状与背景

多数隔震项目从便捷性及效率考虑，隔震报告时程分析仅考虑了正向加速度加载，极少数复杂项目按正负两向加载验算支座拉应力

个人建议

8度及以下大多数平面布置对称规则的基底隔震结构，正负向加载的最大内力差别对于常见地震波不太大；对于不规则隔震结构、8度0.3g及以上的高烈度区隔震结构、隔震层加阻尼器组合结构，建议应考虑正负两向加载地震波的最不利情况验算隔震支座应力（拉应力要足够重视）（不规则隔震结构：即错层隔震结构、层间隔震不规则的下部结构以及隔震层平面布置明显不对称的结构）

地震波正负方向输入软件实现的2种方法

序号	恒载系数	活载系数	峰值加速度类型	主方向峰值加速度(cm/s ²)	次方向峰值加速度(cm/s ²)	竖方向峰值加速度(cm/s ²)
1	0.000	0.000	PGA	510.000	433.500	0.000
2	1.000	0.000	PGA	510.000	433.500	165.750
3	1.000	0.000	PGA	-510.000	-433.500	-165.750

注：组合1是用于计算水平地震作用的默认组合。除含有摩擦摆隔震支座或弹性滑板隔震支座的模型之外，该组合不考虑竖向荷载作用，且不能被删除。

增加组合 默认组合 删除组合 确定 取消

方法1 增加时程工况组合时将水平峰值加速度改成负值

序号	名称	分析方法	是否计算
1	11时18分,人工波1 [0.0]	直接积分法	<input checked="" type="checkbox"/>
2	11时18分,人工波1 [180.0]	直接积分法	<input checked="" type="checkbox"/>

注：单击“重置”按钮后，程序将根据选择的地震波生成默认的工况列表

确定 取消

名称	11时18分,人工波1 [180.0]
地震作用	地震波 11时18分,人工波1
主方向与X轴正向夹角(度)	180
时程分析	
分析方法	<input type="radio"/> 振型叠加法 <input checked="" type="radio"/> 直接积分法
起始时间(s)	0
结束时间(s)	30.02
时间步长(s)	0.01
输出间隔步数	10
输出间隔(s)	0.1
迭代控制参数...	
HHT积分参数	
α	0
β	0.25
γ	0.5

方法2 在时程工况定义时单工况中“主方向与X轴正向夹角”填0度（+X）、180度（-X）、90度（+Y）、270度（-Y）



三、YJK组合减隔震结构设计要点

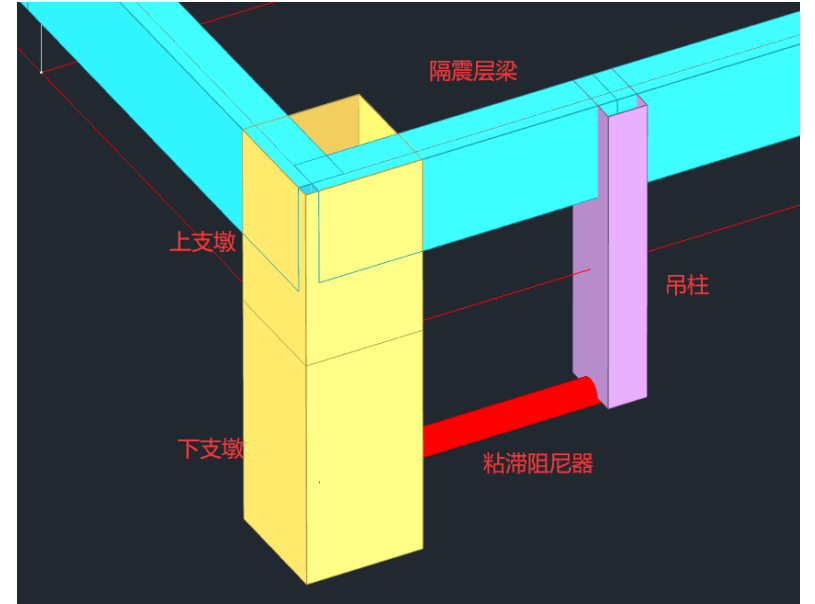
组合减隔震结构基本概念

组合减隔震结构：隔震支座+减震单元（速度型、位移型）

最常见的隔震层加设粘滞阻尼器VFD



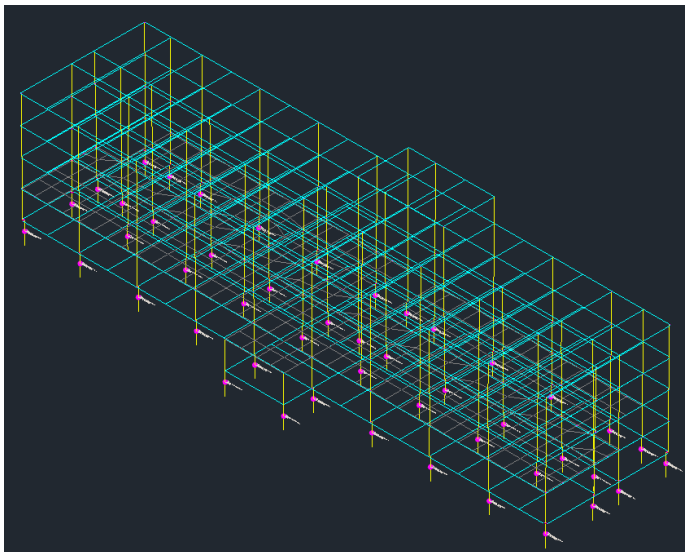
现场图



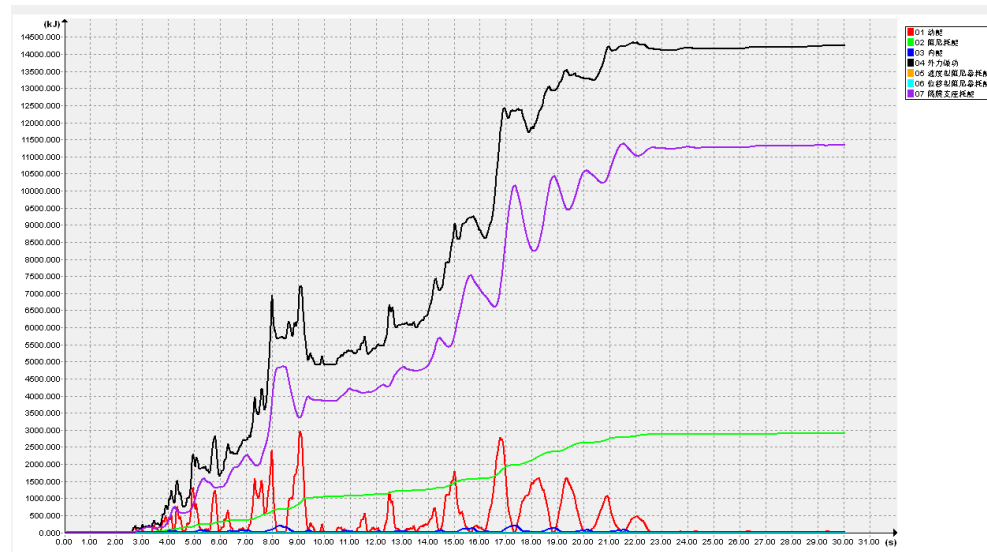
模型图

一般在隔震层外围加设粘滞阻尼器VFD，有隔震层下部支撑式和隔震层下挂式两种，很多情况采用上图所示的下挂式，与纯隔震结构相比，加了VFD后能略微降低中震的减震效果，在大震下VFD耗能显著，有效降低隔震支座的拉应力，这类结构广泛用于8度0.3g、9度0.4g高烈度区。

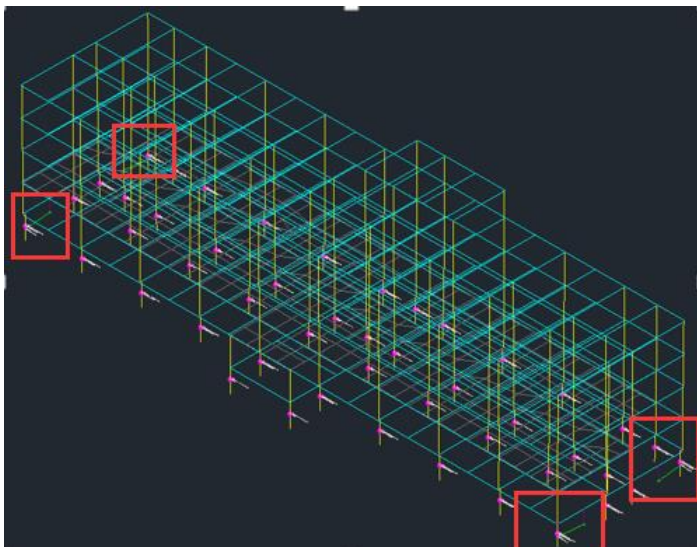
纯隔震结构与隔震层加设粘滞阻尼器结构对比



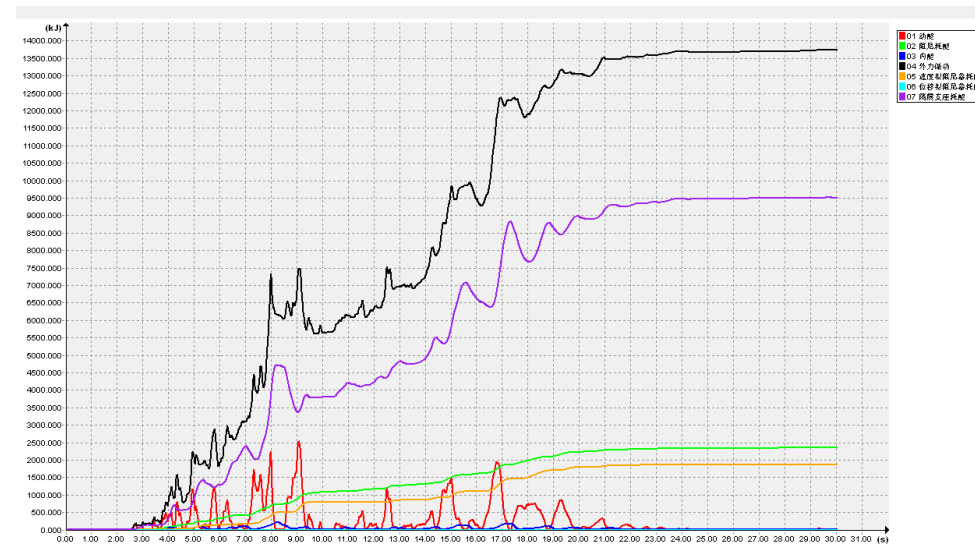
纯隔震模型



纯隔震模型9度罕遇地震人工波能量曲线

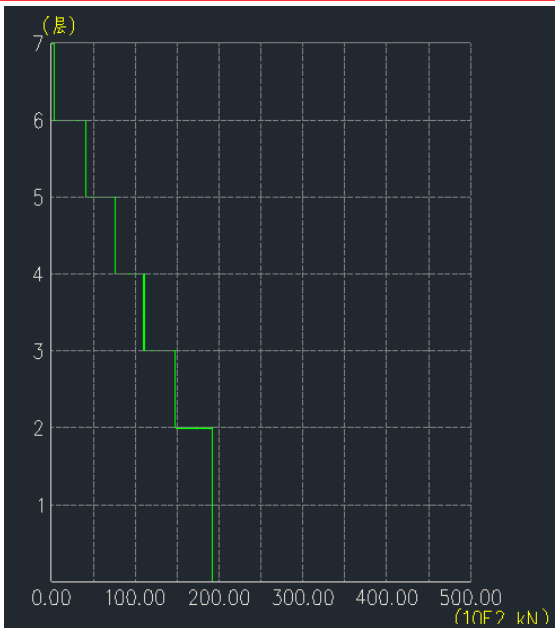


隔震层+四角VFD组合模型



隔震层+四角VFD组合模型9度罕遇地震人工波能量曲线

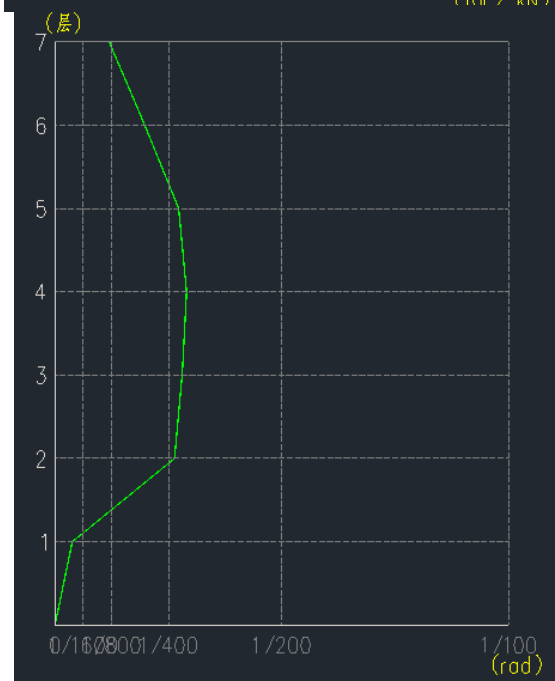
纯隔震结构与隔震层加设粘滞阻尼器结构对比



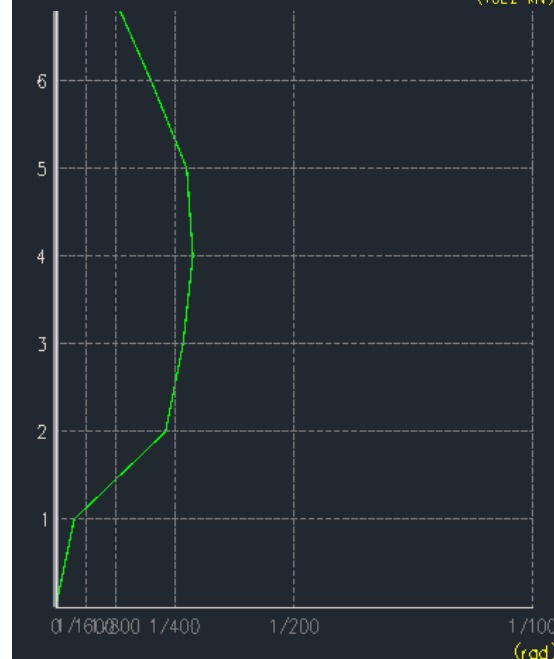
纯隔震模型剪力分布



组合隔震模型剪力分布

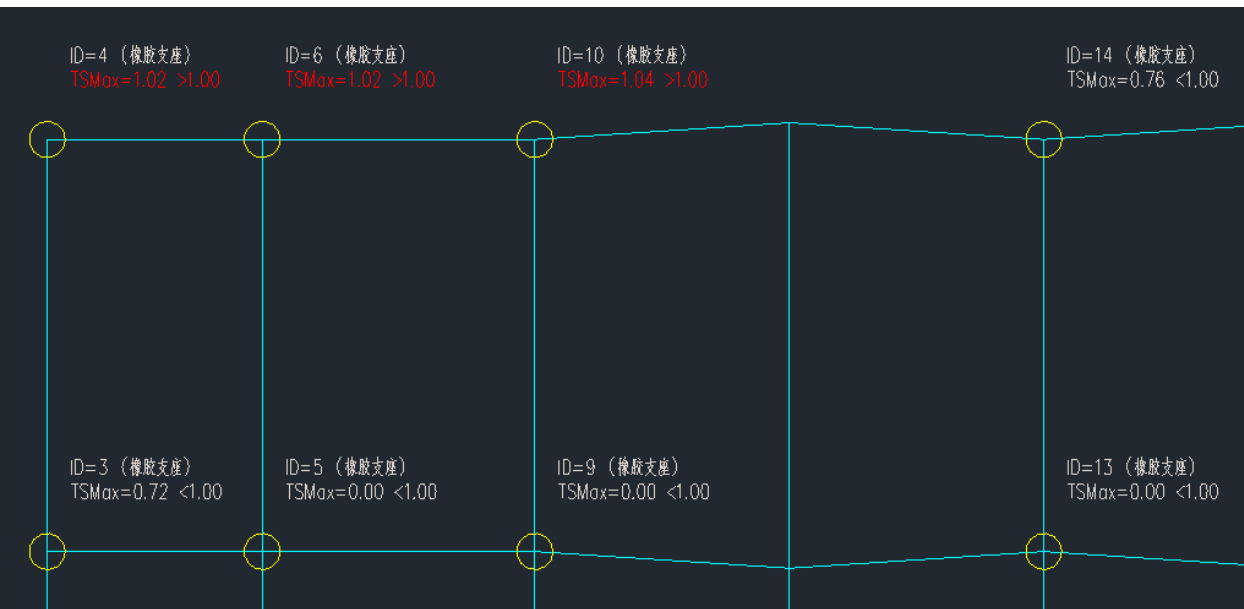


纯隔震模型层间位移角分布

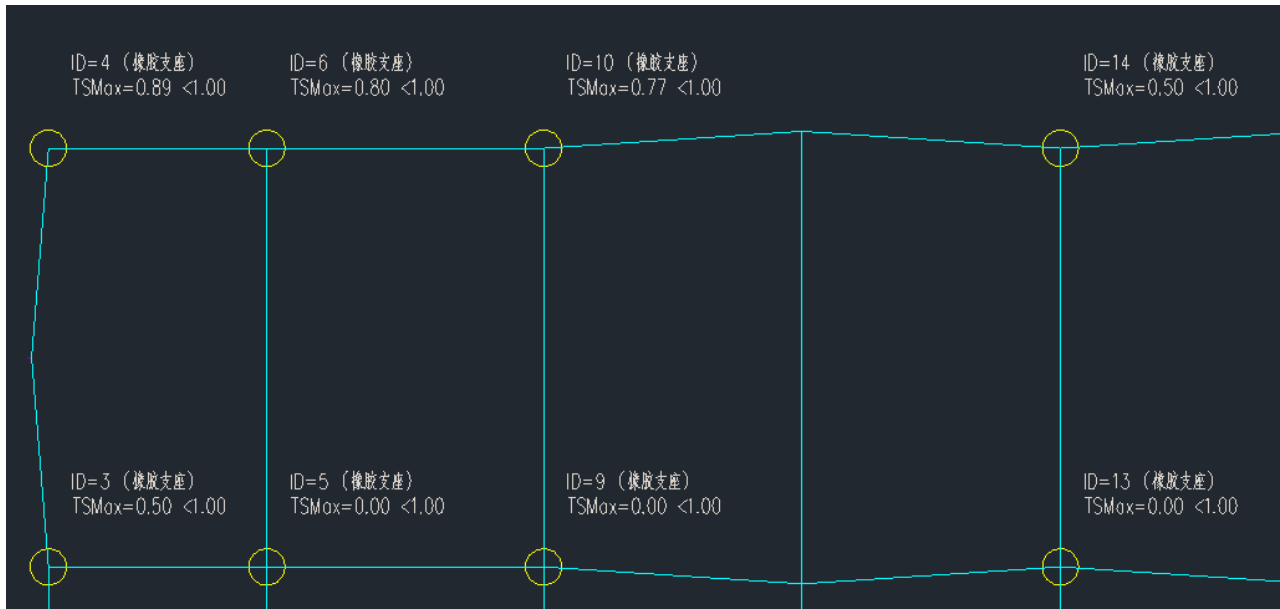


组合隔震模型层间位移角分布

纯隔震结构与隔震层加VFD组合减隔震对比



纯隔震结构角部支座拉应力



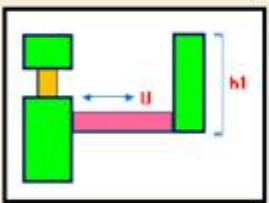
组合减隔震结构角部支座拉应力

对比结论

1. 布置了VFD的隔震结构由于VFD的耗能，隔震支座的耗能较纯隔震结构有所降低。
2. 隔震层加VFD组合减隔震与纯隔震结构相比，基底剪力进一步减小，中间层及顶层剪力基本不变。
3. 隔震层加VFD组合减隔震与纯隔震结构相比，上部结构层间位移角基本不变。
4. 相比纯隔震模型，加了VFD后能有效减小角部和边部的支座拉应力，合理布置可解决拉应力超限问题。

隔震层加VFD建模

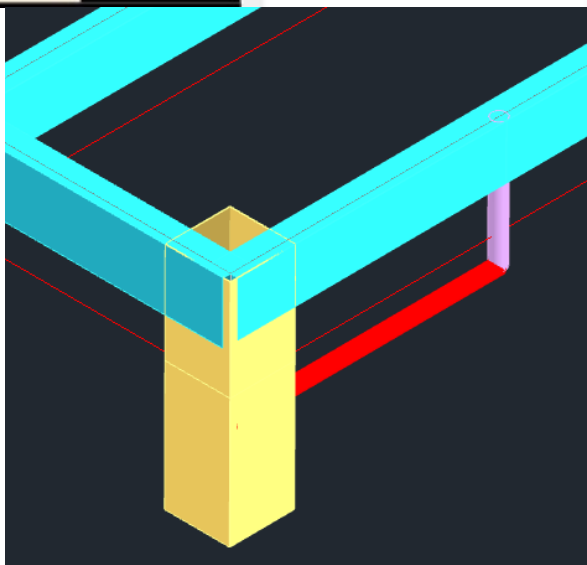
直接成组布置



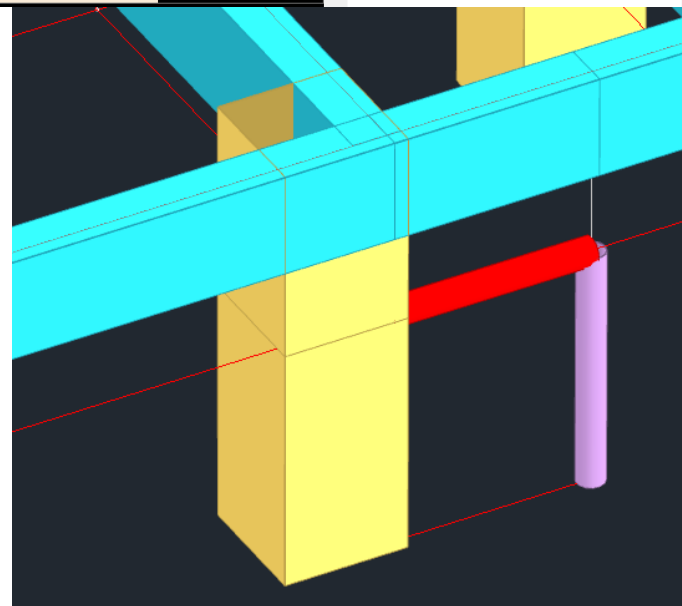
名称	内容
☐ 消能器布置定义	
消能器样式	3:隔震层阻尼...
名称	VFD-NLx300-(4...
吊柱截面	1圆管 200*10钢
吊柱高H1 (mm):	1800
☐ 消能器参数定义	
产品库	阻尼器麦克斯韦...
有效刚度KE (kN/m, kN*m/rad)	0.0
有效阻尼CE (kN. s/m)	0.0
<input checked="" type="checkbox"/> 非线性	
刚度 (kN/m)	210000.0
阻尼系数C (kN. (s/m) ^{exp})	300
阻尼指数exp	0.3



名称	内容
☐ 消能器布置定义	
消能器样式	4:隔震层阻尼...
名称	
支柱截面	1圆管 200*10钢
支柱高H1 (mm):	1000
☐ 消能器参数定义	
产品库	屈曲约束支撑 ..
有效刚度KE (kN/m, kN*m/rad)	0.0
有效阻尼CE (kN. s/m)	0.0
<input type="checkbox"/> 非线性	
刚度 (kN/m)	0.0
屈服力KY (kN)	0
屈服后刚度比KYR	0.000
屈服指数exp	0



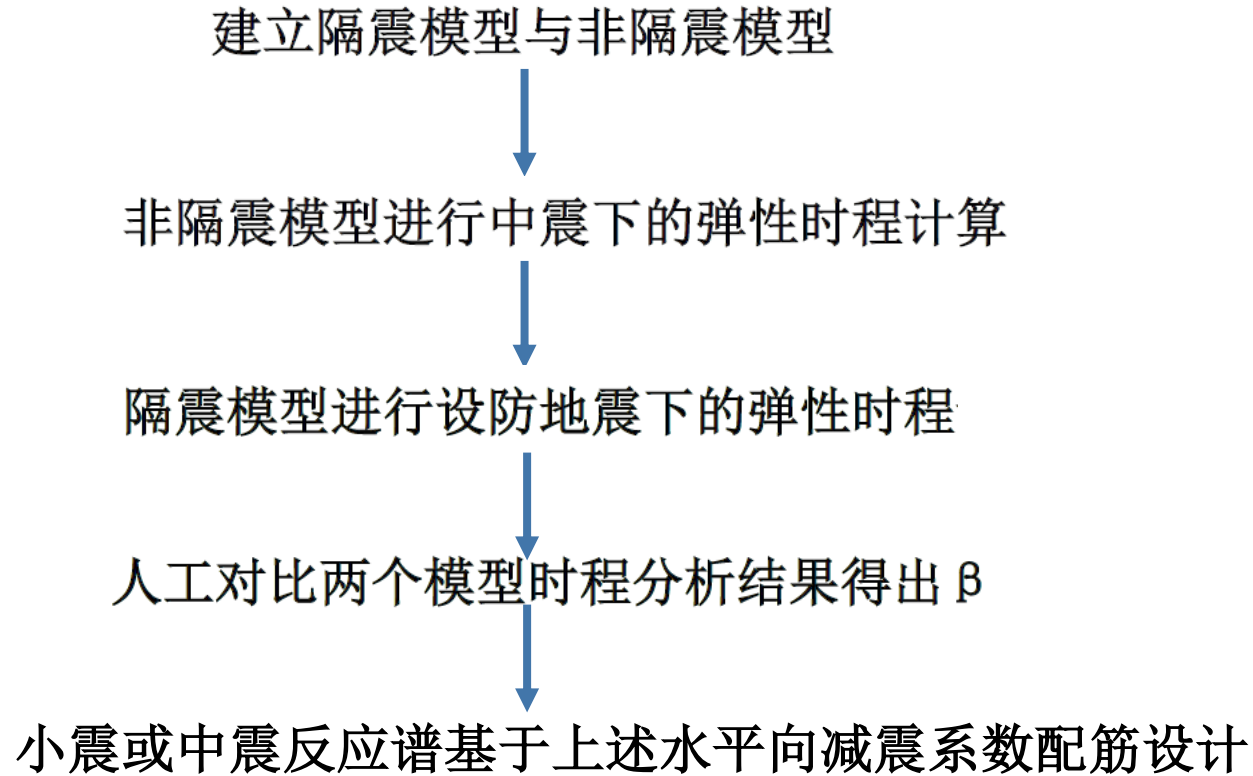
下挂式



支撑式

组合减隔震设计传统的分部设计法（与隔震模型分部设计法一致）

1 上部结构设计



2 隔震层设计：大震弹塑性支墩设计、减震子结构设计、支座验算

3 隔震层下部结构设计

缺陷：模型较多，割裂了上部结构、隔震层与下部结构，上部结构配筋设计的内力分布明显不符合隔震结构特点

基于新隔震的组合减隔震设计问题和难点

新隔标

4.3.2 采用振型分解反应谱法时,应将下部结构、隔震层及上部结构进行整体分析,其中隔震层的非线性可按等效线性化的迭代方式考虑。并应计算其地震作用和作用效应,且应符合下列规定:

《建筑消能减震技术规程》6.3.3条文说明

1 假定各个消能器的设计参数和消能减震结构的总阻尼比 ζ 。

2 将消能减震结构的总阻尼比和各个消能器的设计参数代入分析模型中,根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011的规定,采用振型分解反应谱法进行结构分析。

3 经结构分析可得第 i 楼层的水平剪力 F_i 、水平地震作用标准值的位移 u_i 及第 j 个消能器的阻尼力 F_{dj} 及相对位移 Δu_{dj} 。

4 由式 (6.3.2-1)、式 (6.3.2-2)、式 (6.3.2-3)、式 (6.3.2-4) 和式 (6.3.2-5) 计算消能器附加给结构的有效阻尼比 ζ_d 。

5 重新修正各个消能器的设计参数,并利用下式计算消能减震结构的总阻尼比 ζ :

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_d \quad (14)$$

式中: ζ_1 ——主体结构阻尼比;

ζ_d ——消能器附加给结构的有效阻尼比。

6 将步骤 5 计算得到的消能减震结构的总阻尼比和各个消能器的参数作为初始假设值,重复步骤 2~步骤 5。反复迭代,直至步骤 2 使用的消能减震结构的总阻尼比与步骤 5 计算得到的消能减震结构的总阻尼比接近。

反应谱计算方法

- 实振型分解反应谱法
- 减震隔震附加阻尼比算法
- 复振型分解反应谱法

强制解耦

减隔震元件有效刚度和有效阻尼

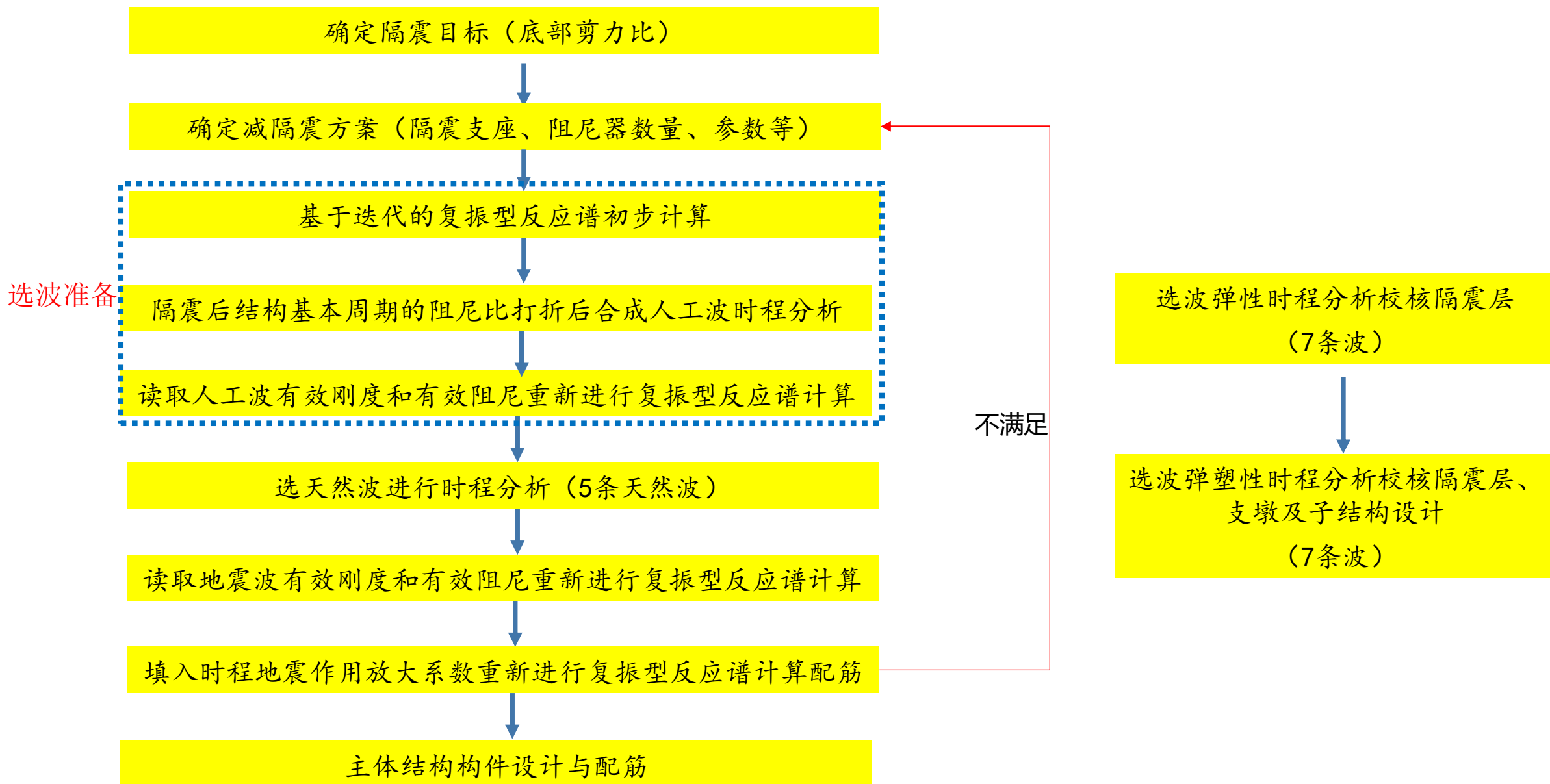
- 采用输入的等效线性属性
- 迭代确定
- 自动采用弹性时程计算结果

问题和难点

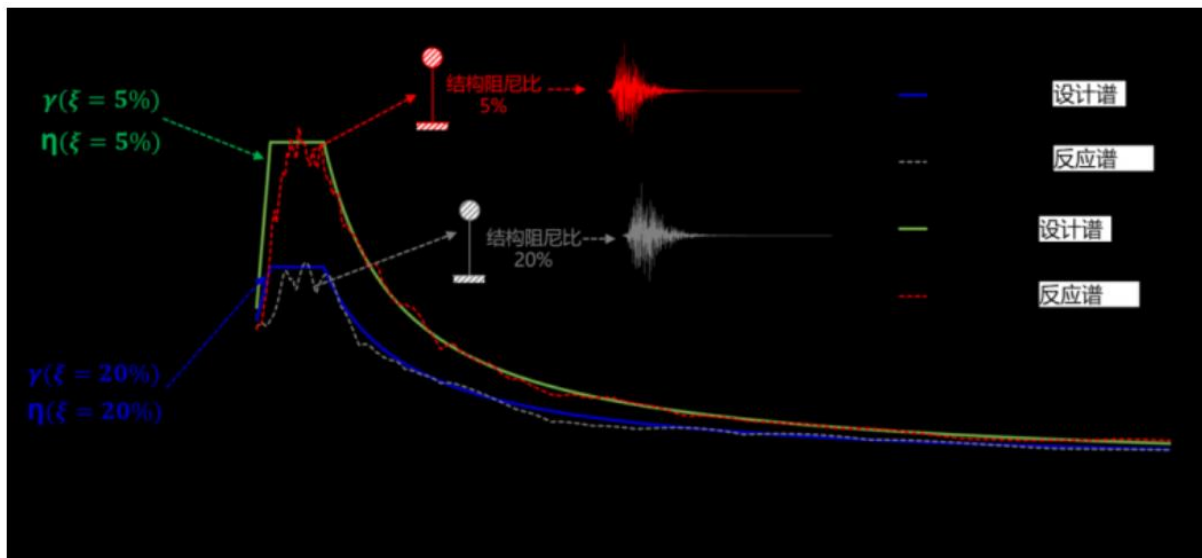
1. 反应谱迭代无法考虑粘滞阻尼器 (VFD) 动刚度的作用并对速度近似, 会高估其阻尼耗能
2. 非线性时程能准确反映组合减隔震体系的位移、内力和耗能, 但是无法直接根据时程配筋
3. 反应谱如何等效线性化 (有效刚度和有效阻尼的取值) 可使得配筋设计更合理可靠?



个人推荐的新隔标组合减隔震设计流程



高阻尼比合成人工波(一般合成2条)



高阻尼比合成人工波原因

1. 组合减隔震结构等效阻尼比一般大于15%，远超结构固有阻尼比。
2. 较小阻尼比下合成的人工波，在较大阻尼比下一般小于规范谱。



人工地震波生成对话框

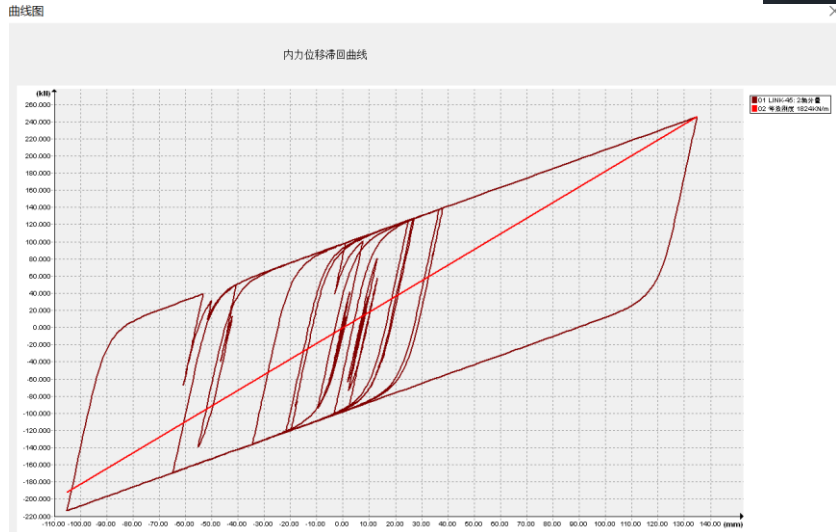
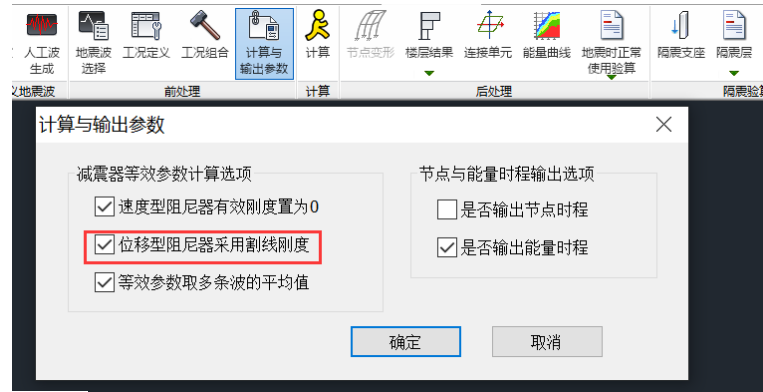
目标谱参数设置
参照规范 隔震标准(2021)
最大影响系数 0.68
峰值加速度 300 cm/s²
特征周期 0.45 (s)
阻尼比 0.2
起始周期 0.02 (s)
终止周期 6 (s)
周期间隔 0.001 (s)

地震波参数设置
地震动时长 30 地震动步长 0.02
平台段开始时刻 3 生成地震波组数 1
平台段终止时刻 25 修正迭代次数 7

查看地震波信息
地震波名 18时57分,人工波1 改名
地震波方向 主方向 次方向 竖方向
查看信息 加速度时程曲线

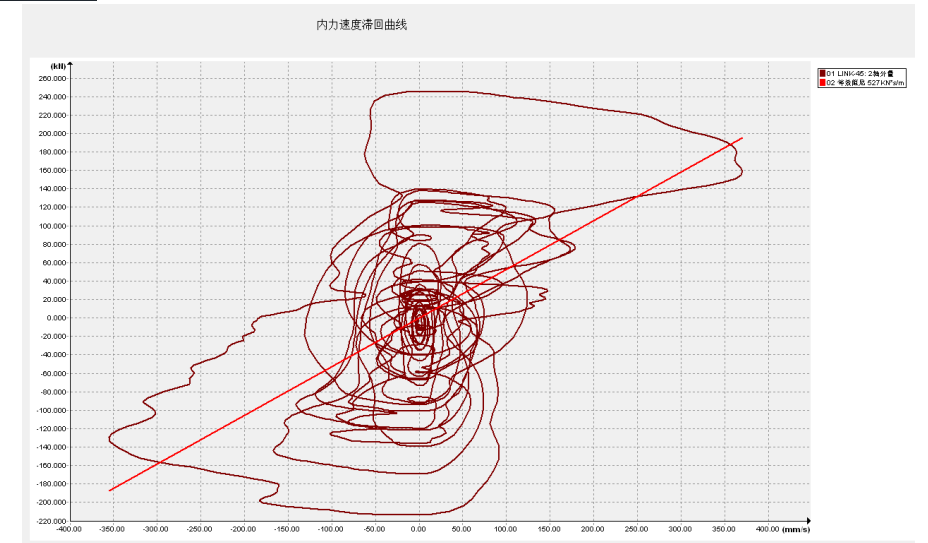
生成人工地震波
保存图形 打开目录
保存并退出
不保存退出

读取人工波时程分析的有效刚度和有效阻尼进行复振型反应谱计算



有效刚度

必须用直接积分法



有效阻尼

反应谱计算方法

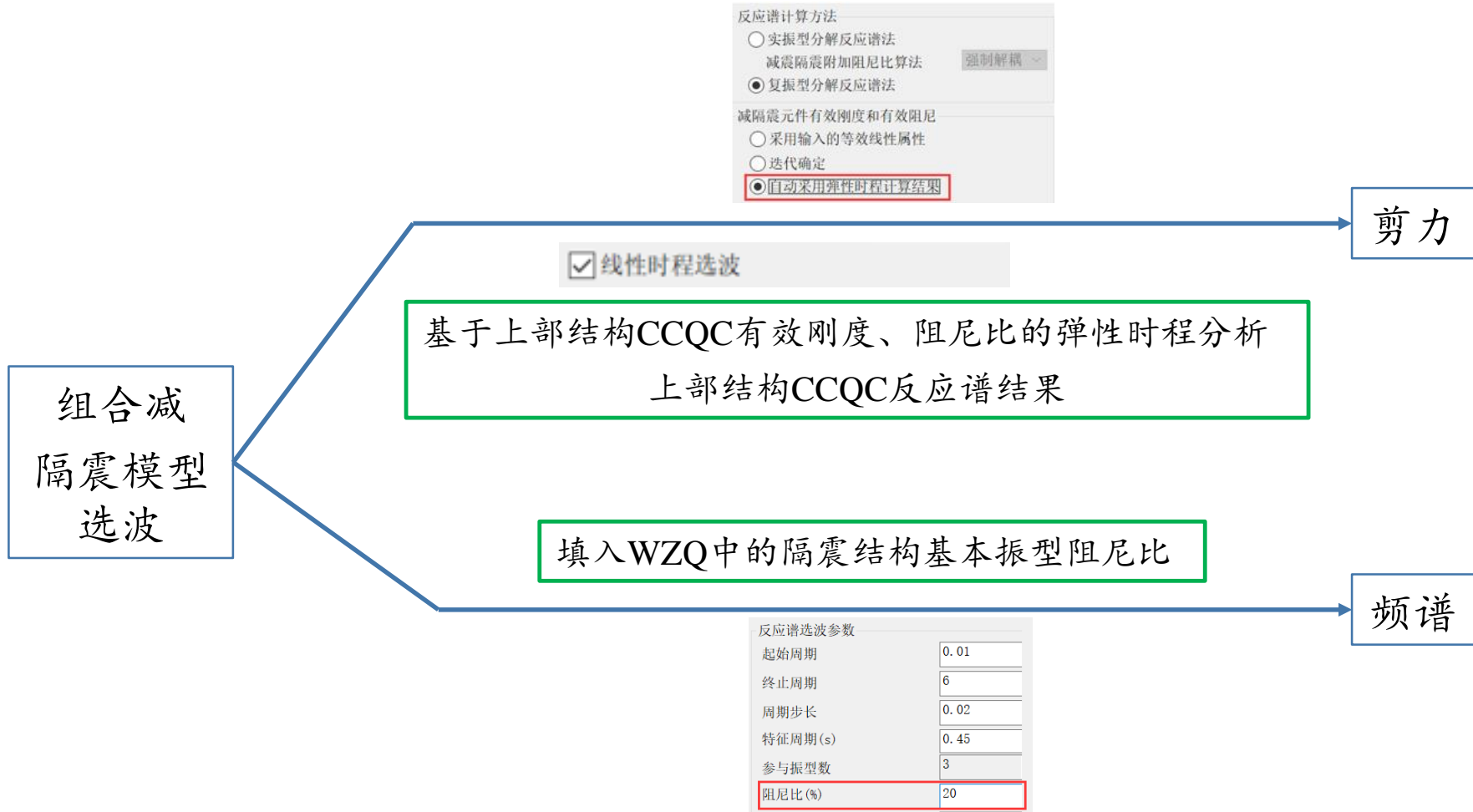
- 实振型分解反应谱法
- 减震隔震附加阻尼比算法 强制解耦
- 复振型分解反应谱法

减隔震元件有效刚度和有效阻尼

- 采用输入的等效线性属性
- 迭代确定
- 自动采用弹性时程计算结果

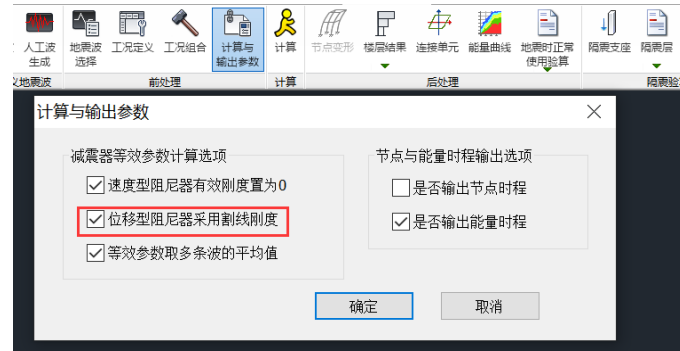
选天然波

等效线性参数通过人工波时程获得后，选天然波过程与常规隔震模型类似，只是等效线性化要读弹性时程



7条波时程分析等效线性化及最终的配筋设计

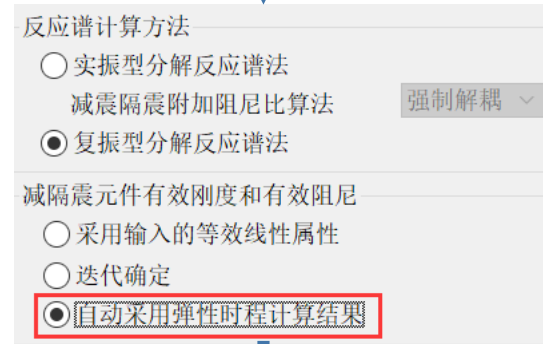
7条波时程分析



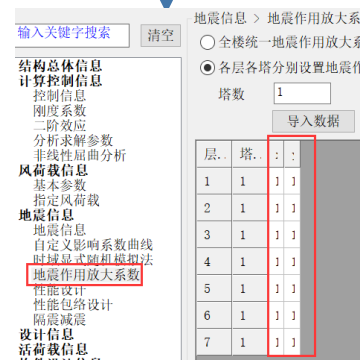
必须用直接积分法

若7条波等效线性参数与人工波等效线性参数差异过大（仅影响瑞利阻尼），可考虑重复迭代计算

读取弹性时程等效参数进行复反应谱计算



复反应谱与7条波时程比较填入地震放大系数最后计算配筋



YJK提供专业的服务与支持



The QR code is located in the top right corner of the blue box. Below it is the YJK logo with the text 'YJK 一减隔震一' (YJK One-Step Isolation). The main text reads '盈建科减隔震技术交流群' (YJK One-Step Isolation Technology Exchange Group) and the contact number '948473586' is at the bottom.

The website header features the YJK logo and '盈建科服务与支持' (YJK Service and Support). It includes contact information: '技术专线: 010-86489797' (Technical Hotline: 010-86489797) and 'VIP 专线: 400-021-0116' (VIP Hotline: 400-021-0116), along with the slogan '专业务实 高效' (Professional, Pragmatic, Efficient). The navigation menu includes '首页' (Home), '服务指南' (Service Guide), '知识库' (Knowledge Base), '产品下载' (Product Download), '教学视频' (Teaching Videos), '微课堂' (Micro-classroom), and '资料下载' (Download Materials). A search bar is located on the right. The main banner features a background image of hands writing and the text '专业品质 卓越服务' (Professional Quality, Excellent Service). The footer contains five service categories with icons: '服务指南' (Service Guide), '产品下载' (Product Download), '教学视频' (Teaching Videos), '微课堂' (Micro-classroom), and '资料下载' (Download Materials).

THE END

