

基于新隔标 CCQC 隔震分析方法在 YJK 软件中实现流程

《建筑隔震设计标准》GB/T51408-2021 对隔震结构设计提出了不同于《建筑抗震设计规范》GB50011-2010（2016 版）的方法，隔震结构设计不再采用以前的分部设计方法，该标准确立了以“直接设计法”、“复振型分解反应谱法”和新一代隔震设计反应谱为代表性内容的方法体系，在抗震设防目标问题上，将原有的“小震不坏、中震可修、大震不倒”提升为“中震不坏、大震可修、巨震不倒”，采用中震进行内力计算和构件设计，并进一步引入性能化设计思想。

以下结合 YJK 软件（V4.0.0 版本），介绍新隔标直接设计法的设计流程。

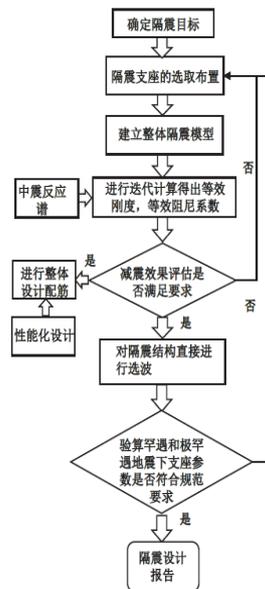


图 1（隔震设计流程）

工程概况

本工程地上 4 层，无地下室，1~4 层层高 3.9m，房屋总高度 20.3m，采用基础隔震，基本风压 0.6kN/m²（50 年）基本雪压 0.9kN/m²（50 年），抗震设防烈度 8 度（0.3g），地震分组二组，场地类别二类，建筑抗震设防类别乙类，计算模型如下图所示：

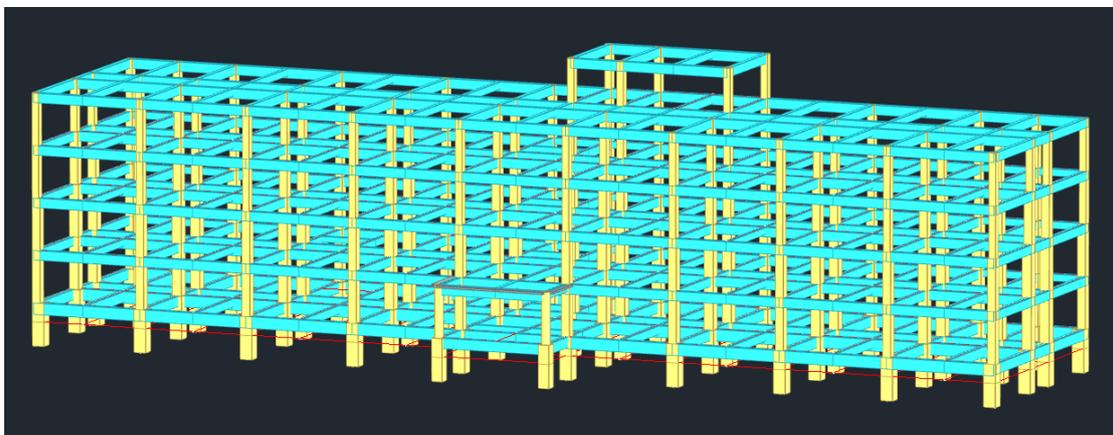


图 2（结构分析模型）

1、确定隔震目标

新隔标规范 6.1.3 隔震结构的抗震措施可按底部剪力比及相应的抗震设防烈度确定;除应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 相应设防烈度的规定外，尚应符合下列规定：

- 1) 隔震结构底部剪力比大于 0.5 时，隔震结构应按本地区设防烈度规定采取相应的抗震措施，并应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定；
- 2) 隔震结构底部剪力比不大于 0.5 时，上部结构可按本地区设防烈度降低 1 度确定抗震措施；
- 3) 与竖向地震作用有关的抗震措施，应符合按本地区设防烈度的规定，不得降低。

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。

由于直接设计法将上部结构和隔震层以及下部结构作为整体进行分析设计，上部结构与隔震层阻尼比存在明显差异导致振型对于阻尼矩阵不在满足正交条件，结构分析的动力方程无法采用强制解耦求解，如果强行解耦，则会导致计算结果产生较大误差，尤其当隔震层阻尼比较大，或同时采用了阻尼器装置时，强行解耦的误差会更大，应采用基于复振型理论的振型分解反应谱法计算。

下柱墩层：如下模型，无地下室时，考虑下柱墩层，下柱墩层层高取值兼顾设备、检修、地勘等因素(假定层高取值 1800mm)，柱墩截面尺寸取值一般每边大于隔震垫尺寸 50-100mm

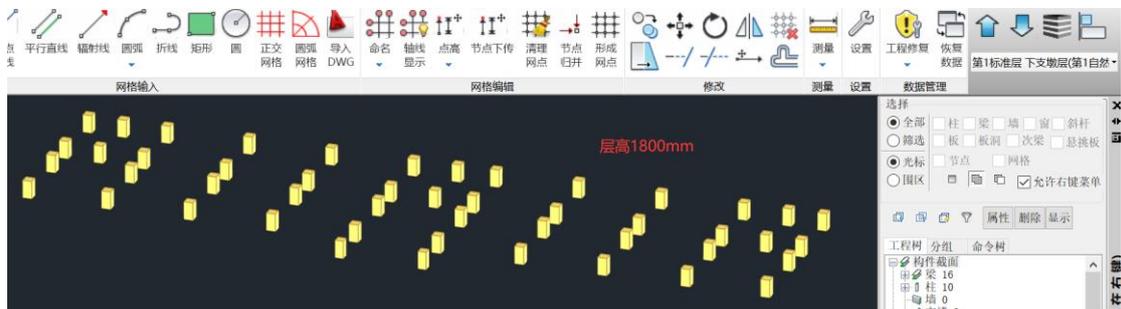


图 3 (下柱墩层)

上支墩层:新隔标 5.1.3 隔震层顶板应有足够的刚度，当采用整体式混凝土结构时，板厚不应小于 160mm；由于本层梁为支墩支柱的连接构件，且为关键构件，可考虑梁高取跨度 1/10 考虑,柱截面与下柱墩层一致：

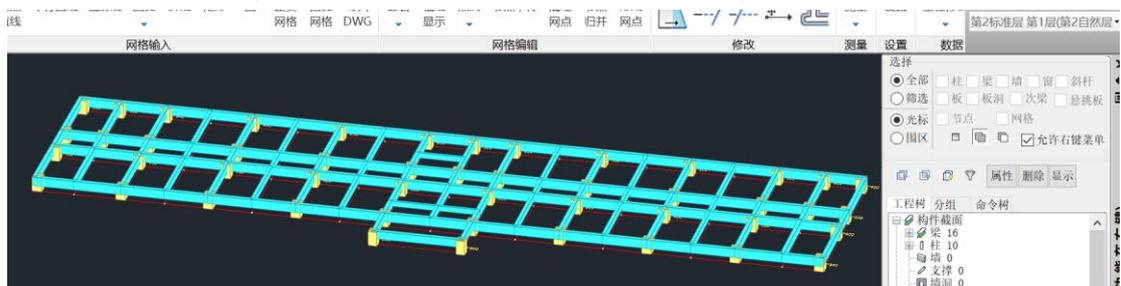


图 4 (上支墩层)

后续在前处理对于上肢墩层柱底设置隔震支座属性，补充其上楼层（建筑平面图

考虑)，确定隔震目标模型。

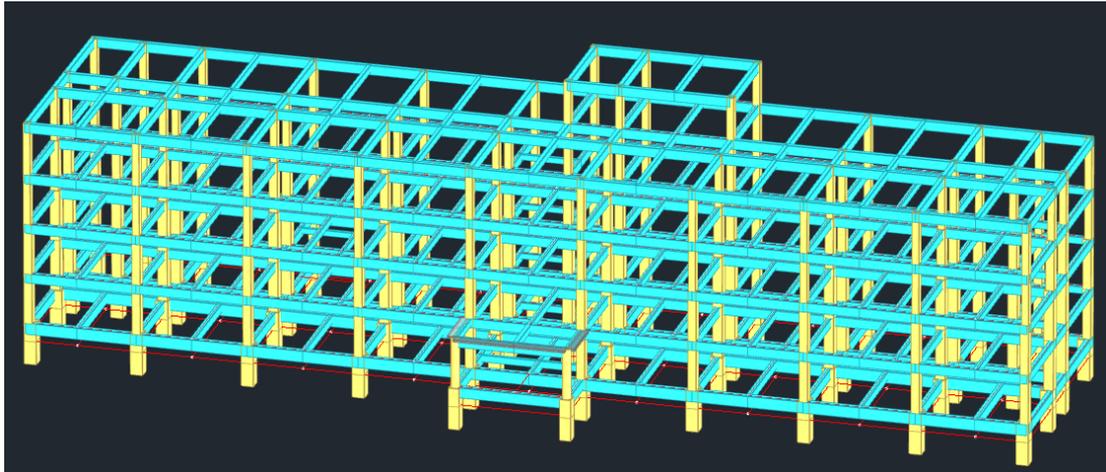


图 5（目标模型）

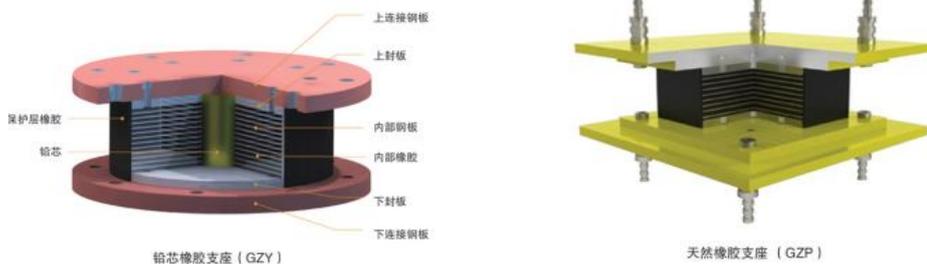
2、隔震垫选型

建筑隔震橡胶支座是按照现行国家及行业相关标准研制开发的减隔震类建筑构件产品,建筑隔震橡胶支座分为有铅芯和无铅芯隔震橡胶支座。建筑铅芯隔震橡胶支座由铅芯棒、橡胶层、钢板等叠层粘结而成。铅芯棒增大支座的阻尼,吸收能量;钢板提高支座的竖向刚度,使之能有效地支承建筑物结构;橡胶层赋予支座高弹性变形及复位和承载的功能。因此,建筑铅芯隔震橡胶支座既具有较高的承载性,又具有较大的阻尼、大水平位移能力和复位功能,它是一种集支承与耗能于一体的隔震装置。而建筑无铅芯隔震橡胶支座阻尼系数较小,一般只利用其较小的水平刚度,以延长结构的周期,避免地震力对建筑的破坏。

依据厂家产品参数或者 YJK 隔震参数表选择隔震垫,隔震垫选型考虑以下因素:

1) 工程经验:上肢墩层周围考虑设置带铅芯的隔震支座,内部可设置一般橡胶隔震支座:

2) 考虑竖向承载力及压应力要求,估算隔震垫截面尺寸:



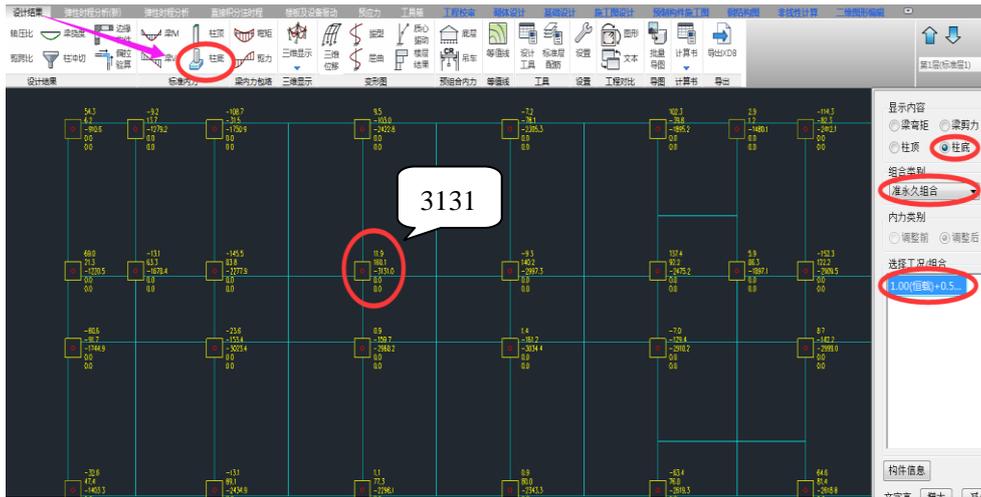


图 6 (准永久组合柱底轴力)

表 12.2.3 橡胶隔震支座压应力限值

建筑类别	甲类建筑	乙类建筑	丙类建筑
压应力限值 (Mpa)	10	12	15

图 7 (抗震规范 12.2.3 橡胶隔震支座压应力限值表)

依据规范乙类建筑要求，竖向压应力要求不大于 12Mpa，此时预设压应力 10Mpa，反算隔震支座底面积，推算隔震支座直径 D:

$$A = F_n / \sigma$$

$$R = \sqrt{\frac{F_n}{\sigma * \pi}} = \sqrt{\frac{3131 * 10^3 * 10^6}{10 * 10^6 * 3.14159}} = 315\text{mm}$$

3、新隔标下的前处理计算参数设置

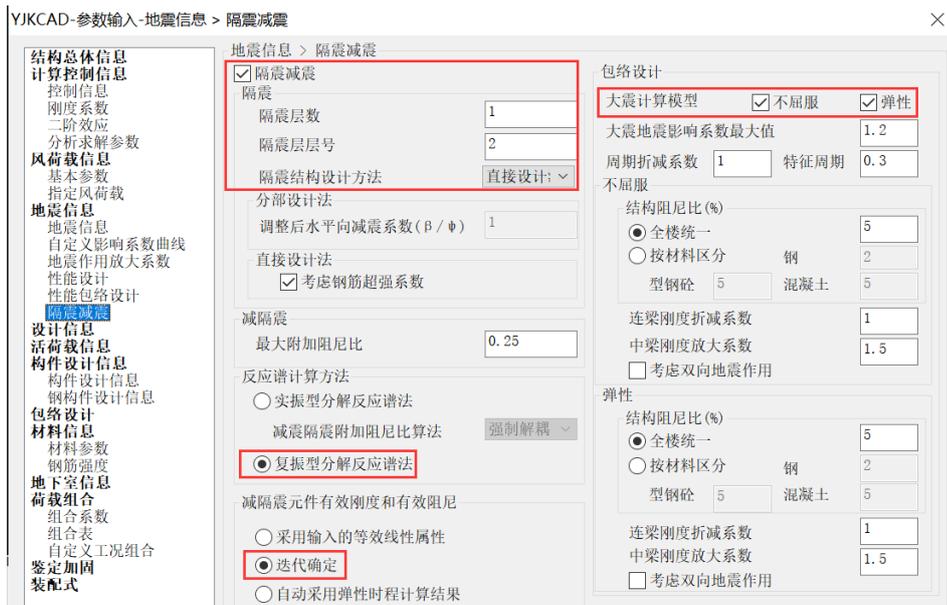


图 8 (YJK 前处理隔震减震参数信息)

- 1) 输入的隔震层层号进行后续隔震层偏心率、屈重比、抗风承载力、总水平力等结果的输出；
- 2) 选择“直接设计法”时：
程序默认选中“复阵型分解反应谱法”和“迭代确定”；
地震信息中地震影响系数最大值按中震取值；
上部结构计算、弹性时程均采用隔震标准设计反应谱；
地震组合的构件设计按照隔震标准 4.4.6 条进行设防地震下的性能化设计；
- 3) 执行通用规范、结构重要性系数 1.1、抗震等级相关设置；

4、新隔标下的隔震属性定义

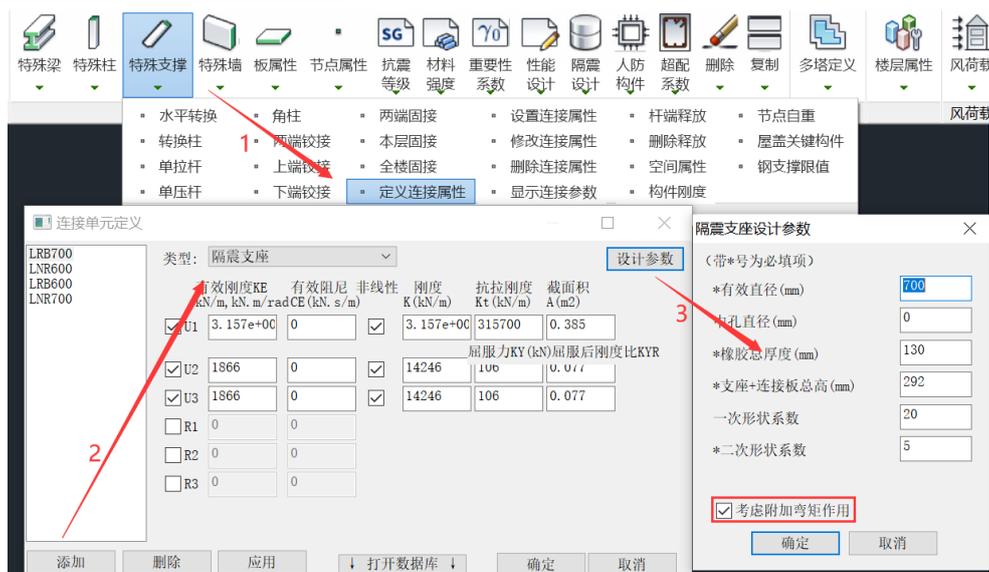


图 8 (YJK 铅芯隔震元件属性设置)

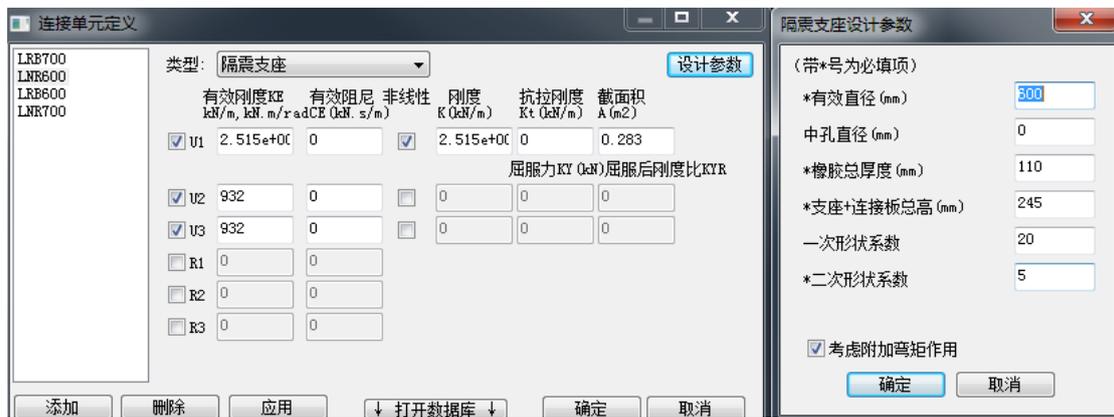


图 9 (YJK 普通橡胶隔震元件属性设置)

说明：U1 为竖向一支座竖向承载力、竖向受压刚度，竖向受拉刚度、截面积；
U2 为水平向（Y 轴）一支座水平刚度，屈服前的刚度，屈服力，屈服前后刚度比；

U3 为水平向（X 轴）一支座水平刚度，屈服前的刚度，屈服力，屈服前后刚度比；

有效直径、橡胶总厚度—新隔标 4.6.6 条第 1 款，橡胶隔震支座在罕遇地

震作用下的水平位移限值取值不应大于支座直径的 0.55 倍和各层橡胶厚度之和 3.0 倍二者的较小值；此二参数用于支座位移限值的计算；

二次形状系数—新隔标 4.6.3 条第 2 款，对于橡胶隔震支座，当第二形状系数小于 5.0 时，应降低平均压应力限值：小于 5 且不小于 4 时降低 20%，小于 4 且不小于 3 时降低 40%；此参数用于隔震支座在重力荷载代表值作用下的压应力限值计算；

支座+连接板总高—当考虑隔震支座的附加弯矩时，需要支座的总高度数据，软件会自动读取设计参数中的“支座+连接板总高”进行此项计算。

*以上参数均为产品参数

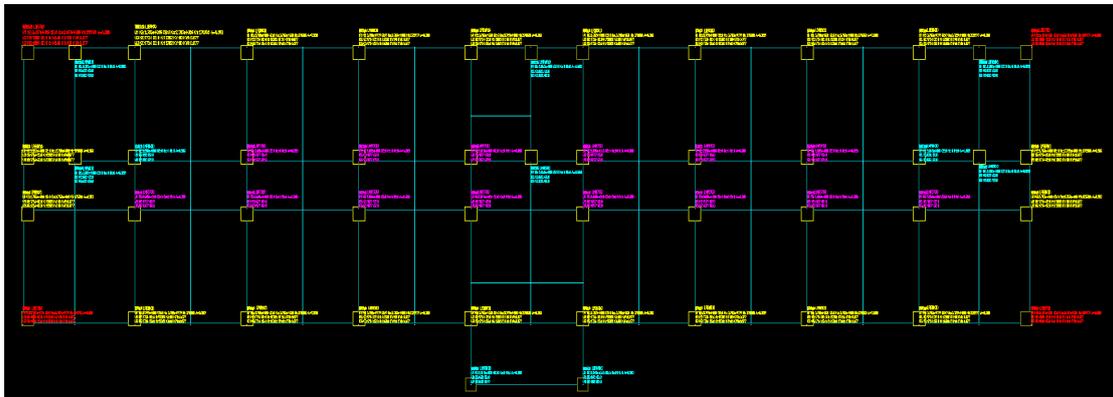


图 10 (隔震支座平面布置图)



图 11 (轴压比限值降低 0.1)

备注：注：轴压比增减量限值只需定义隔震层以上竖向构件

5、包络设计选项内容

新隔标 4.7.2 隔震层支墩、支柱及相连构件应采用在罕遇地震作用下隔震支座底部的竖向力、水平力和弯矩进行承载力验算，且应按抗剪弹性、抗弯不屈服考虑，宜按本标准附录 C 的式 (C.0.1) 进行验算。



图 12 (YJK 大震包络设计选项)

- 1) 软件在此处设置包络设计参数，自动在计算目录下生成大震计算模型，自动进行支墩构件的大震包络设计，支墩构件配筋采用设防地震设计、罕遇地震抗剪弹性、抗弯不屈服的较大值。
- 2) 新隔标 4.7.2 条规定隔震层支墩、支柱及相连构件应进行大震性能包络设计，此参数用于对构件进行“支墩及相连构件”属性的设置，设置了支墩及相连构件属性的构件才会进行包络设计：

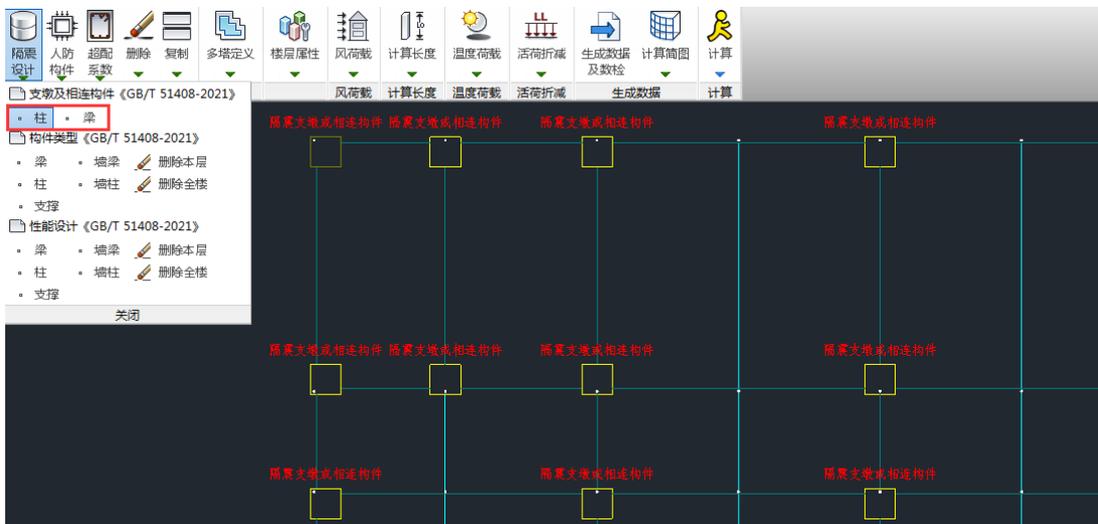


图 13 (隔震支墩及相连构件指定-柱)

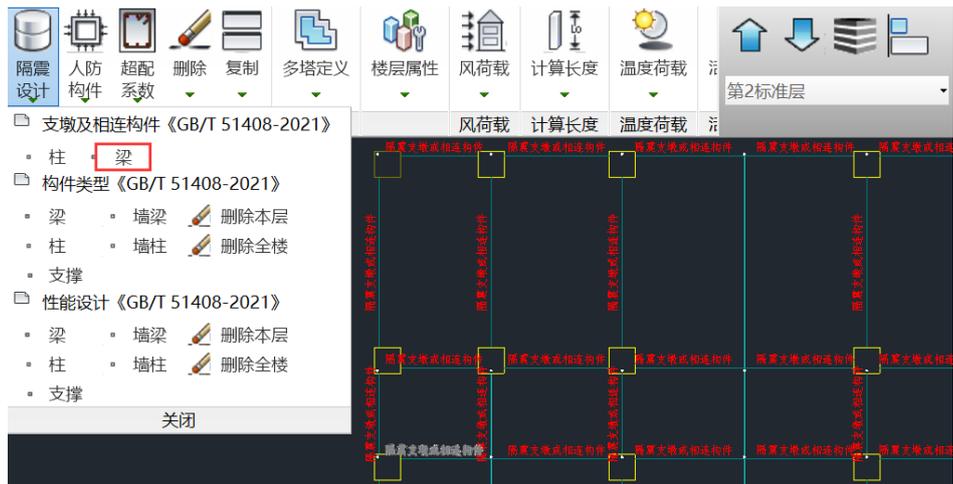


图 14 (隔震支墩及相连构件指定-梁)

3) 隔标规定构件设计采用中震下的性能设计，隔震结构构件根据性能要求分为关键构件、普通竖向构件、重要水平构件和普通水平构件，对不同类型的构件按照隔震标准 4.4.6 及条文说明分别采用弹性和不屈服的设计方法：

构件类型	所属默认构件	备注
关键构件	支墩、支柱及相连构件，支撑隔震支座的下部结构，底部加强部位的剪力墙，转换梁、转换柱	1.隔震标准4.7.3条文说明中，底盘中直接支撑隔震塔楼的结构及其相邻一跨的相关构件应为关键构件；
普通竖向构件	除关键构件外的框架柱非底部加强部位的剪力墙	
重要水平构件	除关键构件外的框架梁、连梁	

图 15 (构件类型指定-柱)

构件类型	所属默认构件	备注
关键构件	支墩、支柱及相连构件，支撑隔震支座的下部结构，底部加强部位的剪力墙，转换梁、转换柱	1.隔震标准4.7.3条文说明中，底盘中直接支撑隔震塔楼的结构及其相邻一跨的相关构件应为关键构件；
普通竖向构件	除关键构件外的框架柱非底部加强部位的剪力墙	
重要水平构件	除关键构件外的框架梁、连梁	

图 16 (构件类型指定-梁)

当用户对某个构件设置了支墩及相连构件属性后，软件会自动将其大震性能设置为抗剪弹性、抗弯不屈服

图 17 (大震抗弯不屈服、抗剪弹性)

6、隔震模型反应谱结果查看

1) 文本结果查看基底剪力

Floor	Tower	Fx (kN)	Vx (分塔剪重比) (kN)	Mx (kN-m)	Static Fx (kN)
7	1	247.51	247.51(15.753%)	816.80	366.88
6	1	2657.76	2896.68(14.664%)	12437.16	3615.19
5	1	2683.93	5529.90(14.104%)	33928.51	3046.10
4	1	2661.31	8091.95(13.662%)	65303.94	2314.60
3	1	2728.66	10680.13(13.343%)	106616.77	1552.77
2	1	3231.18	13725.41(13.112%)	125563.33	828.50
1	1	0.38	13725.77(12.890%)	150024.40	34.12

图 18 (隔震模型 X 向基底剪力)

Floor	Tower	Fy (kN)	Vy (分塔剪重比) (kN)	My (kN-m)	Static Fy (kN)
7	1	250.08	250.08(15.917%)	825.25	361.61
6	1	2630.94	2870.24(14.530%)	12333.21	3563.34
5	1	2647.55	5462.45(13.932%)	33553.38	3002.41
4	1	2624.61	7984.41(13.480%)	64499.43	2281.41
3	1	2693.11	10532.65(13.159%)	105222.42	1530.50
2	1	3192.76	13530.39(12.926%)	123883.94	816.62
1	1	0.36	13530.74(12.707%)	147982.87	33.63

图 19 (隔震模型 Y 向基底剪力)

7、非隔震模型反应谱结果查看

1) 拷贝隔震模型，删除隔震单元属性，上肢墩柱底设铰后建立非隔震模型：

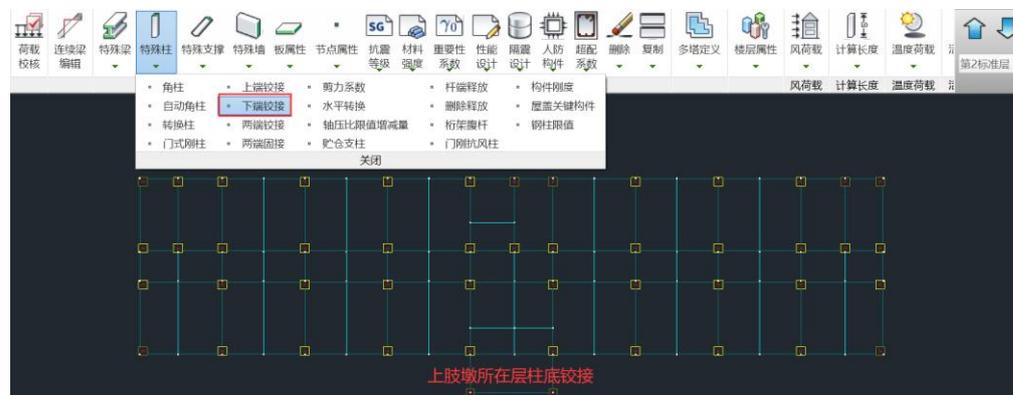


图 20 (非隔震模型上肢墩层柱底铰接)

2) 计算后文本结果查看基底剪力：

Floor	Tower	Fx (kN)	Vx (分塔剪重比) (kN)	Mx (kN-m)	Static Fx (kN)
7	1	1806.76	1806.76(114.994%)	5962.31	1430.98
6	1	13621.32	14942.31(75.643%)	64711.56	14100.86
5	1	11740.38	24412.24(62.264%)	157223.04	11881.15
4	1	10502.65	31260.72(52.778%)	274251.12	9027.99
3	1	8142.89	35569.08(44.438%)	407280.14	6056.49
2	1	3287.26	36857.59(35.210%)	456977.98	3231.53
1	1	77.33	36883.23(34.638%)	521444.53	133.08

图 21 (非隔震模型 X 向基底剪力)

Floor	Tower	Fy (kN)	Vy (分塔剪重比) (kN)	My (kN-m)	Static Fy (kN)
7	1	1823.69	1823.69(116.072%)	6018.18	1404.96
6	1	13432.66	14786.15(74.852%)	64188.56	13844.39
5	1	11563.22	24042.08(61.320%)	155223.44	11665.05
4	1	10379.83	30841.71(52.070%)	270633.55	8863.78
3	1	8097.05	35210.18(43.990%)	402292.33	5946.34
2	1	3449.77	36607.18(34.971%)	451608.81	3172.75
1	1	74.09	36631.58(34.401%)	515594.61	130.65

图 22 (非隔震模型 Y 向基底剪力)

8、隔震模型与非隔震模型基底剪力对比

新隔标 6.1.3-2 隔震结构底部剪力比不大于 0.5 时，上部结构可按本地区设防烈度降低 1 度确定抗震措施。当验算满足小于 0.5 时，校核之前隔震模型上部计算参数是否吻合，满足时进行补充时程分析，不满足时多数情况需返回模型重新调整隔震支座布置方案。

9、隔震支座验算结果查看 (反应谱结果)

- 1) 自动验算隔震层偏心率、抗风承载力、屈重比，在设计结果中的隔震层输出；输出隔震层简图；
自动验算重力荷载代表值下的支座压应力；
支持按照大震等效反应谱结果(验算组合是隔标 6.2.1 条条文说明)验算罕遇地震下隔震支座的_{最大压应力、最大拉应力、支座位移}；



图 23 (反应谱隔震层结果)

- 2) 点击“隔震层验算”，弹出右侧对话框，输出内容包括隔震层简图和隔震层验算：

隔震层简图包括支座信息、质心刚心、等效刚度和阻尼，以图形形式给出隔震支座参数，如有效直径、支座面积、橡胶总厚度、二次形状系数等，质心刚心的位置，以及迭代计算得到的等效刚度和等效阻尼；

隔震层验算以文本形式给出隔震层的各项验算结果、包括偏心率、屈重比、抗风承载力、总水平力验算；

A) 隔震标准 4.6.2 条第 4 款 隔震层刚度中心与质量中心宜重合，在设防烈度地震作用下的偏心率不宜大于 3%；

B) 隔震标准 4.6.8 条 隔震层的抗风承载力应符合下式规定：

$$\gamma_w V_{wk} \leq V_{\Delta w}$$

$V_{\Delta w}$ —隔震层抗风承载力设计值，隔震层抗风承载力由抗风装置和隔震支座的屈服力构成，按屈服强度设计值确定；

γ_w —风荷载分项系数，可取 1.4

V_{wk} —风荷载作用下隔震层的水平剪力标准值；

C)总水平力验算见抗震规范 12.1.3 条 3 款，风荷载和其他非地震作用的水平荷载标准值产生的总水平力不宜超过结构总重力的 10%；



图 24 (反应谱隔震层简图)

4) 隔震支座及位移验算结果

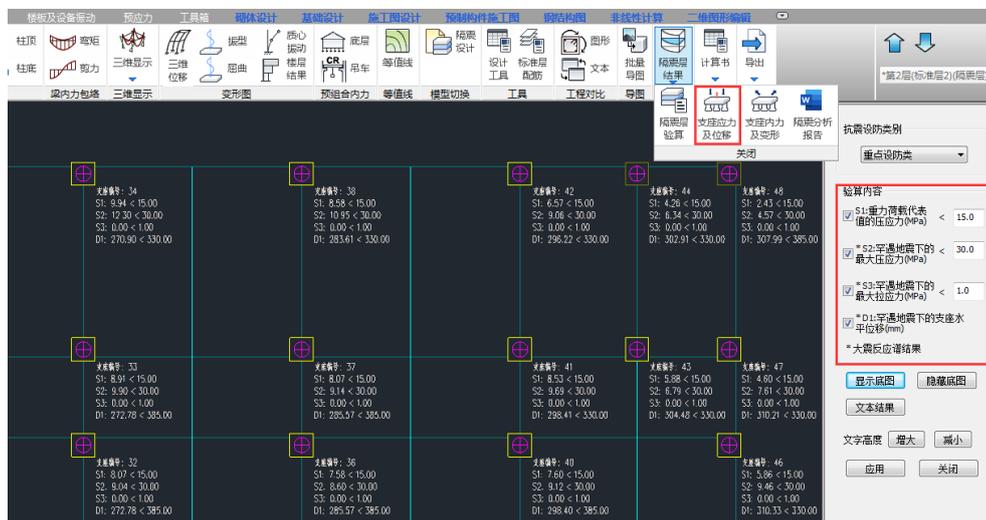


图 25 (反应谱隔震层支座应力及位移)

5) 隔震内力及变形验算结果，可以选择单工况、标准组合、基本组合、目标组合进行结果显示：

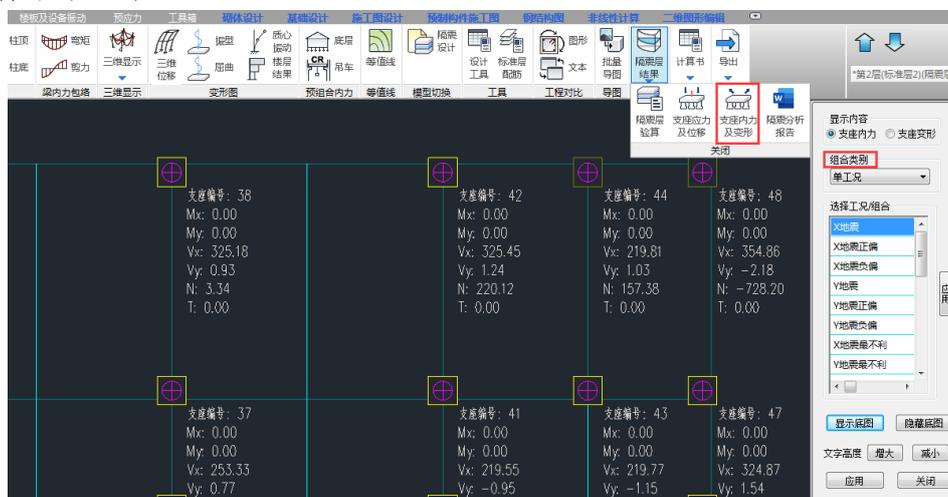


图 26 (反应谱隔震层支座内力及变形)

10、隔震结构整体指标及性能配筋设计内容查看

- 1) 对于隔震结构，隔震层上部结构的设计需要满足中震下的各项整体指标的要求，比如中震下结构的层间位移角（对框架结构，设防地震下隔震层以上结构1/400,隔震层以下1/500）、中震下结构的刚重比、楼层剪重比、除隔震层及下支墩层以外的楼层位移比、刚度比等楼层指标，各项指标均应满足规范的要求。
- 2) 设计结果下输出了隔震模型包络设计结果，软件输出整体、大震弹性、大震不屈服结果，软件在前处理计算参数内设置包络设计参数时，自动在计算目录下生成大震计算模型，自动进行支墩构件的大震包络设计，支墩构件配筋采用设防地震设计、罕遇地震抗剪弹性、抗弯不屈服的较大值，结果输出在整体模型配筋简图下。

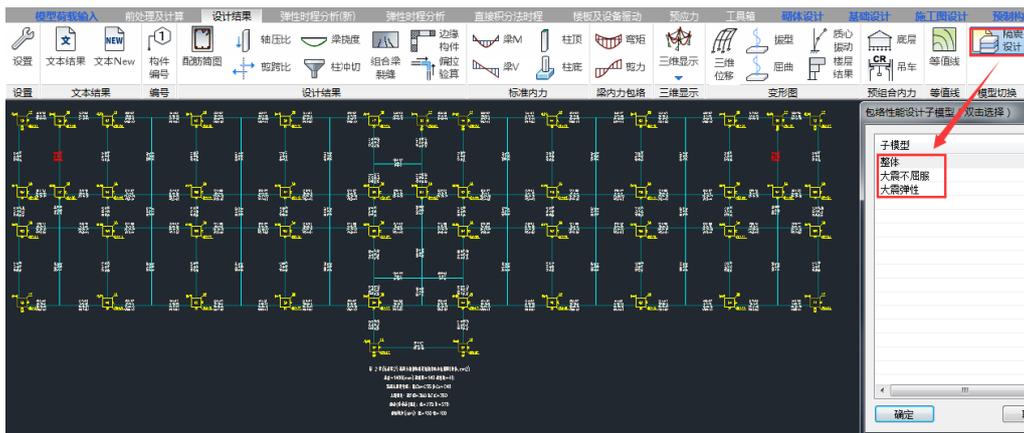


图 27（隔震设计包络结果查询）

- 3) 上肢墩、下柱墩构件信息均体现考虑由隔震支座的水平变形产生的附加内力：
EXGZ+ -- +X方向地震附加弯矩下的标准内力
EXGZ- -- -X方向地震附加弯矩下的标准内力
EYGZ+ -- +Y方向地震附加弯矩下的标准内力
EYGZ- -- -Y方向地震附加弯矩下的标准内力
反应谱计算中的隔震支座附加弯矩的实现方法为：

对应 4 个方向地震，增加 4 个附加弯矩工况，采用重力荷载代表值+相应地震工况的标准组合轴力乘以支座最大位移，此弯矩作用到隔震结构上，计算出附加弯矩工况下的结构内力，然后与相同方向的地震工况同时组合，不同方向不组合。

11、隔震结构罕遇地震弹性时程分析

- 1) 地震波选择：

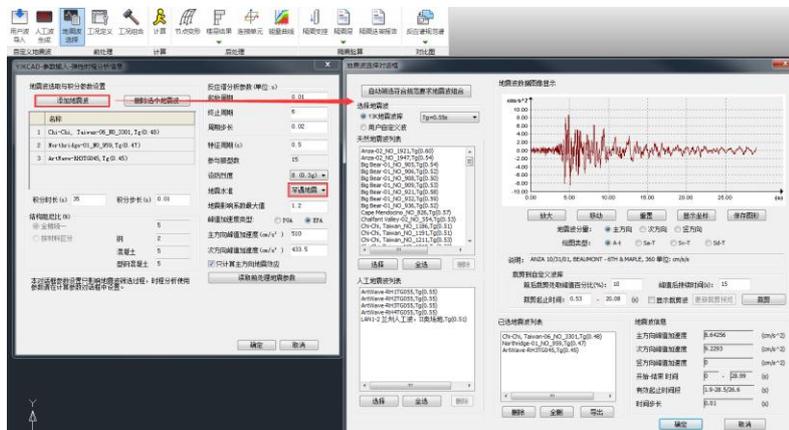


图 28（地震波选择对话框）

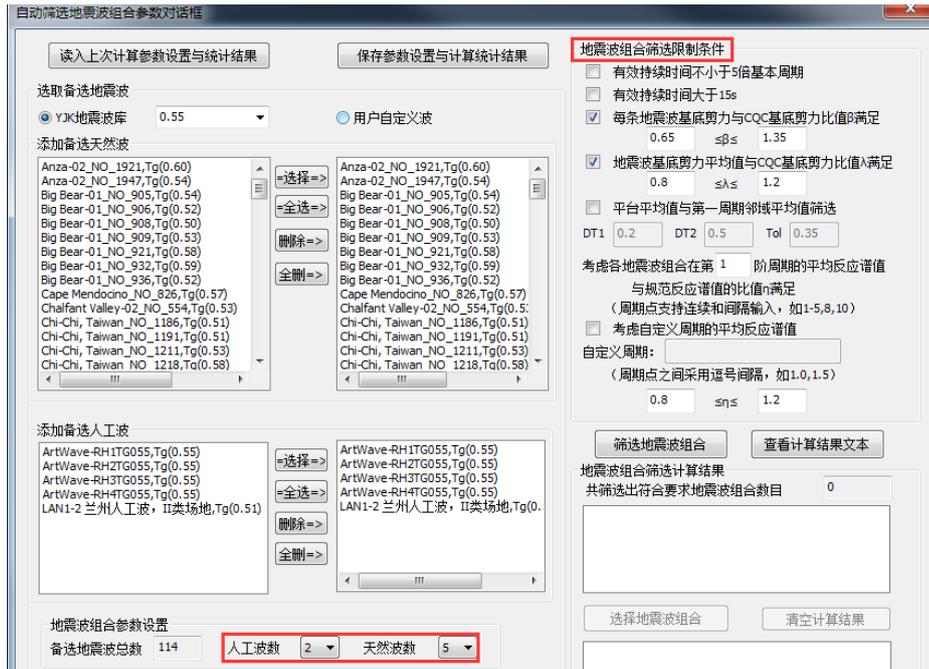


图 29 (筛选地震波组合的限制条件)

*备注：选波规范条文

5.1.2-3 特别不规则的建筑、甲类建筑和表 5.1.2-1 所列高度范围的高层建筑，应采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算；当取三组加速度时程曲线输入时，计算结果宜取时程法的包络值和振型分解反应谱法的较大值；当取七组及七组以上的时程曲线时，计算结果可取时程法的平均值和振型分解反应谱法的较大值。**(新隔标选 7 条波取平均值)**

采用时程分析法时，应按建筑场地类别和设计地震分组选用实际强震记录和人工模拟的加速度时程曲线，其中**实际强震记录的数量不应少于总数的 2/3**，多组时程曲线的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符，其加速度时程的最大值可按表 5.1.2-2 采用。**弹性时程分析时，每条时程曲线计算所得结构底部剪力不应小于振型分解反应谱法计算结果的 65%，多条时程曲线计算所得结构底部剪力的平均值不应小于振型分解反应谱法计算结果的 80%。**

5.1.2 条文说明：计算结果在结构主方向的平均底部剪力一般不会小于振型分解反应谱法计算结果的 80%，每条地震波输入的计算结果不会小于 65%。从工程角度考虑，这样可以保证时程分析结果满足最低安全要求。但计算结果也不能太大，每条地震波输入计算不大于 135%，平均不大于 120%。

5.1.2 条文说明：所谓“在统计意义上相符”指的是，多组时程波的平均地震影响系数曲线与振型分解反应谱法所用的地震影响系数曲线相比，在对应于结构主要振型的周期点上相差不大于 20%。**(一般取前三周期)**

5.1.2 条文说明：输入的地震加速度时程曲线的有效持续时间，一般从首次达到该时程曲线最大峰值的 10%那一点算起，到最后一点达到最大峰值的 10%为止；不论是实际的强震记录还是人工模拟波形，有效持续时间一般为结构基本周期的 (5~10) 倍，即结构顶点的位移可按基本周期往复 (5~10) 次。

2) 工况定义

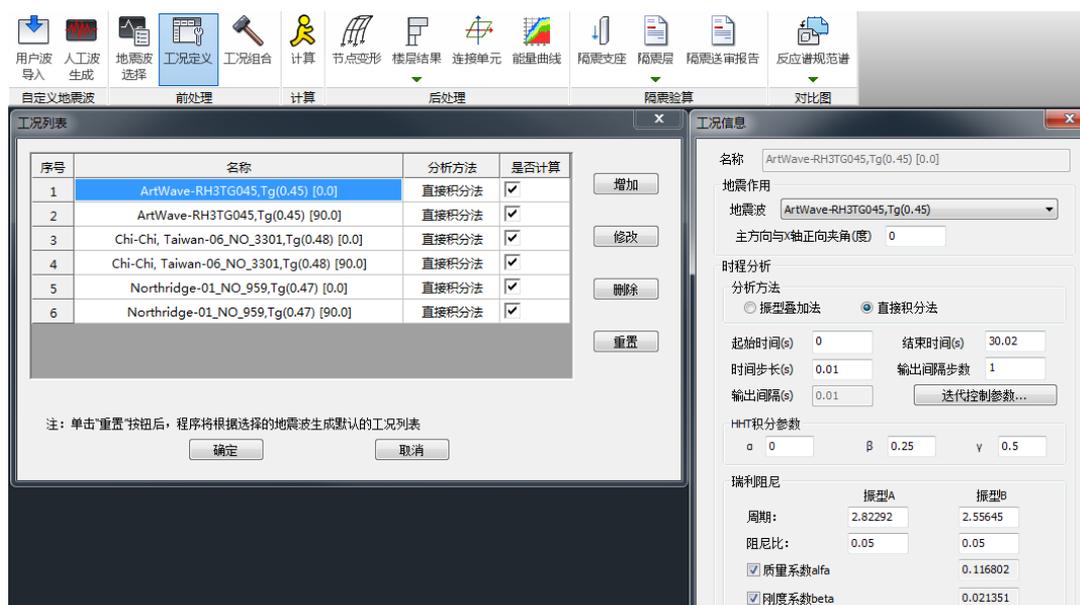


图 30 (弹性时程分析工况定义)

3) 工况组合添加



图 31 (弹性时程分析工况组合)

验算的指标：（参考隔标 6.2.1 条文及相应地标）

长期荷载下的面压（重点设防：12Mpa，受压为负，受拉为正）

荷载组合为：1.0D+0.5L，各个支座压应力见图，支座压应力满足要求。

隔震支座最大轴力及其压应力计算（25Mpa）

罕遇地震下隔震支座最大轴力计算采用的荷载组合（两种组合取大值）：

组合 1：最大压应力=1.0×恒荷载+0.5×活荷载+1.0×水平地震+0.5×竖向地震=1.0D+0.5L+1.0Fek+0.5×0.3×(1.0D+0.5L)=1.15D+0.575L+1.0Fek；

组合 2：最大压应力=1.0×恒荷载+0.5×活荷载+0.5×水平地震+1.0×竖向地震=1.0D+0.5L+0.5Fek+1.0×0.3×(1.0D+0.5L)=1.3D+0.65L+0.5Fek。

隔震支座拉应力验算(1Mpa)

采用的荷载组合（两种组合取大值）：

组合 1：最大拉应力=1.0×恒荷载-1.0×水平地震-0.5×竖向地震，其荷载组合为：1.0D-1.0Fek-0.5×0.3(1.0D+0.5L)=0.85D-0.075L-1.0Fek；

组合 2：最大拉应力=1.0×恒荷载-0.5×水平地震-1.0×竖向地震，其荷载组合为：1.0D-0.5Fek-1.0×0.3(1.0D+0.5L)=0.7D-0.15L-0.5Fek。

罕遇地震下隔震层水平位移计算（隔震支座的水平位移限值：对橡胶支座不应超过该支座有效直径的 0.55 倍和支座内橡胶总厚度的 3.0 倍二者的较小值）

采用的荷载组合：1.0×恒荷载+0.5×活荷载+1.0×水平地震；其荷载组合为：1.0D+0.5L+1.0Fek

4) 隔震支座结果查看：

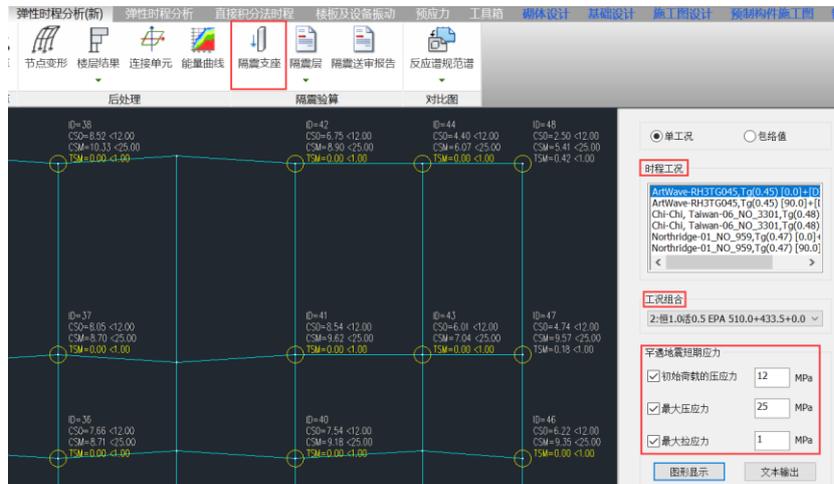


图 32（弹性时程隔震支座应力图结果）

隔震支座ID	最大初始压应力	最大压应力	最大拉应力 (MPa)
1	4.91	7.002	0
2	8.187	11.769	0
3	6.159	8.467	0
4	3.247	4.645	0
5	7.804	8.289	0
6	5.697	7.196	0
7	11.077	13.91	0
8	9.971	11.437	0
9	10.791	11.478	0
10	8.381	10.274	0
11	10.676	13.599	0
12	10.19	11.228	0
13	10.504	11.202	0
14	11.038	12.75	0
15	10.822	13.677	0
16	10.267	11.31	0
17	10.166	10.823	0
18	10.55	12.339	0

图 33（弹性时程隔震支座应力 EXCEL 表格文本）



图 34 (弹性时程隔震支座内力滞回曲线)



图 35 (弹性时程单条波下的能量图)

5) 隔震标准 4.6.9 条规定隔震建筑需要进行整体抗倾覆验算, 抗倾覆验算应按罕遇地震作用计算倾覆力矩, 并按上部结构重力荷载代表值计算抗倾覆力矩, 抗倾覆力矩与倾覆力矩之比不应小于 1.1。

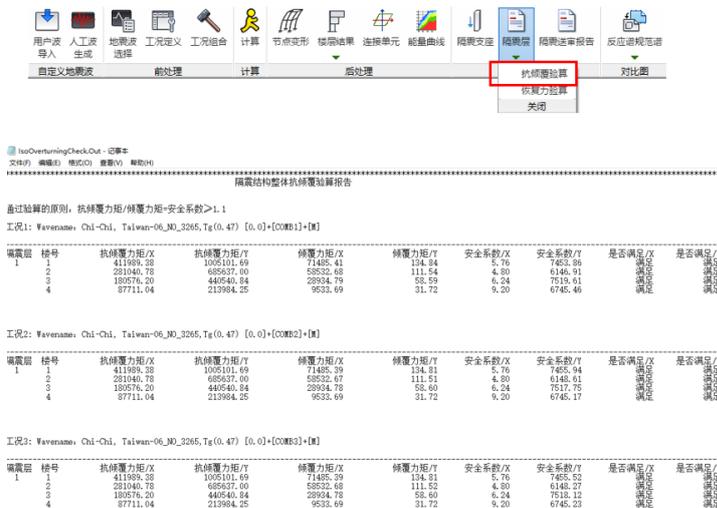


图 36 (抗倾覆验算文本结果)

6) 隔震标准 4.6.1 条第 4 款规定, 隔震层应进行恢复力验算, 隔震层在罕遇地震作用下的水平最大位移所对应的恢复力, 不宜小于隔震层屈服力与摩阻力之和的 1.2 倍;

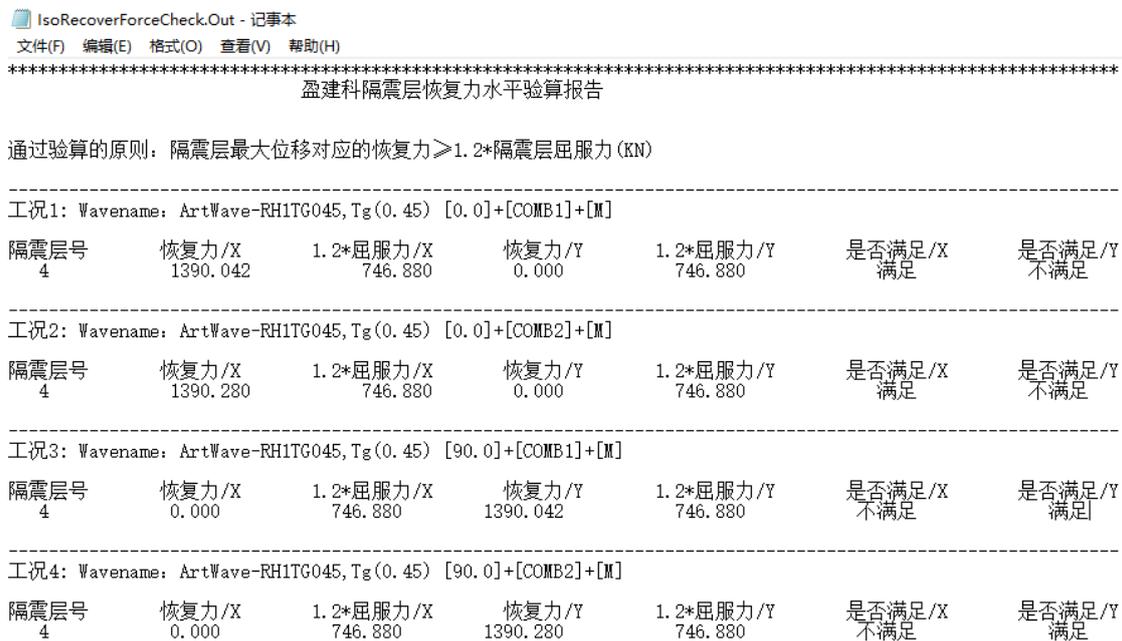


图 37 (恢复力验算文本结果)

12、隔震结构大震弹塑性分析

如果需要考虑上部结构在大震下有可能进入弹塑性, 则补充大震弹塑性分析内容, 进一步验证在罕遇地震下结构的性能 (YJK-EP 模块下分析)

由于弹塑性分析时长较长, 案例取 1 条天然波分析, 设置弹塑性参数:

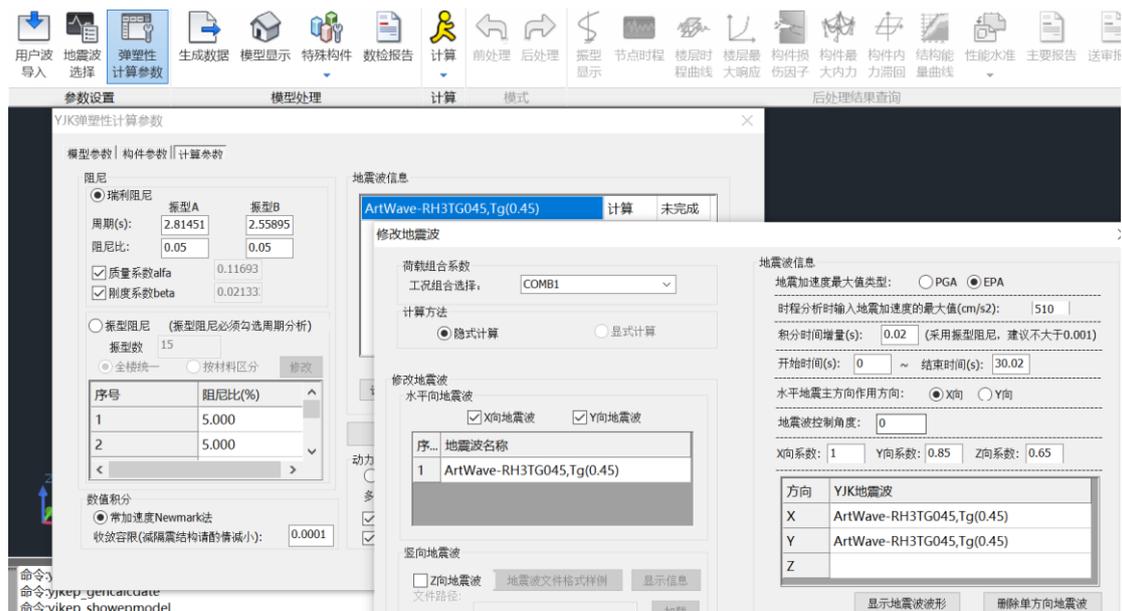


图 38 (弹塑性计算参数)

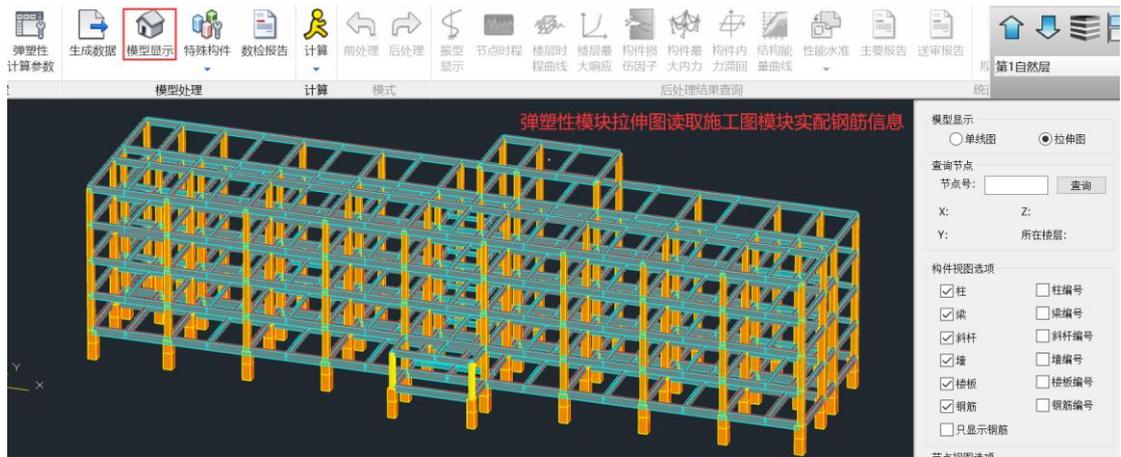


图 39 (弹性塑性模型实配钢筋拉伸图)

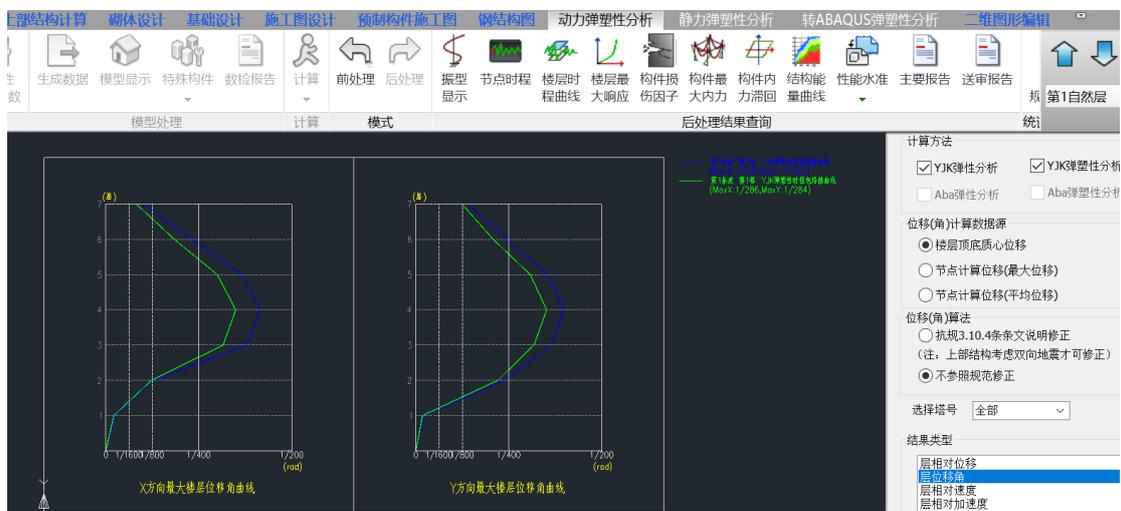


图 40 (弹性塑性层间位移角)

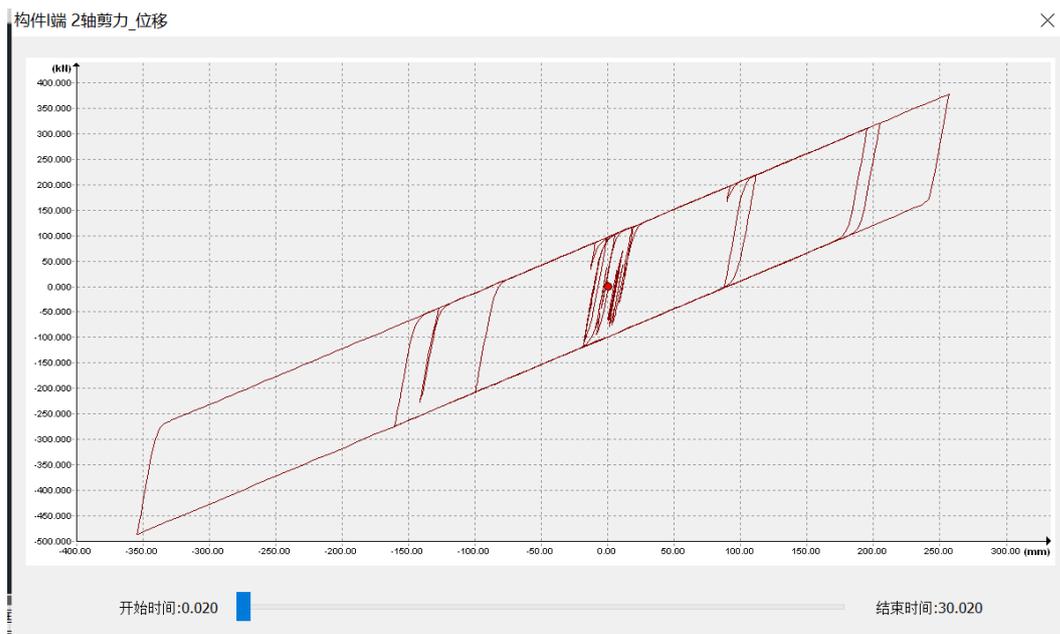


图 41 (隔震支座滞回曲线)

能量曲线

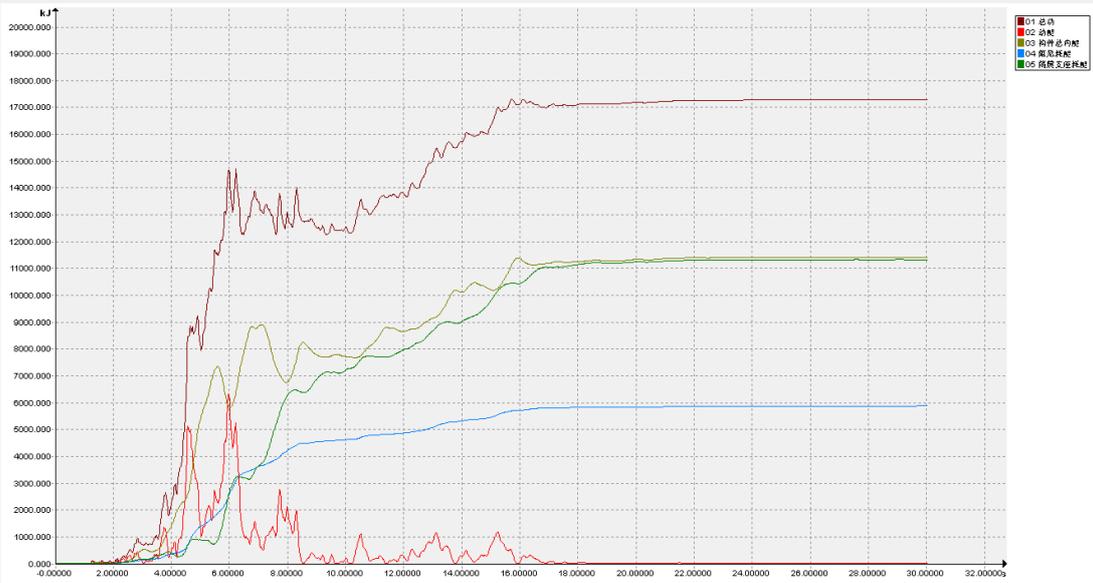


图 42 (能量图)