

# YJK 减隔震设计中的疑难问题解析（二）

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，我们在之前的技术周刊《YJK 减隔震设计中的疑难问题解析（一）》中已经为大家分享了 4 个常见的减震疑难问题，本文继续为大家分享用户近期在使用 YJK 5.2.1 版本进行减隔震设计时遇到的 2 个较典型的隔震疑难问题，后续将持续更新。

## 一 隔震复振型反应谱法振型数的选取及过阻尼模态现象

目前结构反应谱计算大多依据下列高规规定，认为振型的累积质量参与系数控制不少于 90%，振型就足够了。这对于常规的抗震结构，累积质量参与系数大于 90%，其基底剪力大致接近收敛，CQC 振型叠加的内力和位移基本稳定。

5.1.13 抗震设计时，B 级高度的高层建筑结构、混合结构和本规程第 10 章规定的复杂高层建筑结构，尚应符合下列规定：

1 宜考虑平扭耦联计算结构的扭转效应，振型数不应小于 15，对多塔楼结构的振型数不应小于塔楼数的 9 倍，且计算振型数应使各振型参与质量之和不小于总质量的 90%；

本规程建议的振型数是对质量和刚度分布比较均匀的结构而言的。对于质量和刚度分布很不均匀的结构，振型分解反应谱法所需的振型数一般可取为振型参与质量达到总质量的 90% 时所需的振型数。

对于隔震结构，新隔标要求采用基于迭代的复振型反应谱法来计算配筋，用复振型而不用传统的实振型是因为隔震结构是强非比例阻尼体系。此时体系质量参与系数应用复振型质量参与系数，而不能沿用传统的实振型质量参与系数，文献[2]等验证了采用实振型质量参与系数方法所估计的振型参与数量比复振型质量参与系数方法普遍要少（见下方图 1），有时甚至产生不小的误差。为此，从 5.1 版本开始，YJK 引入了复振型质量参与系数，设计师可以通过复振型累积质量参与系数来辅助判断振型数对剪力计算是否充足，然而，并不能单纯以其质量参与系数之和大于 90% 来判断振型数是否足够，而还需要判断剪力是否收敛且稳定，通过增加振型数试算（类似于 RITZ 向量法试算的步骤），因为复振型质量参与系数并不都是正值，导致累积质量参与系数并不是严格单调递增而是有增有减如图 1 所示，其累积参与系数甚至很多可能超过 100% 再下降，最后稳定于 100%，图 2 中 YJK 中的质量参与系数的负值也很清晰地展现了上述规律。

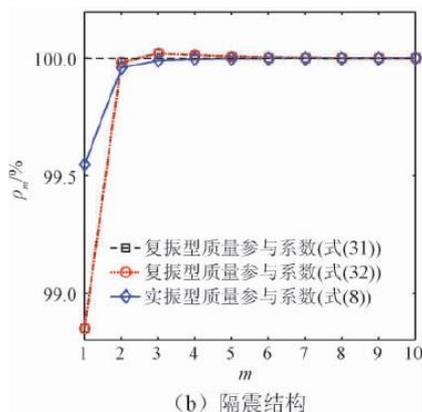


图 1 质量参与系数随振型数的变化（实振型与复振型）

振型号	X向平均质量系数%(sum)	Y向平均质量系数%(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)	0.60( 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)	7.48( 99.34)
8	-0.58( 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)

图 2 YJK 复振型质量参与系数

笔者建议对于隔震结构复振型反应谱法，通过不断增加振型数试算直到各层剪力收敛

稳定（如下图 3 所示），再同时参考复振型质量参与系数之和是否稳定且数值接近 100%，可以按这样的步骤来确定所需振型数。

=====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	8098.35	8117.45	振型数24
2	1	1.000	1.000	8097.72	8116.84	
3	1	1.000	1.000	7398.93	7505.92	
4	1	1.000	1.000	5272.42	5287.90	
5	1	1.000	1.000	3821.76	3847.97	
6	1	1.000	1.000	2188.93	2220.89	
7	1	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	
1	1	1.000	1.000	8102.19	8119.90	振型数36
2	1	1.000	1.000	8097.89	8117.01	
3	1	1.000	1.000	7400.01	7506.95	
4	1	1.000	1.000	5273.11	5288.61	
5	1	1.000	1.000	3822.43	3848.61	
6	1	1.000	1.000	2189.44	2221.39	
7	1	1.000	1.000	244.35	263.44	
=====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	8102.21	8158.08	振型数48
2	1	1.000	1.000	8097.89	8117.67	
3	1	1.000	1.000	7399.98	7509.75	
4	1	1.000	1.000	5273.11	5290.40	
5	1	1.000	1.000	3822.46	3850.24	
6	1	1.000	1.000	2189.44	2222.57	
7	1	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%	

图 3 YJK 某 7 层结构增加振型数试算其各层剪力的变化

对于隔震结构采用复振型反应谱法在实际计算时,当结构的非比例阻尼特性较强时,还可能遇到个别振型出现过阻尼现象。所谓的过阻尼就是振型阻尼比超过 1 的情况,此时特征值会出现成对的实数解<sup>[3]</sup>,而不是正常非比例阻尼结构复振型系统中的如下式的共轭复数。

$$\mu_i = -\zeta_i \omega_i + i\omega_i \sqrt{1-\zeta_i^2}, \bar{\mu}_i = -\zeta_i \omega_i - i\omega_i \sqrt{1-\zeta_i^2} \quad (i=1, \dots, n)$$

当某一振型出现过阻尼时,文献[4]和新隔标所给出的 CCQC 表达式将不再适用,需要使用文献[3]的公式,计算将变的更复杂。YJK5.1 及之前版本遇到这类过阻尼情况会计算报错,提示存在过阻尼模态,阻尼比异常。

然而土木工程结构,小阻尼是普遍现象,过阻尼模态自身的瞬态响应衰减比较快,相对小阻尼模态,对总响应的贡献很小,YJK5.2、YJK5.2.1 及以后版本会直接过滤个别过阻尼模态的响应,使程序能正常进行求解。

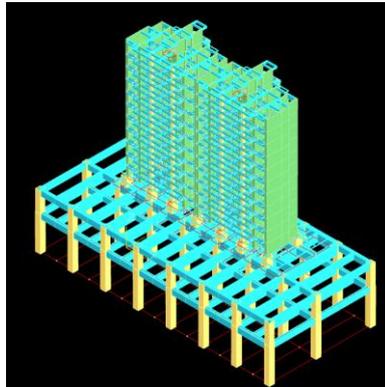
## 二 大底盘层间隔震体系反应谱迭代特殊注意点

目前大部分隔震项目基本都以新隔标的基于迭代的复振型分解反应谱法来进行计算配筋。软件迭代过程是采用抗规和消能减震技术规程的能量法进行的,迭代过程是 X 向和 Y 向地震分别迭代计算有效刚度和有效阻尼,两者直接参与后续的复振型计算,有效刚度没有问题,而有效阻尼的计算,需要用到线性粘滞阻尼器能量等效的近似公式(可根据消规 6.3.2 (4) 和 (6) 推导得到),如下:

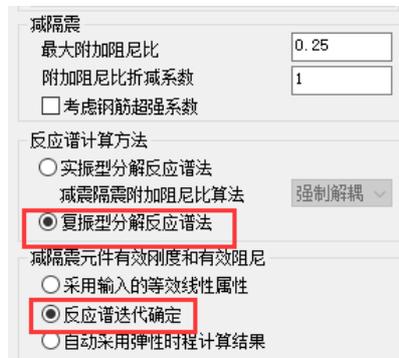
$$C_j = \frac{W_{ej}}{\pi \omega_1 u_j^2}$$

上述有效阻尼计算公式中涉及到隔震基本平动频率 $\omega_1$ 的计算。基底隔震结构是最理想的结构,其振型主要由隔震层的平动主导,隔震层基本平动振型的质量参与参数远大于其他振型,以质量参与系数最大的方法来判别一般是没有问题的,程序内部默认也是这样操作的。但是对于层间隔震结构情况可能就不同了,尤其是带大底盘的层间隔震结构,由于隔震层以下底盘质量很大,整体结构的质量参与系数很可能对应隔震层下部底盘振动的振型而不是隔震层基本平动振型,这时如果仍然使用质量参与系数来判别,会得到错误的

计算结果，并伴随着一些不符合概念的异常现象，要特别注意，以下面一个层间隔震例子为例：



该工程隔震层以下底盘为2层混凝土框架，隔震层上部为11层混凝土框架剪力墙，采用软件默认的隔震直接设计法的计算参数



计算发现两个方向剪力差异较大，相对误差超过了25%。

=====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	27910.79	25991.33
2	1	1.000	1.000	18993.65	17947.52
3	1	1.000	1.000	6876.30	5451.75
4	1	1.000	1.000	6892.65	5461.90
5	1	1.000	1.000	5328.43	5400.63
6	1	1.000	1.000	5129.71	5774.74

而且两个方向平动振型的阻尼比差异过大，第一振型隔震层 X 向平动阻尼比远小于第二振型隔震层 Y 向平动。

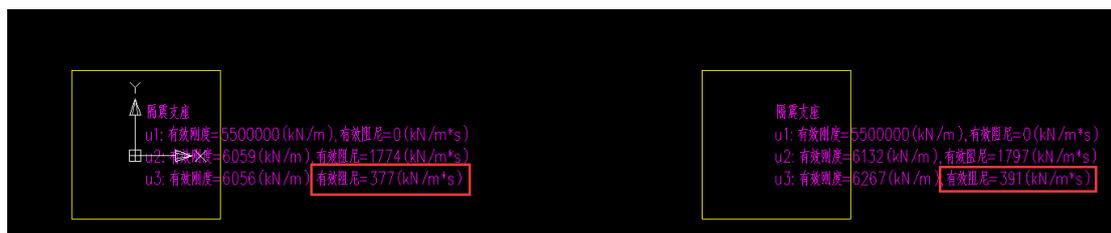
\*\*\*\*\*周期、地震力与振型输出文件\*\*\*\*\*

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) (强制刚性楼板模型)
1	2.5037	179.53	1.00(1.00+0.00)	0.00
2	2.4293	89.39	0.98(0.00+0.98)	0.02
3	2.0670	99.07	0.02(0.00+0.02)	0.98
4	0.6756	5.29	1.00(0.99+0.00)	0.00
5	0.6417	91.30	1.00(0.00+1.00)	0.00

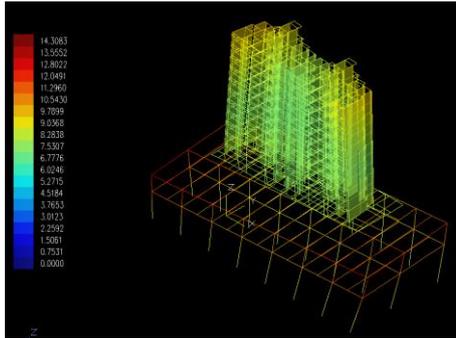
振型号	阻尼比
1	0.099
2	0.288
3	0.324
4	0.078
5	0.055
6	0.227
7	0.075
8	0.053
9	0.153

进一步查看隔震支座的有效阻尼，发现 X 向（对应 U3）的有效阻尼比 Y 向（对应 U2）小很多，Y 向是 X 向的 4.7 倍，有效阻尼计算明显有问题。



其原因就是上文说的，该模型以质量参与系数最大来取 $\omega_1$ 有问题，该模型 X 向最大振型质量参与系数并没有出现在第一振型，而是出现在大底盘的第 7 振型，其质量参与系数比第一振型质量参与系数稍大。

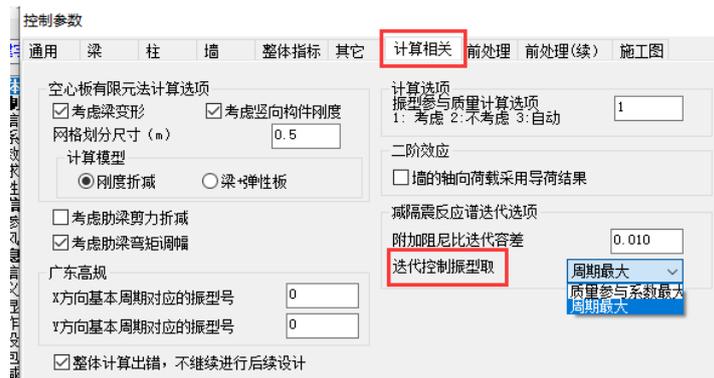
振型号	X向平动质量系数%(sum)	Y向平动质量系数%(sum)	Z向扭转质量系数%(sum)	振型号	周期	转角	平动系数(X+Y)	扭转系数(Z)
1	44.47( 44.47)	-0.00(-0.00)	-0.05(-0.05)	1	2.5099	179.53	1.00(1.00+0.00)	0.00
2	-0.01( 44.47)	47.79( 47.79)	1.72( 1.67)	2	2.4352	89.39	0.98(0.00+0.98)	0.02
3	-0.05( 44.42)	0.89( 48.68)	99.67(101.34)	3	2.0721	98.96	0.02(0.00+0.02)	0.98
4	4.89( 49.31)	0.02( 48.70)	0.06(101.40)	4	0.6760	5.37	1.00(0.99+0.00)	0.00
5	0.01( 49.32)	35.16( 83.86)	0.02(101.42)	5	0.6429	91.33	1.00(0.00+1.00)	0.00
6	0.00( 49.32)	7.34( 84.70)	0.20(101.61)	6	0.6110	99.25	1.00(0.00+1.00)	0.00
7	48.85( 98.16)	-0.00( 91.70)	-0.00(101.61)	7	0.5460	179.77	0.99(0.99+0.00)	0.01
8	0.31( 98.48)	0.00( 91.70)	0.04(101.64)	8	0.5433	178.72	0.01(0.01+0.00)	0.99
9	-0.06( 98.42)	-0.18( 91.52)	-2.10( 99.54)	9	0.5210	106.08	0.01(0.01+0.00)	0.99
10	-0.00( 98.42)	0.00( 91.52)	0.03( 99.57)	10	0.2494	179.40	1.00(1.00+0.00)	0.00
11	-0.00( 98.42)	-0.00( 91.52)	-0.00( 99.57)					
12	-0.00( 98.42)	-0.00( 91.52)	-0.00( 99.57)					



第 7 振型振型云图

因此程序默认用第 7 周期 0.546 对应的频率来计算 X 向的有效阻尼，导致其 $\omega_1$ 高估了很多，使得 X 向有效阻尼比实际值要小很多，其周期比值  $T_2/T_7=4.5 \approx 4.7$ （比值没有完全一致是因为复振型的影响）。为了避免这种错误的产生，软件在高级参数中增加了一个迭代控制选项，如下：

当质量参与系数最大的振型没有出现在隔震层基本平动振型时，这里迭代控制振型可以选择依据周期最大，即程序迭代 X 向时会选择 X 向地震周期的最大值，迭代 Y 向时会选择 Y 向地震周期的最大值，因为隔震层基本振动的周期往往数值是最大的，除非出现个别局部振动，此时设计师应避免出现第一周期局部振动导致出现错误。



上述模型当改成周期最大选项时，隔震支座两个方向的有效阻尼接近了。



进而第一第二振型阻尼比和两个方向的剪力也接近了，计算结果符合一般规律。

X地震振型号	阻尼比	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	0.288	1	1	1.000	1.000	30732.46	26059.91
2	0.280	2	1	1.000	1.000	21166.64	17992.21
3	0.357	3	1	1.000	1.000	5679.38	5441.15
4	0.056	4	1	1.000	1.000	5695.74	5451.45
5	0.246	5	1	1.000	1.000	5277.27	5374.96
6	0.227						
7	0.117						
8	0.053						
9	0.179						

上面的例子因为有效阻尼控制振型判断错误，导致层间隔震结构 X 向和 Y 向反应差距很大。对一些更大底盘的结构，控制振型判断错误往往会导致两个方向的阻尼比同时比实际小不少，隔震结构结构剪力比实际要大，当大得不多的时候，该问题往往不易察觉。

设计师对于大底盘层间隔震要特别注意质量参与系数的查看，重视高级参数中控制振型选项的应用，可有效降低复振型反应谱计算的错误。

参考文献：

- [1] 高层建筑混凝土结构技术规程（JGJ 3-2010）[S],2011-10-01.
- [2] 陈华霆, 谭平, 彭凌云,等. 复振型叠加方法合理振型数量的确定[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(2):9.
- [3] 俞瑞芳, 周锡元. 具有过阻尼特性的非比例阻尼线性系统的复振型分解法[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(1):10.
- [4] 周锡元, 俞瑞芳. 非比例阻尼线性体系基于规范反应谱的 CCQC 法[J]. 工程力学, 2006, 23(2):9.