北京盈建科软件股份有限公司

弹性时程分析

主讲：王众



目录

CONTENTS

01 规范依据及适用范围

02 地震波选取与参数要求

03 计算方法与结果查看

04 实操演示讲解



01

规范依据及适用范围

什么是弹性时程分析

弹性时程分析是结构抗震设计中，基于弹性假定，采用多条地震波时程曲线作为输入，通过动力方程求解结构地震响应的分析方法

	弹性时程分析	反应谱分析
输入荷载	多条实际 / 人工地震波（随时间变化）	地震反应谱（单自由度体系峰值响应曲线）
分析本质	动态全过程分析，还原地震作用下的响应变化	静态等效分析，仅提取峰值响应简化计算
结果特点	输出位移、内力等随时间的连续变化曲线	输出各阶振型对应的峰值响应，需组合叠加
适用场景	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	常规建筑的抗震设计

《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010，2024 年版）

5.1.2 各类建筑结构的抗震计算，应采用下列方法：

1 高度不超过40m、以剪切变形为主且质量和刚度沿高度分布比较均匀的结构，以及近似于单质点体系的结构，可采用底部剪力法等简化方法。

2 除1款外的建筑结构，宜采用振型分解反应谱法。

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。

表 5.1.2-1 采用时程分析的房屋高度范围

烈度、场地类别	房屋高度范围（m）
8 度Ⅰ、Ⅱ类场地和 7 度	＞100
8 度Ⅲ、Ⅳ类场地	＞80
9 度	＞60

《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ 3-2010）

4.3.4 高层建筑结构应根据不同情况，分别采用下列地震作用计算方法：

1. 高层建筑结构宜采用振型分解反应谱法；对质量和刚度不对称、不均匀的结构以及高度超过100m的高层建筑结构应采用考虑扭转耦联振动影响的振型分解反应谱法。

2. 高度不超过40m、以剪切变形为主且质量和刚度沿高度分布比较均匀的高层建筑结构，可采用底部剪力法。

3. 7~9度抗震设防的高层建筑，下列情况应采用弹性时程分析法进行多遇地震下的补充计算：

1）甲类高层建筑结构；

2）表4.3.4所列的乙、丙类高层建筑结构；

3）不满足本规程第3.5.2～3.5.6条规定的高层建筑结构；（竖向和水平不规则）

4）本规程第10章规定的复杂高层建筑结构。

（如带转换层、加强层、错层、连体、多塔结构）

表 4.3.4 采用时程分析法的高层建筑结构

设防烈度、场地类别	建筑高度范围
8 度Ⅰ、Ⅱ类场地和 7 度	＞100m
8 度Ⅲ、Ⅳ类场地	＞80m
9 度	＞60m

注：场地类别应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011 的规定采用。



02

地震波选取与参数要求

《建筑抗震设计规范》（GB 50011-2010，2024 年版）

地震波数量与要求：

- 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。
- 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%

表 5.1.2-2　时程分析所用地震加速度时程的最大值（cm/s^2）

地震影响	6 度	7 度	8 度	9 度
多遇地震	18	35(55)	70(110)	140
罕遇地震	125	220(310)	400(510)	620

注：括号内数值分别用于设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 的地区。

《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ 3-2010）

4.3.5 进行结构时程分析时，应符合下列要求：

1 应按建筑场地类别和设计地震分组选取实际地震记录和人工模拟的加速度时程曲线，其中实际地震记录的数量不应少于总数量的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；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%。

2 地震波的持续时间不宜小于建筑结构基本自振周期的 5 倍和15s，地震波的时间间距可取0.01s或0.02s。

3 输入地震加速度的最大值可按表4.3.5采用。

当取三组时程曲线进行计算时，结构地震作用效应宜取时程法计算结果的包络值与振型分解反应谱法计算结果的较大值；当取七组及七组以上时程曲线进行计算时，结构地震作用效应可取时程法计算结果的平均值与振型分解反应谱法计算结果的较大值。

表 4.3.5 时程分析时输入地震加速度的最大值（cm/s^2）

设防烈度	6 度	7 度	8 度	9 度
多遇地震	18	35（55）	70（110）	140
设防地震	50	100（150）	200（300）	400
罕遇地震	125	220（310）	400（510）	620

注：7、8 度时括号内数值分别用于设计基本地震加速度为 0.15g 和 0.30g 的地区，此处 g 为重力加速度。

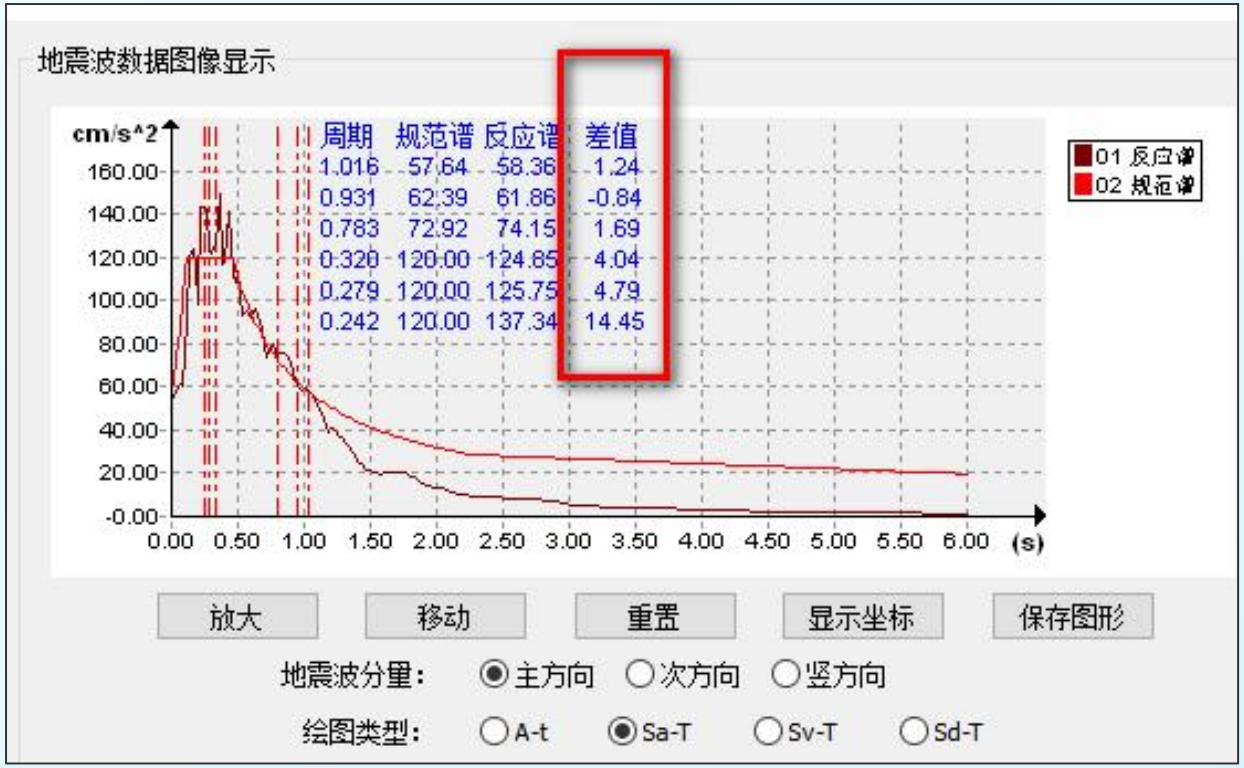
统计意义上相符

$$\eta = \frac{\text{多条地震波在该周期上的平均反应谱值}}{\text{规范反应谱在这个周期的数值}}$$

考虑各地震波组合在第 1 阶周期的平均反应谱值
与规范反应谱值的比值η满足
（周期点支持连续和间隔输入，如1-5,8,10）
☐ 考虑自定义周期的平均反应谱值
自定义周期：
（周期点之间采用逗号间隔，如1.0,1.5）
0.8 ≤η≤ 1.2
基底剪力对比楼层 第 1 层

《抗规》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%。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%。



地震动三要素

频谱特性、有效峰值和持续时间

01

频谱特性

频谱特性可用地震影响系数曲线表征，依据所处的场地类别和设计地震分组确定（即：特征周期）

02

有效峰值

加速度的有效峰值按规范表5.1.2-2中所列地震加速度最大值采用，即以地震影响系数最大值除以放大系数（约2.25）得到。计算输入的加速度曲线的峰值，必要时可比上述有效峰值适当加大。当结构采用三维空间模型等需要双向（二个水平向）或三向（二个水平和一个竖向）地震波输入时，其加速度最大值通常按1（水平1）:0.85（水平2）:0.65（竖向）的比例调整。人工模拟的加速度时程曲线，也应按上述要求生成

03

持续时间

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

YJK选波参数要点说明

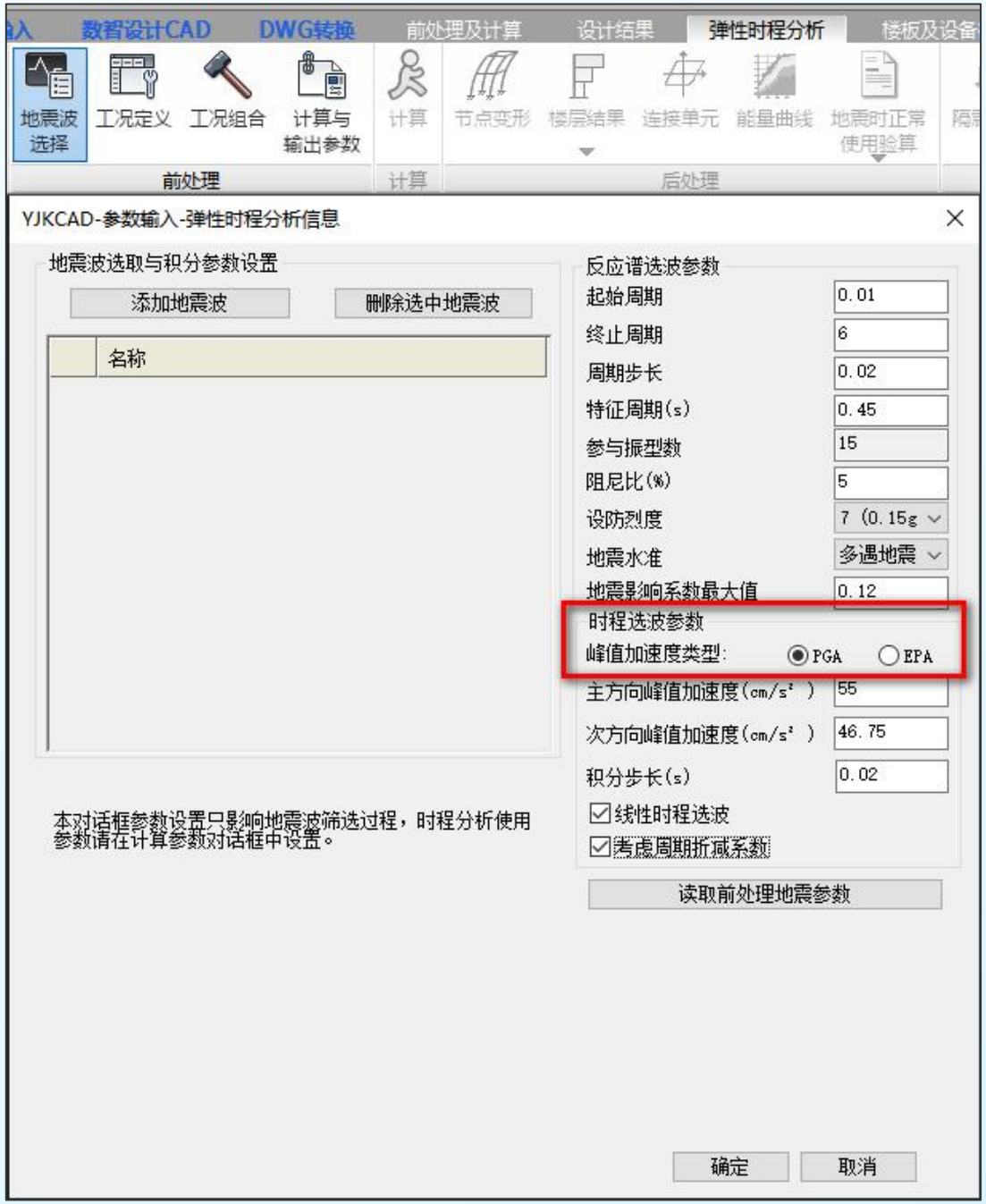
PGA：

即地面峰值加速度，采用这种方式是将地震波时程加速度的最大值放大到所设置的峰值加速度上。

EPA：

即等效峰值加速度，采用这种方式是将地震波反应谱加速度最大值所对应的时程加速度（参照规范5.1.2条文说明，最大反应谱加速度除以放大系数（约2.25）得到对应的时程加速度最大值）放大到所设置的峰值加速度上。

这里做个说明，《抗规》表5.1.2-2所列的时程分析所用的地震加速度时程的最大值是指地面的加速度，表5.1.4-1的水平地震影响系数最大值是指地上建筑的地震反应后的加速度。由于以上两种方法对原始地震波的放大方式不同，所以对于相同的峰值加速度计算出来的时程剪力是存在一定的差别，对选波结果会有影响



YJK选波参数要点说明



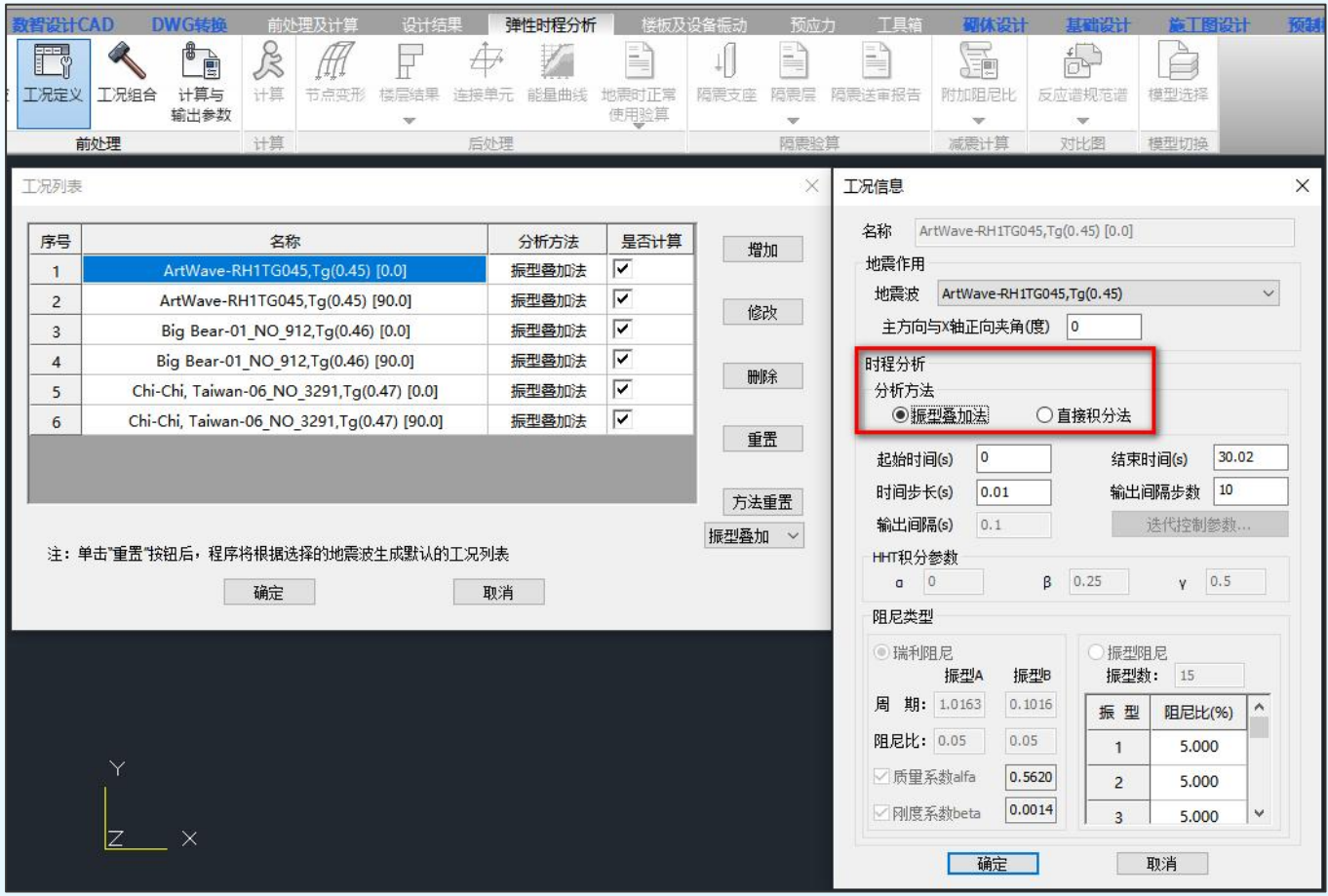


03

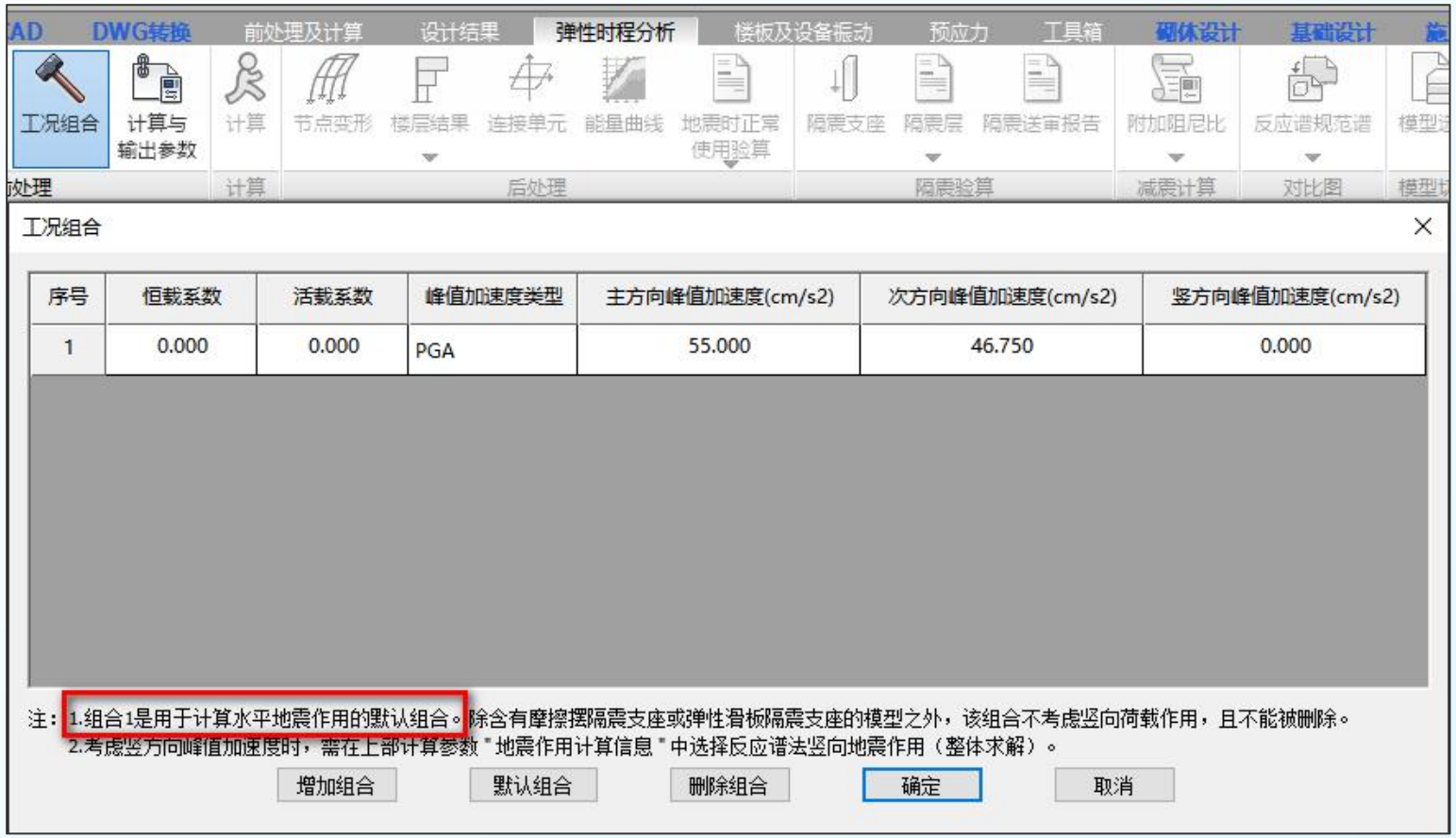
计算方法与结果查看

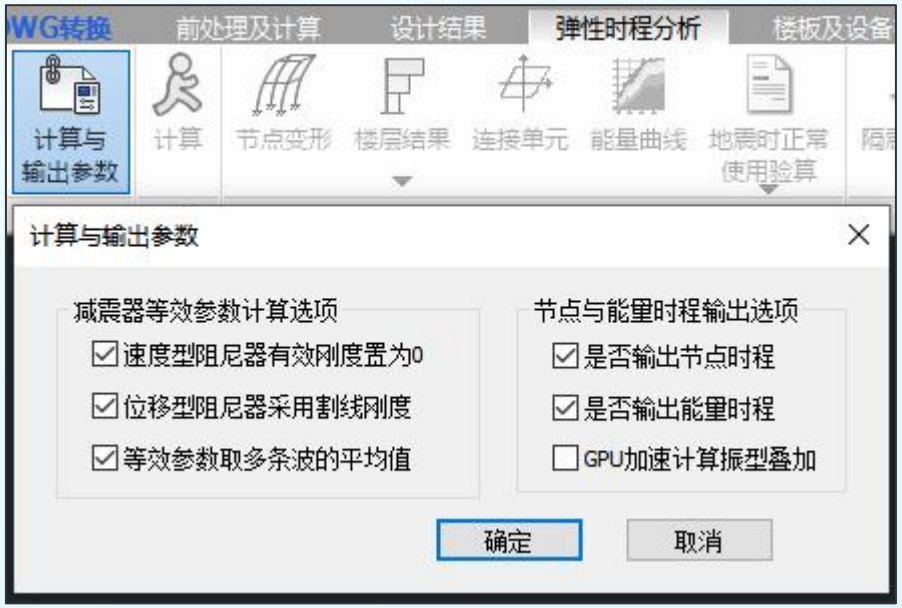
弹性时程分析-工况定义

	振型叠加法	直接积分法
核心求解思路	利用振型正交性解耦，转化为单自由度方程求解后叠加	不解耦，直接对多自由度耦合方程做时间积分
依赖条件	需提前通过模态分析获取固有频率、振型等参数	无需模态参数，仅需初始位移 / 速度和荷载信息
计算步骤	1. 模态分析求固有特性； 2. 方程解耦； 3. 单自由度方程求解； 4. 振型叠加得总响应	1. 离散时间步； 2. 按积分格式（如纽马克法）逐步计算各时刻响应
适用场景	线性结构、低频主导响应、振型参与数量少的问题	非线性结构、复杂荷载（冲击 / 爆炸 / 随机荷载）、高频影响显著的问题
计算效率	少振型参与时效率极高，计算量随振型数增加而增长	线性问题效率低于振型叠加法，复杂工况下效率稳定
核心优点	计算量小、结果物理意义清晰、便于参数分析	适用性广、无需模态信息、能处理强非线性和复杂荷载
核心缺点	无法直接处理非线性问题、依赖模态参数准确性	时间步长需控制（避免数值发散）、线性问题中计算冗余

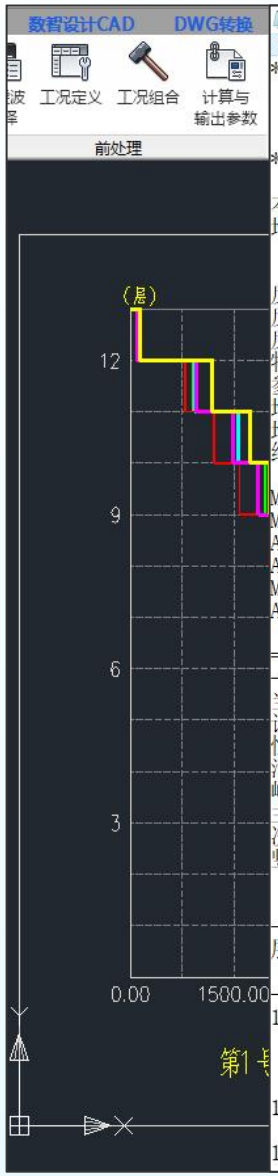


弹性时程分析-工况组合与计算参数





弹性时程分析-楼层结果



wdyna - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查

****

****

本文件除特殊注明外，
地震波名称：

反应谱分析起始周期
反应谱分析终止周期
反应谱分析周期步长
特征周期：
参与振型数目：
地震烈度：
地震影响系数最大值：
结构阻尼比：

Max-(X)：
Max-Dx：
Ave-(X)：
Ave-Dx：
Max-Dx/h：
Ave-Dx/h：

==========

当前主方向：0.0 度
计算方法：振型叠加法
恒载系数：0.00
活载系数：0.00
峰值加速度类型：PGA
主方向峰值加速度：
次方向峰值加速度：
竖方向峰值加速度：

层号	塔号	Jmax
		Jmax
13	1	1300
		1300
	2	1300
		1300
12	1	1200
		1200
11	1	1100

当前主方向： 0.0

层号	塔号	时程
13	1	137.
	2	149.
12	1	1188
11	1	1733
10	1	2017
9	1	2304
8	1	2601
7	1	2914
6	1	3275
5	1	3483
4	1	3558
	3	36.4
3	1	3767
2	1	4163
1	1	4222

0.0° 时全楼放大系

当前主方向： 90.0

层号	塔号	时程
13	1	118.
	2	142.
12	1	1040
11	1	1704
10	1	2208
9	1	2591
8	1	2916
7	1	3217
6	1	3463
5	1	3628
4	1	3719
	3	45.5
3	1	3766
2	1	3977
1	1	4032

90.0° 时全楼放大系

//==========

//////////////////////////////时程法层间剪力与CQC法计算结果比较//////////////////////////////

多条波平均值与CQC法计算结果比较

当前主方向： 0.0 度

层号	塔号	时程法剪力	CQC法剪力	比值	放大系数
13	1	104.105	95.955	1.085	1.085
	2	109.389	105.140	1.040	1.040
12	1	960.342	942.886	1.019	1.019
11	1	1477.230	1556.862	0.949	1.000
10	1	1845.105	2055.930	0.897	1.000
9	1	2189.274	2468.082	0.887	1.000
8	1	2484.524	2820.650	0.881	1.000
7	1	2849.536	3133.288	0.909	1.000
6	1	3119.518	3415.948	0.913	1.000
5	1	3278.795	3672.534	0.893	1.000
4	1	3335.620	3904.218	0.854	1.000
	3	29.141	27.160	1.073	1.073
3	1	3475.638	4243.790	0.819	1.000
2	1	3877.092	4521.603	0.857	1.000
1	1	3937.632	4560.002	0.864	1.000

0.0° 时全楼放大系数值为：1.085

当前主方向： 90.0 度

层号	塔号	时程法剪力	CQC法剪力	比值	放大系数
13	1	106.247	108.703	0.977	1.000
	2	129.730	137.109	0.946	1.000
12	1	959.388	1039.124	0.923	1.000
11	1	1549.999	1688.707	0.918	1.000
10	1	1998.559	2208.060	0.905	1.000
9	1	2347.421	2634.618	0.891	1.000
8	1	2621.788	3000.274	0.874	1.000
7	1	2866.947	3324.477	0.862	1.000
6	1	3071.861	3616.932	0.849	1.000
5	1	3227.068	3882.572	0.831	1.000
4	1	3389.811	4120.150	0.823	1.000
	3	39.586	45.081	0.878	1.000
3	1	3678.724	4454.198	0.826	1.000
2	1	3892.158	4697.805	0.829	1.000
1	1	3923.751	4729.509	0.830	1.000

90.0° 时全楼放大系数值为：1.000

//==========多波平均值全楼放大系数建议值：1.085==========//

弹性时程分析-地震时正常使用验算

HorizontalAccChecking - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

楼面水平加速度验算报告

备注：所有工况楼层质心最大绝对加速度（各角度工况及合加速度）g=9.8m/s^2

塔号	层号	0.0°	90.0°	合加速度（g）
1	1	0.0565145	0.0542231	0.0568839
	2	0.0852718	0.0611136	0.0855394
	3	0.098909	0.0691744	0.0995113
	4	0.0906978	0.0709079	0.0912106
	5	0.0884823	0.0801224	0.0884839
	6	0.0944038	0.0914141	0.0947857
	7	0.112627	0.0985631	0.112649
	8	0.123959	0.100791	0.124466
	9	0.127135	0.104842	0.129963
	10	0.123126	0.103746	0.13064
	11	0.14026	0.113708	0.142978
	12	0.166904	0.14773	0.171446
	13	0.220288	0.217165	0.224694
2	13	0.246273	0.243507	0.262194
3	4	0.155835	0.19711	0.19713

合加速度最大值 ： 2 塔， 13 层 0.262194 g

DeformationChecking - 记事本

文件(F) 编辑(E) 格式(O) 查看(V) 帮助(H)

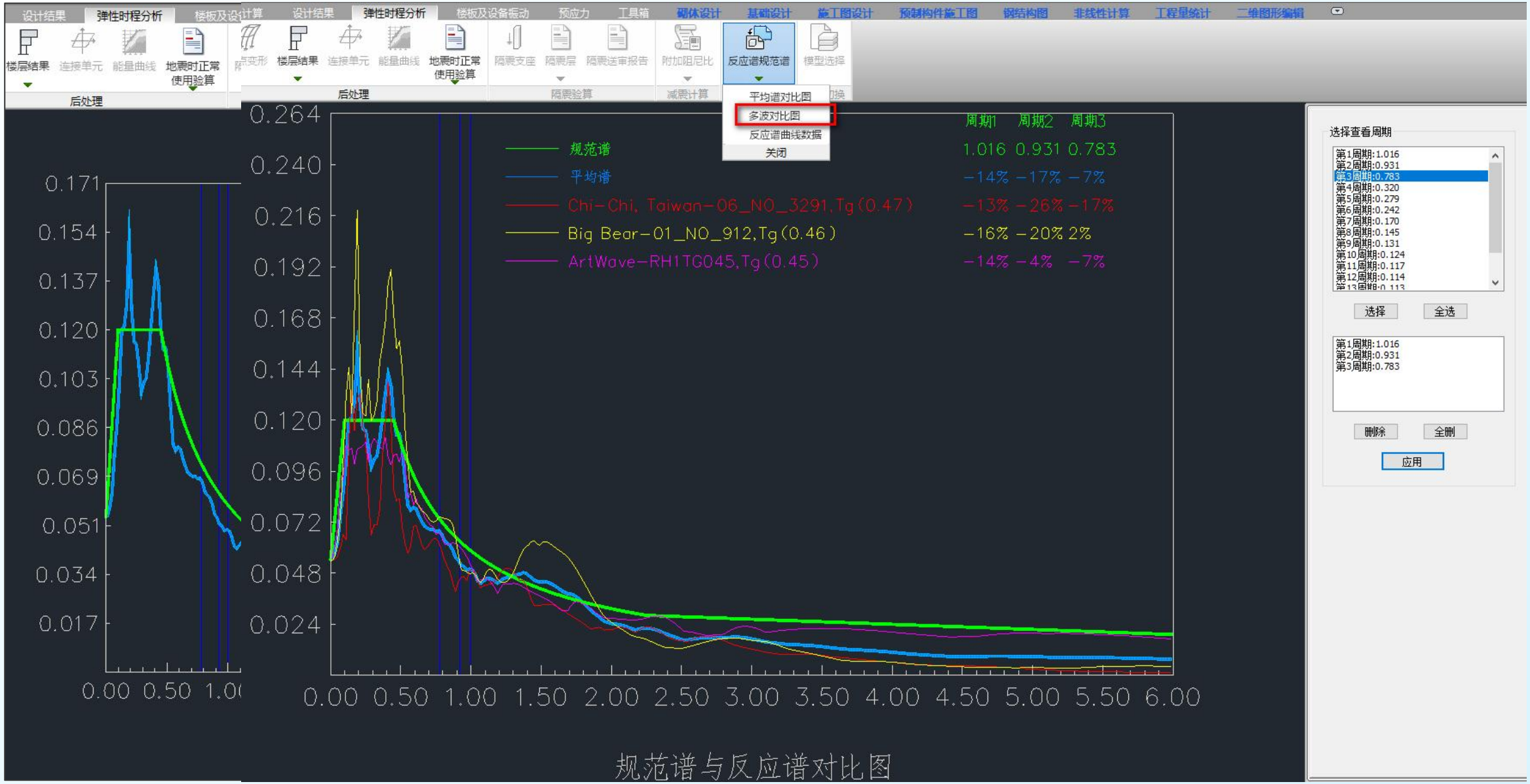
变形验算输出

备注：所有工况楼层最大层间位移角

塔号	层号	最大层间位移角(rad)
1	1	1/2162
	2	1/964
	3	1/752
	4	1/731
	5	1/715
	6	1/735
	7	1/785
	8	1/867
	9	1/948
	10	1/1064
	11	1/1176
	12	1/1249
	13	1/1339
2	13	1/1280
3	4	1/2043

所有楼层层间位移角最大值：1塔 5层 1/715

弹性时程分析-反应谱规范谱



弹性时程分析-反应谱地震作用放大调整

完成弹性时程分析之后，我们应回到上部结构前处理计算参数中，对地震作用进行放大调整，来实现弹性时程计算的补充作用。

程序支持一键导入弹性时程计算后的地震作用放大系数，可选择是平均值还是包络值，灵活高效。





04

实操演示讲解