

有限元和力学模型方面的若干概念

这里讲的是结构设计人员应明了的在有限元和力学模型方面的若干重要概念，了解这些可以大大提高对结构设计软件的应用水平。

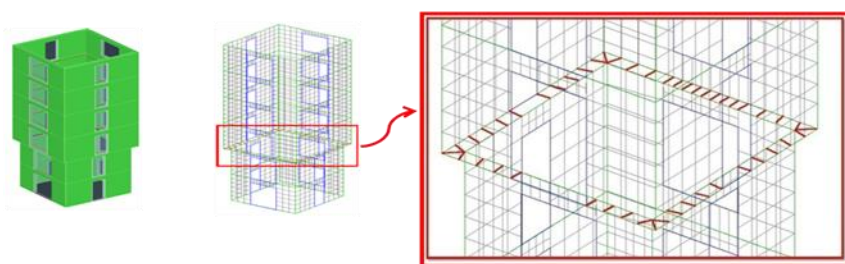
1 偏心刚域和刚性连接

在 YJK 中大量应用 MPC(Multi-point constraints, 即多点约束)。MPC 在有限元计算中应用很广泛，它允许在计算模型不同的自由度之间强加约束。在 YJK 中，MPC 显式地 (explicit) 在一个从自由度和一个或者多个主自由度之间创立。

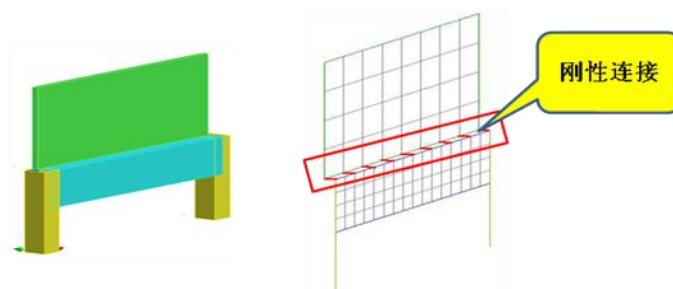
在 YJK 中，刚性楼板假定、刚性连接、梁墙约束、墙墙约束等均统一的由 MPC 方式来实现，而且在 YJK 中，不在单元层面上进行 MPC 变化，所有约束方程都在叠加整体刚度矩阵时进行处理。MPC 技术的应用避免了大量使用罚函数所带来的刚度矩阵病态等问题。

这里主要介绍杆件之间设置偏心后的连接处理。

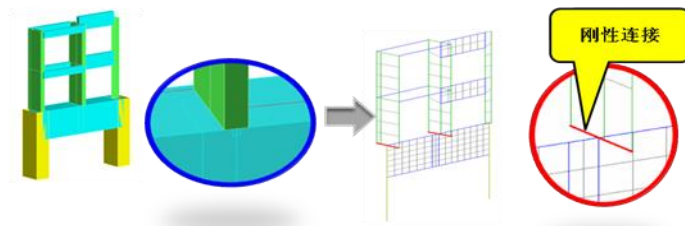
对于上下柱、上下墙之间的偏心，上下柱、上下墙将保持垂直，在计算简图上下杆件之间出现红色短线，表示计算模型中上下杆件之间的偏心。



上下有偏心墙的计算简图：

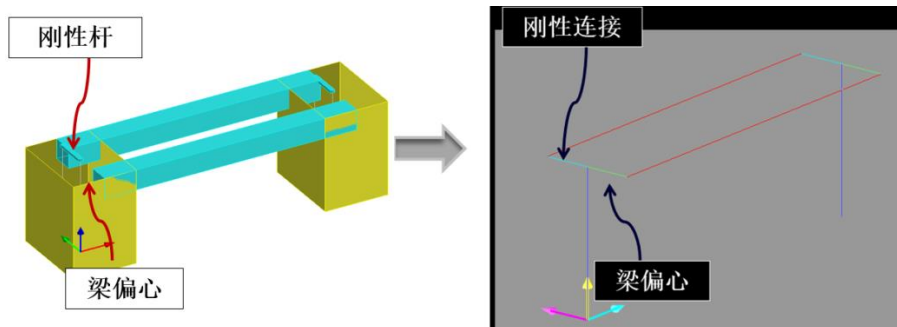


转换梁托上偏心墙的计算简图：



托垂直于转换梁轴线的短墙，将短墙下设置的刚性杆自动转为刚性连接。

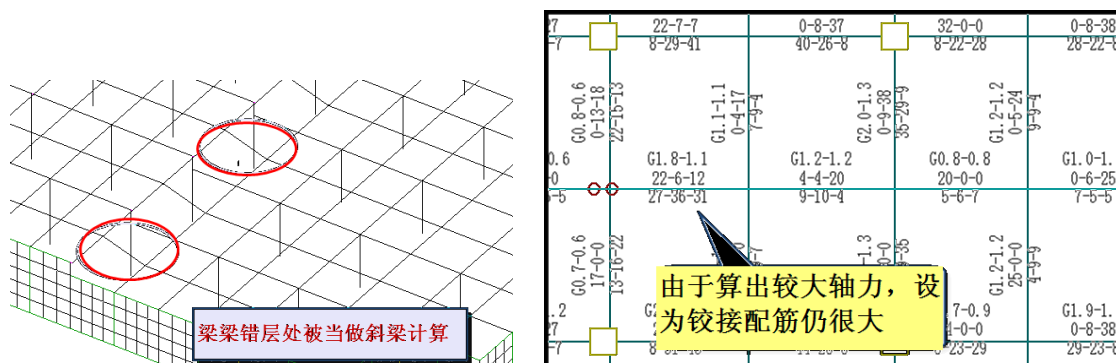
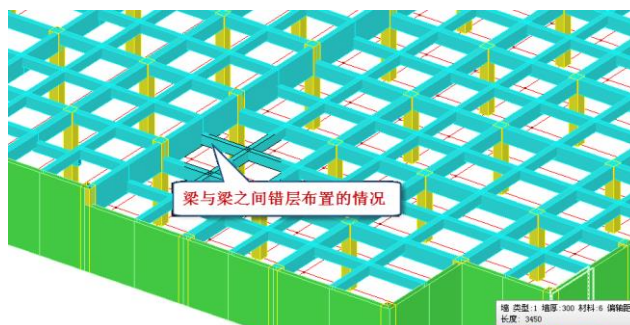
对于梁、柱、墙之间的偏心，在计算简图中均标以红色短线，表示之间的偏心连接。



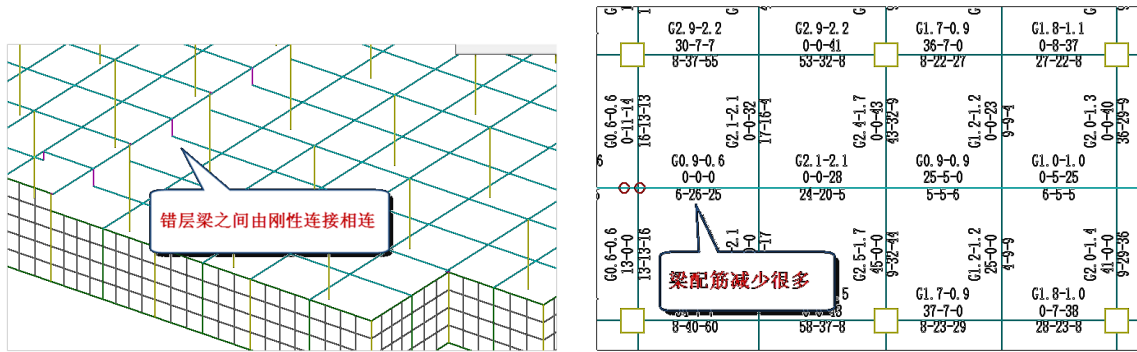
当多根梁与大截面柱连接，有的偏心输入，而有的用刚性杆连接时，软件对大截面柱内的刚性杆自动转换为刚性连接，可避免采用刚性杆时所引入的数值计算误差，保证计算结果的合理性。

YJK 对短的刚性杆、短的梁或短的墙杆件尽可能地转换为刚性连接，因为直接按刚性杆件、短杆件计算容易引起计算异常。比如传统软件数检提示最多的内容是短梁，这些短梁可能由各种布置偏心引起。YJK 不再做这样的提示，因为它在程序内部将这些短梁转成了偏心刚域。

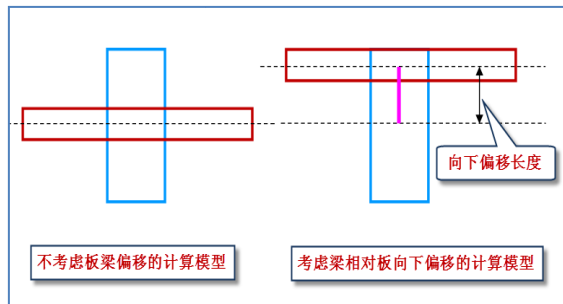
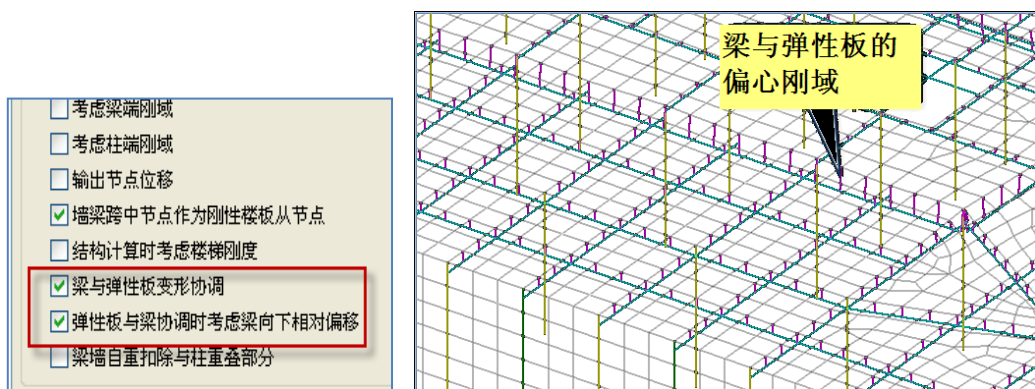
对于梁梁之间错层布置的情况，有的软件把错层梁处理成斜梁，斜梁会出现不应有的较大轴力，有时把它设置为铰接仍配筋过大。



YJK 对梁梁错层处的错层梁仍保持它的水平放置，但在错层处设置竖向的偏心刚域，可见图中的红色短线。



对于弹性板和梁之间的连接计算，也可以考虑弹性板和梁之间的竖向偏心。YJK 设置参数：弹性板与梁协调时考虑梁向下相对偏移，勾选此参数后，在计算简图的弹性板单元和梁单元之间也画出红色短线示意它们之间的竖向偏心。

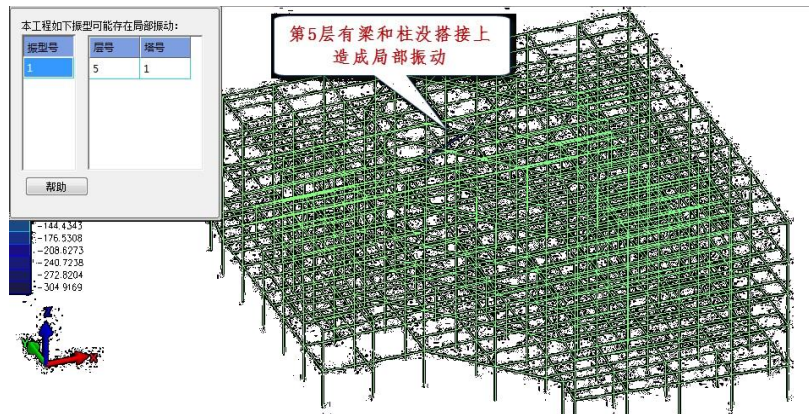
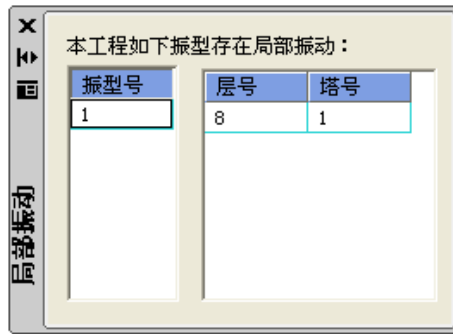


上图为是否考虑梁和弹性板之间的偏心的计算模型对比。

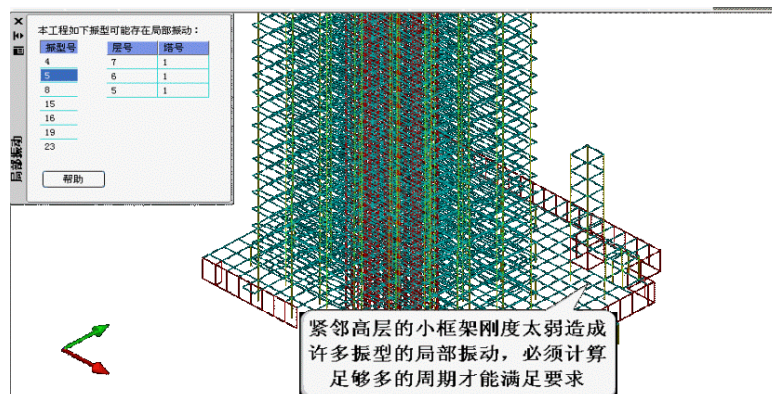
总之，YJK 在构件偏心处理、短梁短墙归并、刚性楼板、刚性连接、墙墙不协调关系等通过多点约束机制实现，效果是减少计算单元数量，避免计算异常，提高计算的稳定性。

2 局部振动识别和提示

局部振动经常是由于结构模型不合理、有缺陷而造成的。YJK 软件应用能量集中程度识别的原则，在计算中可以对结构中可能存在局部振动情况的振型与楼层做出判断，当程序查出局部振动现象时，将在计算完成后马上在屏幕上给出提示框，告知用户局部振动发生的位置、层号以及局部振动的振型号以供参考，双击某项局部振动则即时显示局部振动的位移动画，形象地告知局部振动发生的位置。



该工程计算完后提示5层有局部振动，是5层有根梁和柱未能正常搭接，造成该梁悬挑，局部振动画显示悬挑梁的来回摆动。



该工程的局部振动发生在底部的小框架上，该独立小框架和旁边的高层相比刚度相差悬殊，这种局部振动将消耗大量的计算振型个数，应注意地震计算的振型参与质量是否达到90%，否则应增加计算振型数。

3 求解规模和计算速度

1. 求解器

YJK 软件中的求解器由国内领先的团队提供，采用了先进的稀疏矩阵求解技术，并优化组织程序结构，在保证计算准确性的基础上达到了较高的求解效率。对于相同规模的题目，求解速度与规模与其它结构计算软件相比均有大幅度的提高。

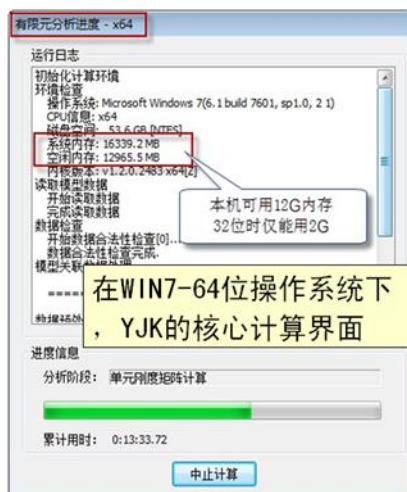
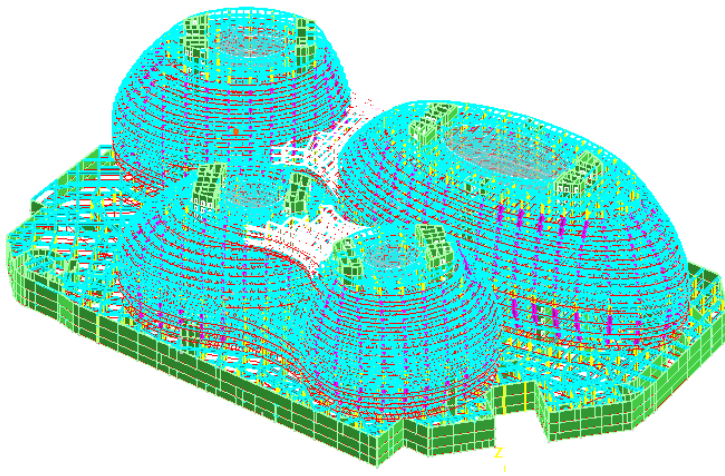
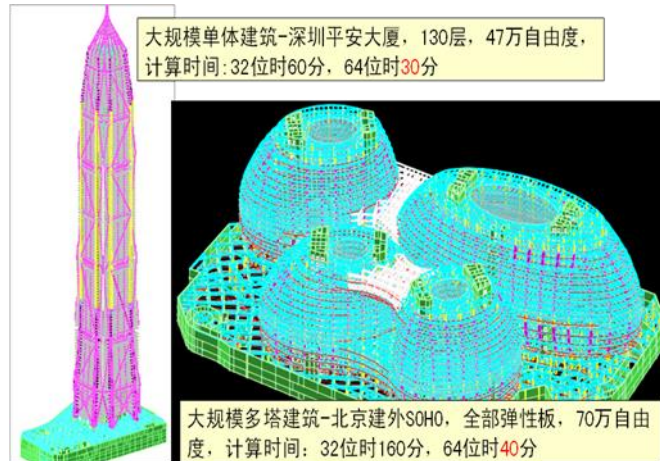
同时，求解器中充分运用多点约束等技术，统一处理各种约束关系。同时结合死活单元技术，对施工模拟、活荷载不利布置、人防分析等进行专项优化处理，大幅度提高计算效率。

2. 计算容量和 64 位技术

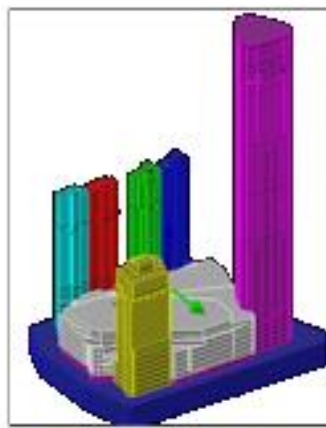
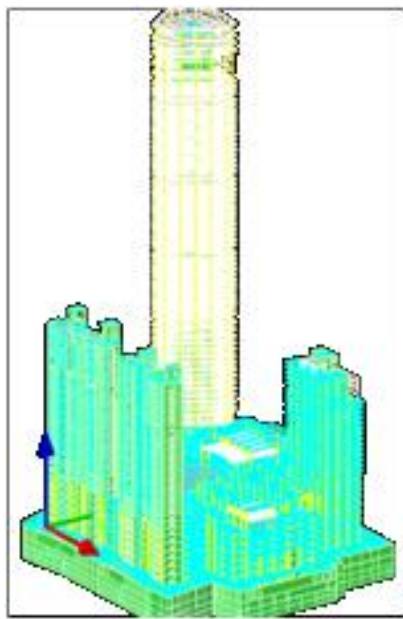
在计算容量方面，YJK 进行了大量的适应性优化，在 32 位模式下，计算规模可达 100 万自由度。

在 YJK 中充分应用了 64 位编程技术，同时提供了 32 位版本和 64 位版本的有限元分析核心程序。安装程序时识别出用户计算机配置 64 位操作系统时，自动安装 YJK 的 64 位计算软件，以达到最优的计算效率。

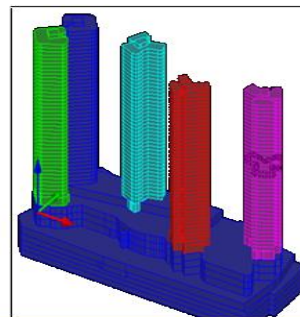
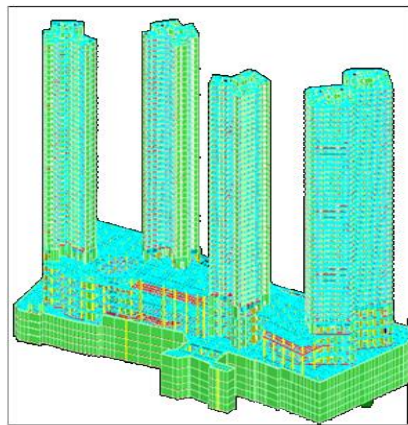
在 64 位模式下，由于没有 2G 内存限制，计算容量有大幅度提高，可达 300 万自由度规模，可用内存可达 16G。同时对于较大规模的题目，计算速度比 32 位时会有大幅度提升。



52



92万自由度，计算105阵型，质量参与系数70%，计算时间:32位时240分，其中生成基础上部刚度90分，64位时90分



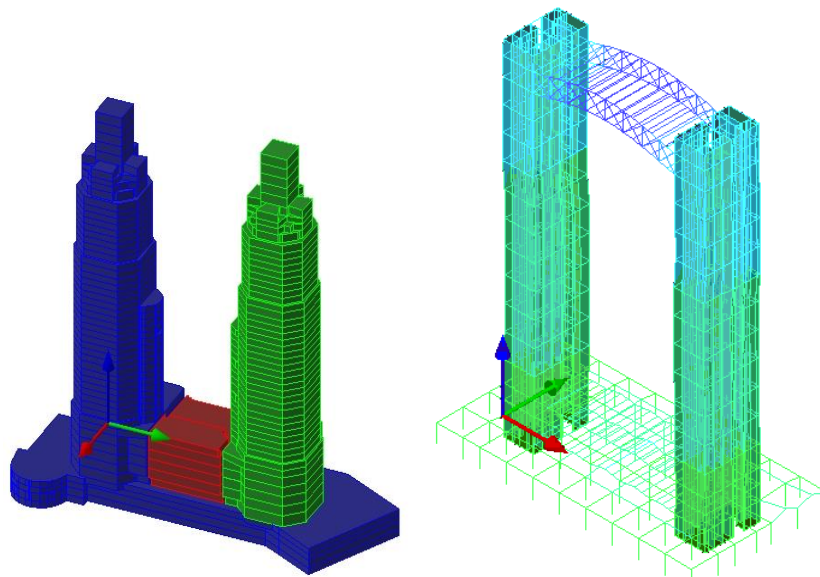
122万自由度，Ritz向量法，计算45阵型，质量参与系数93%，计算时间64位50分

4 荷载相关的 RITZ 向量法

YJK 软件中提供了 3 种精确的特征值的算法：子空间迭代法、Ritz 向量法和 Lanczos 法。YJK 结构分析软件在细胞解法的基础上充分考虑了多、高层建筑结构的特点，并从实际角度出发，对上述三种方法又做大量优化工作，使求解效率取得了极大的提升。

与 ETABS/Midas 等软件一样，YJK 软件同时提供了荷载相关的 RITZ 向量法，这种方法考虑了荷载的空间分布，并且忽略了不参与动态响应的振型，从而可以获得原系统方程的部分近似特征解。基于荷载相关向量的动力分析，可以忽略与荷载向量正交的不参与动态响应的振型，从而比使用相同数量的精确振型算法可能产生更精确的结果。这种算法对解决大型结构的动态响应问题的效率提高已经得到了很多工程的验证[Bayo and Wilson,1984， Wilson,Yuanand Dickens， 1982]。

对于较大规模的多塔结构，如 40 万自由度以上且各塔独立性较强时，或大跨的体育场馆结构、平面规模较大的结构、竖向地震作用计算等，有时即使计算的振型个数非常多也不能达到足够的质量参与系数。此时用户可以考虑选择 Ritz 向量法计算地震作用。



上图左工程为 3 塔，70 万自由度，普通法最多算 100 振型，有效质量系数 70%；改用 Ritz 向量法算了 45 振型，有效质量系数 90% 以上

上图右工程为上连体结构，采用竖向地震的振型分解法计算，用 Ritz 向量法算了 30 振型，有效质量系数 92%。

一般来说，使用 Ritz 向量法时也应尽量计算较多的振型个数，已达到较好的计算效果。如果 Ritz 向量法进行增加振型个数的计算后，其基底剪力与前次基本相同，则可说明计算精度已达到要求。

5 整体结构的屈曲分析

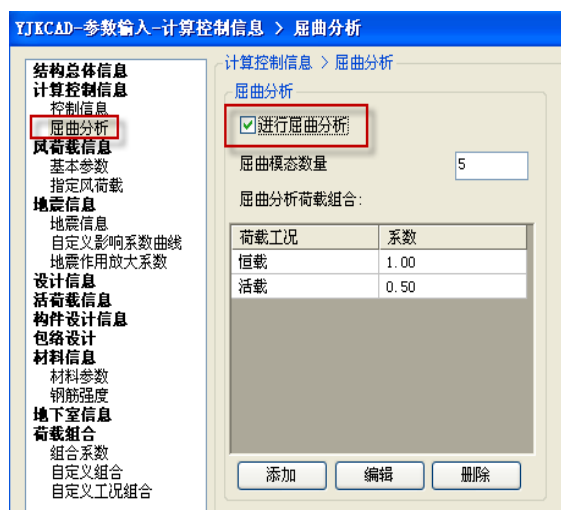
在 YJK 中采用了几何刚度矩阵与初始刚度矩阵分离的方式进行刚度管理，并且可以准确计算平面单元（膜、板、壳）的应力刚度，使得进行整体结构的屈曲分析成为可能。

YJKa 提供了整体结构的线性屈曲分析功能，可以计算得到各阶屈曲特征值（或荷载因子）以及屈曲模态。

1. 计算参数中增加“屈曲分析”页

屈曲荷载计算：

结构失稳（屈曲）是指在外力作用下结构的平衡状态开始丧失，稍有扰动变形便迅速增大，最后使结构发生破坏。数学上归结为广义特征值问题。YJK 软件通过对特征值方程进行求解，来确定结构屈曲时的屈曲荷载和破坏形态。根据特征值和对应的特征值向量，用以确定屈曲荷载和对应的变形形态。每一组“特征值-特征向量”为结构的一个屈曲模式。特征值 λ 称为屈曲因子，它乘以 r 中的荷载就会引起结构屈曲，即为屈曲荷载。



2. 屈曲分析计算结果输出

在 Wmass.Out 文件中的结构稳定计算结果之后增加屈曲计算结果的内容，输出各模态的屈曲特征值和屈曲因子。

```

*****
                        屈曲分析
*****
屈曲模态号   屈曲特征值   屈曲因子
      1         26.568         26.568
      2         32.457         32.457
      3         39.027         39.027
      4         51.499         51.499
*****

```

在设计结果的变形图下设置新的菜单“屈曲动画”，可以查看各个模态下的屈曲变形动画。

3. 新的钢结构设计规范需要计算出屈曲因子

新的钢结构设计规范 GB50017-2013 新增第五章：结构分析与稳定性设计，在 5.1.6 条：。应根据公式计算的最大二阶效应系数来选定适当的结构分析方法，3 个阶段： ≤ 0.1 ， $0.1—0.25$ ， > 0.25 ；公式 5.1.6-2：一般结构的二阶效应系数可按—整体结构最低阶弹性临界屈曲荷载与设计荷载的比值的倒数求得。

二阶效应系数即为屈曲因子的倒数。

6 考虑不同材料阻尼

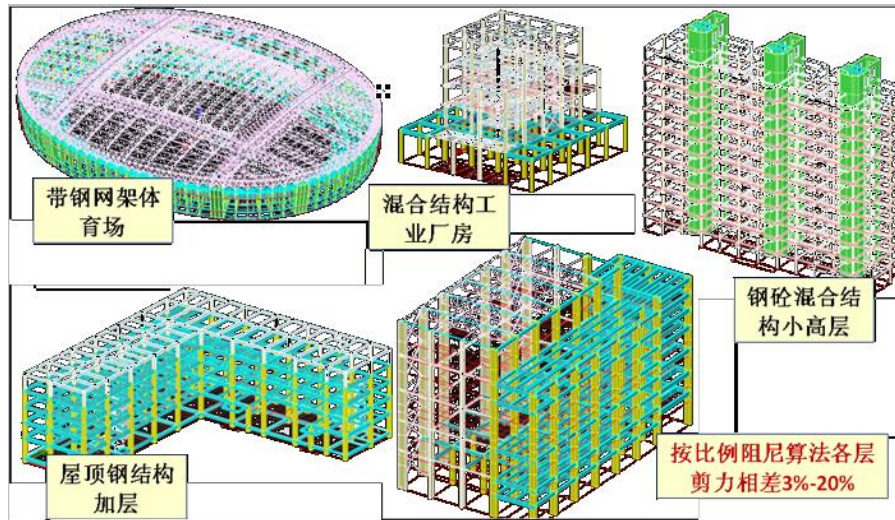
YJK 软件中除了支持全楼统一阻尼比外，还支持按照不同材料进行比例阻尼的计算。这种方法对混凝土主体结构和钢屋架的结构的计算尤为适合。与全楼折算估计 0.035 的简化方法相比，振型阻尼比方法可以有效的评估和反映不同杆件对不同振型的反映，能更准确的反映结构的地震响应。

在结构中使用不同的材料时，各单元的阻尼特性可能会不一样，并且阻尼矩阵为非古典阻尼矩阵，不能按常规方法分离各模态，需要使用基于应变能的阻尼比计算方法。

在 YJK 的反应谱分析中，基于应变能的各振型阻尼比的计算方法考虑不同材料的阻尼比，程序内部根据在“按材料区分阻尼比”中输入的各材料的阻尼计算各振型的阻尼比，然后构建整个结构的阻尼矩阵。计算方法与《抗震规范》10.2.8 条文说明中建议的应变能加权平均的方法一致。

结构阻尼比(%)		
<input type="radio"/> 全楼统一		5
<input checked="" type="radio"/> 按材料区分	钢	2
	混凝土	5
	型钢混凝土	4

图为在地震计算参数中的阻尼比选项，以及采用不同材料阻尼比的若干工程。



7 地震波库与自动选波

软件内置了近千条天然地震波供用户选择，减少时程分析找不到合适地震波的情况。

软件提供自动选波两种方式。自动选波方式会提供在“统计意义上相符”的多条地震波，减少用户手工选波的巨大工作量。

自动选波的原则如下：

(1) 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%。

(2) 计算结果在结构主方向的平均底部剪力一般不应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应小于 65%。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%。

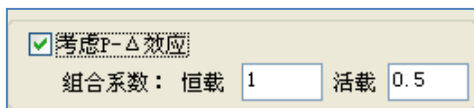
8 重力二阶效应

在普通高层建筑结构中，重力二阶效应主要体现在框架单元（默认只考虑柱和斜撑构件）以及墙构件。目前各个结构软件都是采用基于几何刚度的有限元法来进行重力二阶效应分析。但是在具体计算上有差异，主要是三个方面：1) 几何刚度矩阵计算；2) 竖向工况应力状态计算；3) 重力二阶效应的计算过程和方法。

几何刚度矩阵：1) 国内某软件没有给出墙（即壳元）的几何刚度矩阵，采用杆元的几何刚度矩阵；2) 国外软件中梁柱支撑等一维构件采用了杆元的几何刚度矩阵；国外有的软件的剪力墙采用了壳元的几何刚度矩阵，有的软件对板和壳不考虑；3) 只有 YJK 的一维构件采用了空间梁元的几何刚度矩阵，

能考虑弯曲的影响还能考虑构件偏心的影响，同时剪力墙采用了壳元的几何刚度矩阵。

竖向工况应力状态：1) YJK 采用了竖向恒活荷载计算和组合的结果，能较真实地反映构件的实际应力状态，而国内某软件直接取用了竖向构件的顶点质量；2) 国外软件由用户指定应力状态。



计算方法：几何非线性的的迭代求解方法，国外软件提供该方法，缺点是只能用于静力工况分析，而且耗时较长；非迭代的直接求解方法，计算速度快，适应静力和动力求解，而且求解精度在小变形情况下与迭代求解相当，YJK 和其它软件都提供该方法。

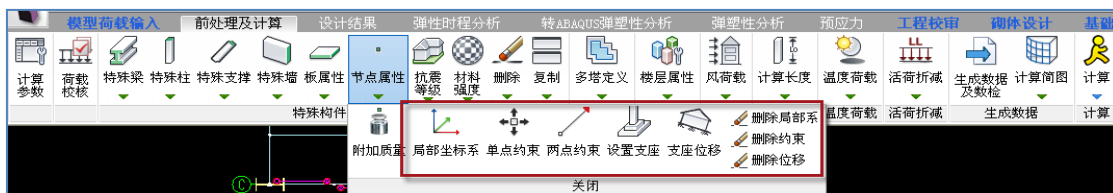
YJK 采用了计算精度较高的计算模型和计算效率领先的非迭代计算方法，保证了超大规模工程的重力二阶效应计算实用化。

在 YJK 软件中，对框架单元和墙元均准确计算其几何刚度矩阵(应力刚度矩阵)来计算二阶效应。在这种模式下，也可以进行结构的线性屈曲分析。

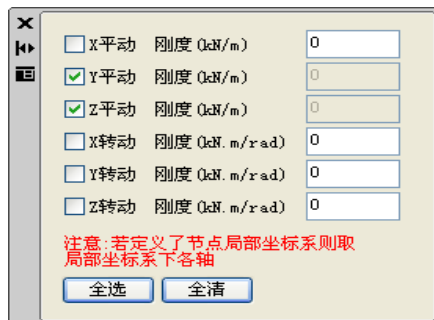
9 弹性连接

用户可以手工指定两点之间的弹性连接，可以定义节点 6 个自由度上的弹性刚度，可以支持各种复杂的弹性刚度形式，用来模拟滑动连接，滑动支座，减震隔震装置等。

在计算前处理的特殊构件定义时，用户可以手工指定两点之间的弹性连接，即可对节点 6 个自由度中的任何一个释放为 0，或者设置为指定的弹簧刚度，或者指定它的位移。比如设置 X 平动刚度为 0，就是释放了 X 向约束，就可以实现杆件在该节点的 X 向滑动。还可以支持各种复杂的弹性刚度形式，用来模拟减震隔震装置等。



菜单中的局部坐标系、单点约束、两点约束、设置支座、支座位移，以及删除局部坐标系、约束、位移是在节点上设置指定的弹簧刚度或者位移的操作。



这里的两点约束菜单的概念和操作与 Midas 中的处理一致。

YJK 中支持节点局部坐标系的指定。使用局部坐标系菜单指定局部坐标系后，其自由度方向按局部坐标系进行定义，与整体自由度之间以 MPC 关系处理。采用局部坐标系可以简单方面的处理特定方向的滑动支座。

设置支座菜单可对任意一层的杆端设置支座。

关于弹性连接更详细的说明见专门一节“设定节点的弹簧刚度或位移”。

10 经典膜单元 (QA4) 和改进型膜单元 (NQ6Star)

软件提供两种膜单元类型：经典膜单元 (QA4) 和改进型膜单元 (NQ6Star)。

软件一直以来采用的膜单元为经典膜单元，它的特点是带旋转自由度的精华非协调平面四边形等参，QA4，Allman 插值这种单元的详细力学模型说明可见陈万吉、龙驭球相关文章。

改进型膜元（又称为二次完备精细化非协调单元，NQ6Star），单元合成位移为：

$u(=u_q + u_\lambda) \in P(x, y)$ ，其中协调部分位移采用通用的双线性位移差值函数，而非协调部分内位移采

用了耦合型非协调函数，基函数为 $[\xi^2 \quad \eta^2 \quad \xi^2\eta \quad \xi\eta^2 \quad \xi^2\eta^2]$ ，为满足 PTC 的单元位移要求，又进

一步运用了非协调函数一般公式修正了非协调部分位移， $u_\lambda^* = (N_\lambda - N^*P_\lambda^{-1}P_\lambda)\lambda = N_\lambda^*$ 。

NQ6Star 单元的转角自由度比较完善，对于非规则四边形单元也可得到较合理的应力分布，可明显减少经典膜单元计算转角位移结果与理论值存在的较大误差。使用经典膜单元时，为保证梁与墙位移的合理传递，软件采用了罚约束关系进行协调。在采用改进膜单元时，软件会自动去掉这类罚约束关系。

由于单元的优良性质，在温度应力计算、边框柱与剪力墙的内力协调分配、弧形墙与梁协调等方面，计算结果更加合理。温度应力的计算可与 Etabs 计算结果接近。在计算温度荷载、边框柱结果不合理、或者弧墙数量较多时可考虑选用改进型膜单元以改进计算结果。

