



盈建科软件
YJK Building Software

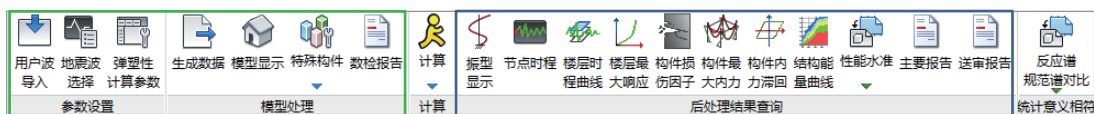
YJK 弹塑性分析软件

YJK-EP&YJK-Push

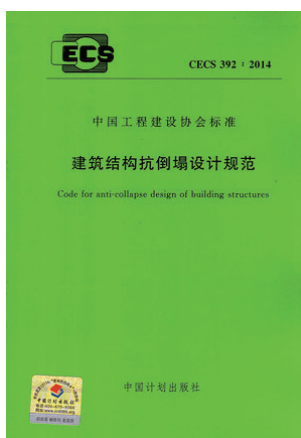


01 便于普及应用的弹塑性时程分析软件

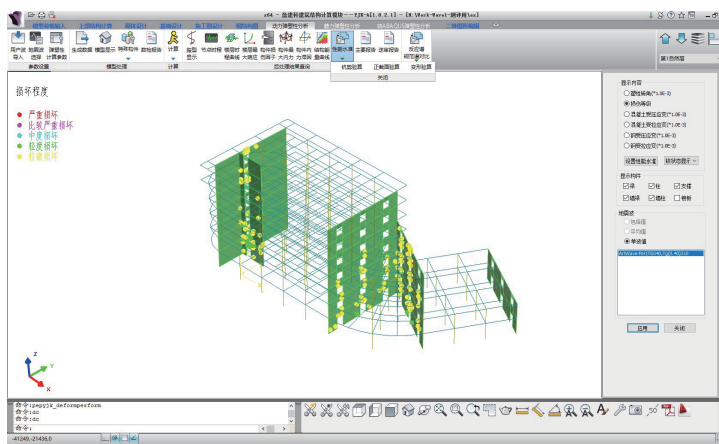
操作简便、计算效率高、求解稳定、输出结果丰富，学习成本低，依次点击模块各菜单即可完成弹塑性时程分析送审报告。



- ★ 实现YJK上部结构数据无缝转换，施工图级的钢筋处理，含钢板墙，型钢组合构件；施工图中修改钢筋后，直接读取修改后钢筋。
- ★ 采用隐式算法，硬件要求低，设计院常用的电脑即可顺利完成计算。计算效率高，通常比现有同类软件快数倍到十几倍。
- ★ 自动化程度高。内置丰富的天然地震波与人工波库，自动选出符合规范要求的弹塑性分析所需地震波；可同时计算大震弹塑性和大震弹性，并给出对比曲线；多条波一次启动连续计算，自动取包络或平均。
- ★ 依据《建筑抗震设计规范》第3.10.4条条文中建议方法，计算输出结构弹塑性位移角。
- ★ 提供有据可依的构件性能评估指标。性能水准菜单变形验算中，依据《建筑结构抗倒塌设计规范》CECS 392: 2014中提供的基于应变的地震损坏等级判别标准，以塑性铰分布图的形式输出损坏等级判定结果，见图 1。



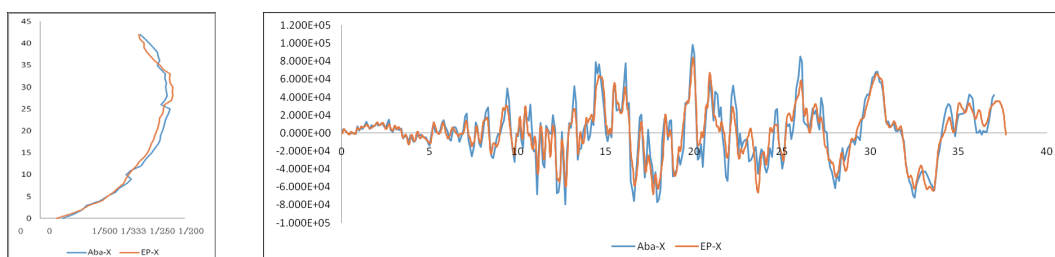
a、依据标准



b、损坏等级

图 1 损坏等级依据标准与结果输出图

- ★ 复杂工程分析能力强。不仅能适应减震、隔震元件结构弹塑性时程分析，而且能适应其它软件难以妥善解决的大跨屋盖空间结构和多塔楼结构的弹塑性时程分析。
- ★ 提供ABAQUS接口转换程序，通过YJK-ABAQUS接口将模型转入ABAQUS中，并与其计算结果进行了大量对比，对比说明YJK-EP结果合理可靠，如图 2。



a、各层位移角对比

b、基底层剪力时程对比

图 2 YJK-EP 与 ABAQUS 对比效果图

- ★ 自动生成工程弹塑性送审报告模板，见图 3。

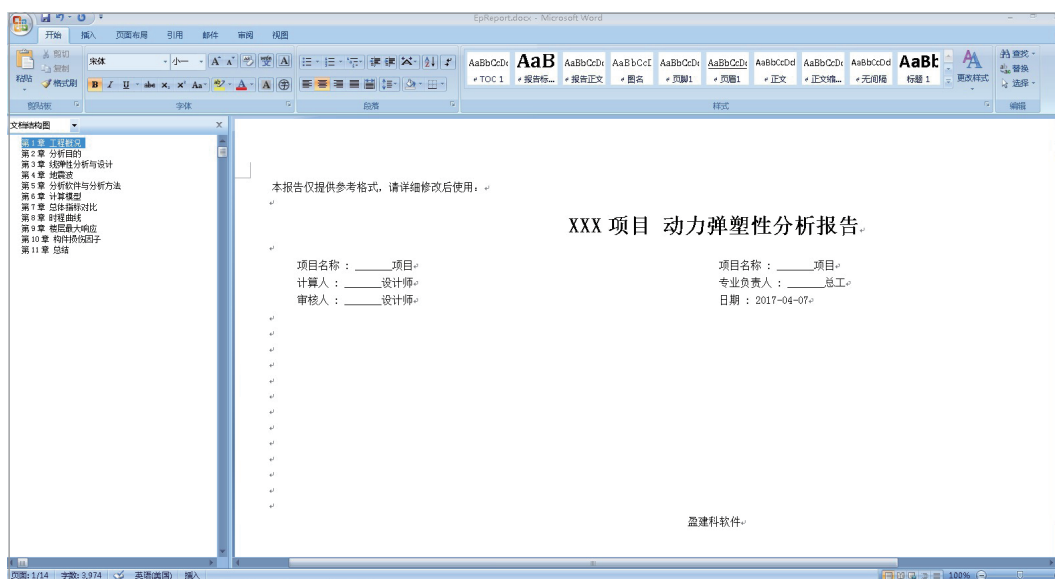


图 3 弹塑性送审报告模板图

1.1方便快捷的前处理

可快速准确导入安评地震波或者其它软件格式的地震波，可直观查看各周期点的波反应谱与规范谱值及两者差别。模型显示信息全面，具备分组显示模型信息功能，查看方便，如图 4。

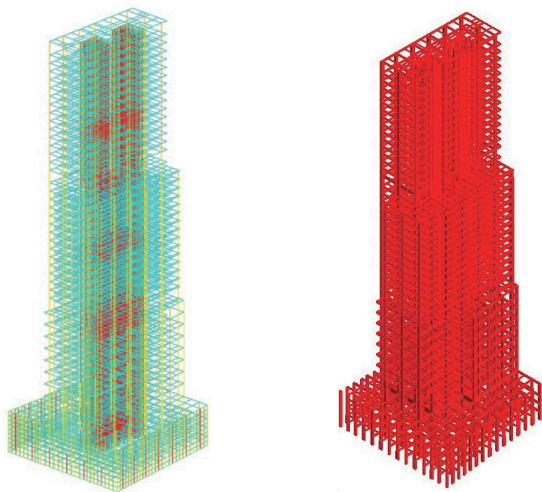


图 4 完备的分组模型显示功能

梁、柱、斜撑杆件的钢筋采用离散的钢筋模拟，每根钢筋在截面上的位置按施工图中数值进行定位，可以考虑一个梁跨内不同区段的截面钢筋配置数量的不同，如下图所示。墙体边缘构件采用箱型钢柱模拟，边缘构件的形状与布置同施工图中实配结果可保持高度一致。修改钢筋将直接影响该构件的承载力结果。

可在EP模型显示菜单中直观的查看钢筋分布，如图 5，目前市面其它软件的计算模型尚未见达到过如此精细程度。

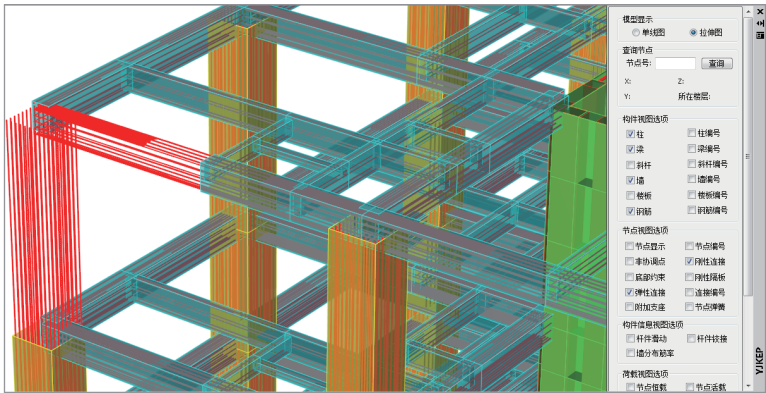
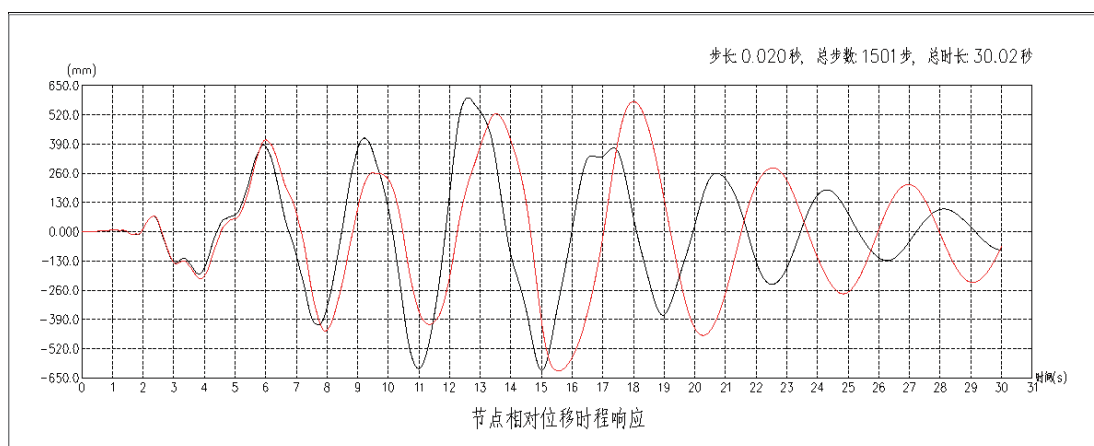


图 5 隐藏梁、柱混凝土后的钢筋纤维图

1.2后处理输出弹塑性时程分析最为关注的指标

同时输出大震弹性与弹塑性节点时程、楼层时程曲线等结果，通过弹性与弹塑性曲线相位与峰值的对比，了解结构的刚度退化等性态，如图 6。



绝对值最大点对应时刻与数值统计

YJKEIs25582号点X向: -616.75 YJKPIs25582号点X向: -618.27

图 6 时程曲线图

可查看关键构件（含耗能减震单元）在各地震波激励时刻的内力和位移对应关系图—滞回曲线图。从图中可以了解到关键构件的受力状态（耗能减震单元的屈服程度和耗能状况）。

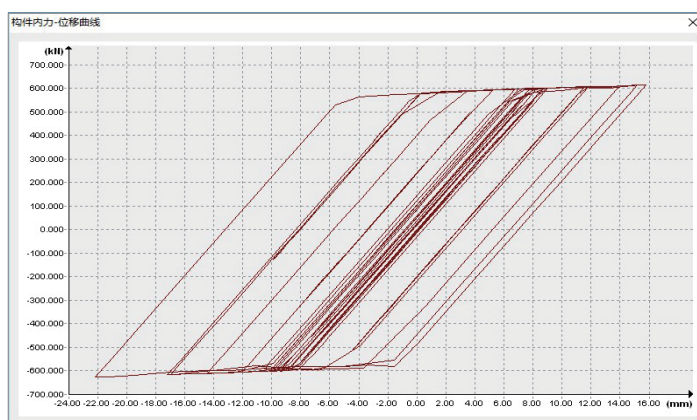


图 7 构件内力-位移滞回曲线图

同时输出大震弹性与弹塑性各层位移、位移角、层剪力包络曲线，通过曲线对比，找出结构薄弱层。层剪力包络曲线中同时给出小震CQC基底剪力结果，通过与大震结果对比可评判计算结果的合理性，如图 8。

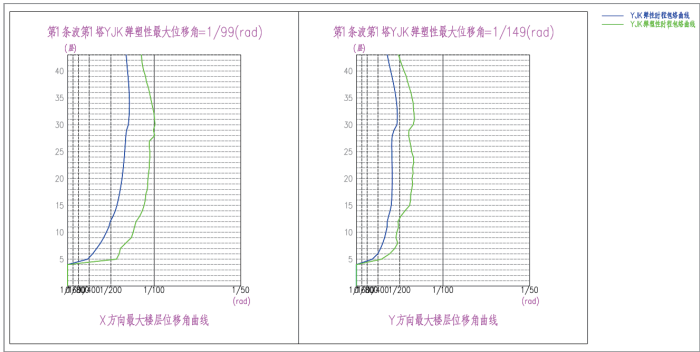
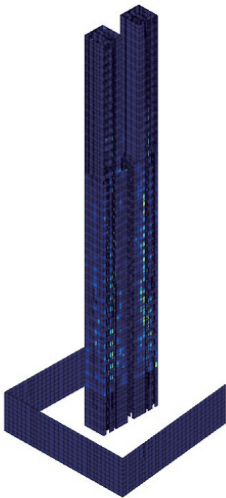
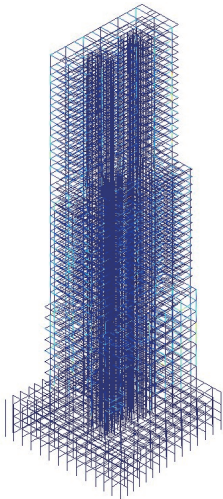


图 8 各层包络曲线图

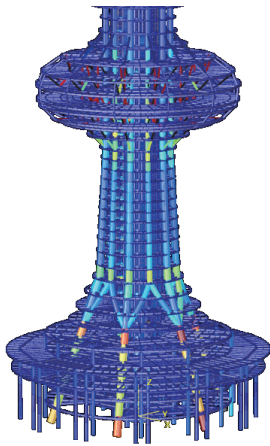
既可显示整个地震持时的结构损伤（变形）动画，也支持显示指定时刻梁、柱、斜撑构件的受拉、受压损伤演化参数和墙的损伤因子。既可分别查看构件各组成部分—混凝土、钢筋、钢筋层、型钢的损伤，也可查看截面综合损伤，还可通过实体拉伸方式或切片功能取出局部构件进行损伤查看，如图 9。



a、墙体受压损伤图



b、框架受压损伤图



c、实体拉伸显示受压损伤图

图 9 各类损伤图

多条波的结果画在同一张图上，是很多设计院喜好的报告方式，如图 10，提供各层最大结果与损伤因子的多波包络与平均功能，可以：

- ★ 直观快捷的查阅到位移角等最大的地震波。
- ★ 一次性算了多条波时，可以方便的选择其中7条做个平均值计算，从而“挑选”出满意的7条波作为报告用波组。

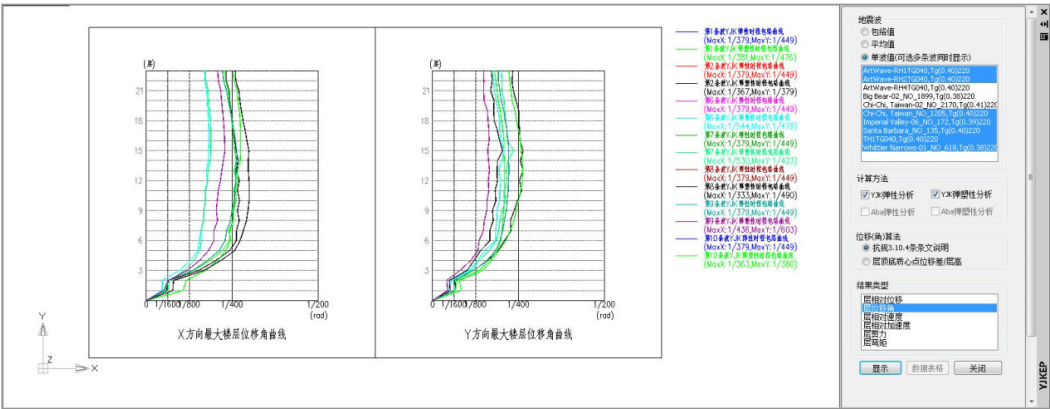


图 10 多条地震波各层最大响应图

02 采用国际通用的建筑结构非线性求解算法

动力方程组采用隐式求解算法，杆件单元构造采用柔度法纤维束单元理论。隐式算法+柔度法纤维束单元组合为目前最理想的建筑结构杆件部分的非线性求解模式。国内外学者和资深工程师均已认可，见下表。

序号	作者	文献
1	ENRICO SPACONE FILIP C.FILIPPOU	FIBRE BEAM-COLUMN MODEL FOR NON-LINEAR ANALYSIS OF R/C FRAMES: PART I. FORMULATION
2	黄宗明, 陈滔	基于有限单元柔度法和刚度法的非线性梁柱单元比较研究
3	滕军, 李祚华著	复杂高层结构非线性抗震性能分析和设计方法

传统的非线性梁柱单元计算方法有两种，分别是刚度法纤维束单元和塑性铰单元。但二者在不同方面各有优劣。

刚度法纤维束单元

优点：采用通用有限元理论。截面被剖分为纤维束，每根纤维都会根据规范提供的有限元应力—应变本构来详细计算。

缺点：此方法由于需要位移形函数假定，在强非线性下形函数所能描述的变形空间与真实变形相差甚大，导致计算的构件承载力往往大于规范结果和手算结果，很难算出梁端出铰的效果。

塑性铰单元

优点：使用者有丰富经验时，不会过高计算构件的承载力。

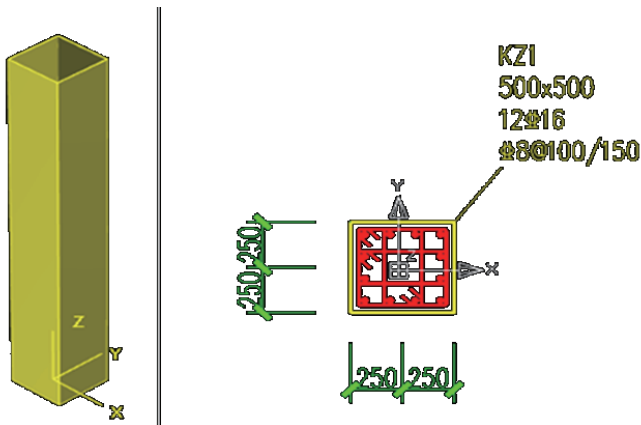
缺点：为了计算出梁端出铰的效果，需要提前假定塑性铰的位置、构造塑性铰的曲率—弯矩曲线等。不属于通用有限元的做法。人为主观因素较多，对于混凝土材料也很难准确考虑轴力和两向弯矩的耦合。其通用性和适应性有待考察。属于早期手算用的集中塑性铰模型。

可见，上述两种方法尽管各有优点，但各自的缺点都很严重。为了解决该问题，我们在YJKEP中开发了柔度法纤维束梁单元，该方法针对上述两种方法扬长避短，其优缺点如下：

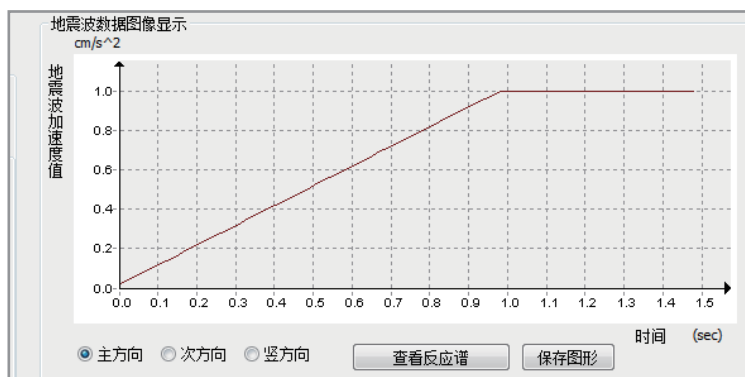
优点：采用通用有限元理论，截面需要剖分纤维束，从规范的材料应力—应变本构关系出发详细计算；不再需要位移形函数假定，避免了形函数带来的变形局限，不会高估构件的承载力，其计算出的承载力结果与规范算法的结果具有高度一致性；抛弃了集中塑性铰的假定，可根据材料本构关系计算出构件内部真实的塑性分布；可以准确考虑轴力和两向弯矩的耦合；不需要用户人工干预指定塑性铰的位置及其弯矩—曲率曲线，降低了对使用者的设计经验需求，大幅度降低使用者的工作量。

缺点：由于通用有限元普遍的做法是生成单元刚度矩阵，所以柔度法纤维束单元与有限元普遍做法框架下的对接较为困难，单元内部需要迭代，编码难度较大，计算量增大。

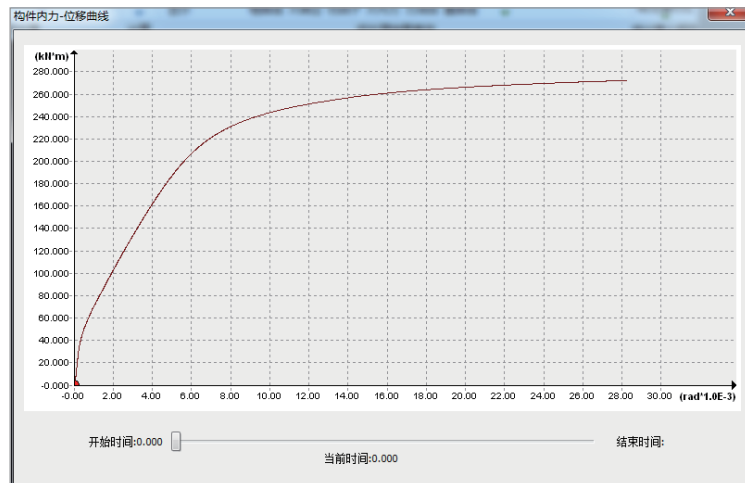
以下通过单根悬臂柱模型计算效果展示以上算法的特点。单根柱子施工图的实际配筋图如下。



采用不断增大的斜坡荷载函数对柱顶加载。



求得构件的峰值承载力后，通过内力滞回曲线查看其最大承载能力如下图。



可将YJKEP计算的柱极限承载能力与施工图模块中构件的正截面承载能力输出结果进行互核。不考虑抗震调整系数后的弯矩承载力为： $359.10 \times 0.75 = 269.25 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ，与YJKEP滞回曲线中输出结果非常接近。增加柱实配钢筋后重新计算，可得到该柱新的承载力结果。



混凝土强度等级: C30

钢筋的混凝土保护层厚度: 20mm

B 边纵筋: 4 Φ 16

H 边纵筋: 4 Φ 16

B 边箍筋: Φ 8@100/150(4)

H 边箍筋: Φ 8@100/150(4)

重力荷载代表值产生的轴向压力: -20.63kN

正截面承载力计算的承载力抗震调整系数 γ_{RE} : 0.75

柱 X 轴正截面抗震受弯承载力: $M_{cux} = 359.10 \text{ kN} \cdot \text{m}$

柱 Y 轴正截面抗震受弯承载力: $M_{cuy} = 359.10 \text{ kN} \cdot \text{m}$

斜截面承载力计算的承载力抗震调整系数 γ_{RE} : 0.85

柱斜截面抗震受剪承载力: $V_{cux} = 680.31 \text{ kN}$

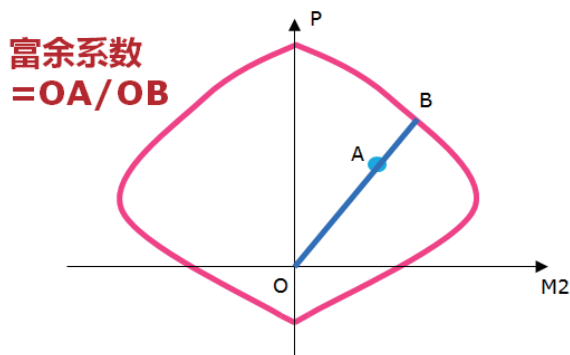
柱斜截面抗震受剪承载力: $V_{cuy} = 680.31 \text{ kN}$

03 构件屈服状态评估利器—PMM曲面图

通过软件提供的构件内力滞回曲线功能，可选取重要构件的轴力-弯矩耦合内力结果进行查看。地震波经历的各个时刻的轴力P、弯矩X与弯矩Y以散点图的方式绘制于三维的图上，与按构件实际配筋与材料标准值计算的三维屈服面进行比较。

定义了富余系数，如下图。通过富余系数可以查看构件所经历的效应点到曲面的距离，以了解构件的承载力安全储备程度。

可通过以下两个方面对上述功能进行了解。

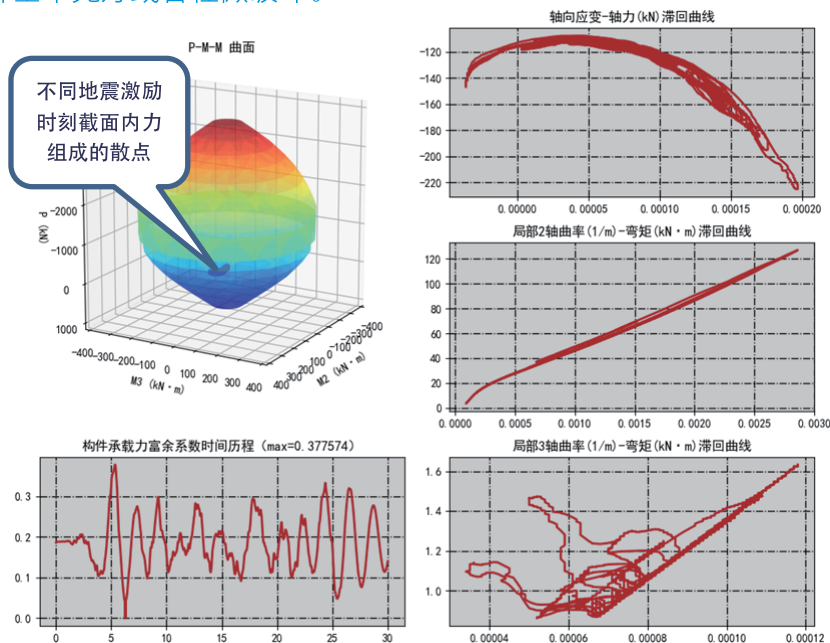


3.1 保持梁构件截面和配筋不变，研究不同地震水准下的反应

小震水准地震激励

- ★ 梁的局部2轴弯矩曲率为弯矩曲线未出现明显耗能环，基本保持弹性水平
- ★ 弹塑性分析时，构件在每个时间步真实达到的受力状态，均以散点的形式画在了P-M-M曲面内，可以看到散点距离P-M-M曲面边界还较远，构件承载力富余系数程序也给出了量化结果，当前构件为0.378。

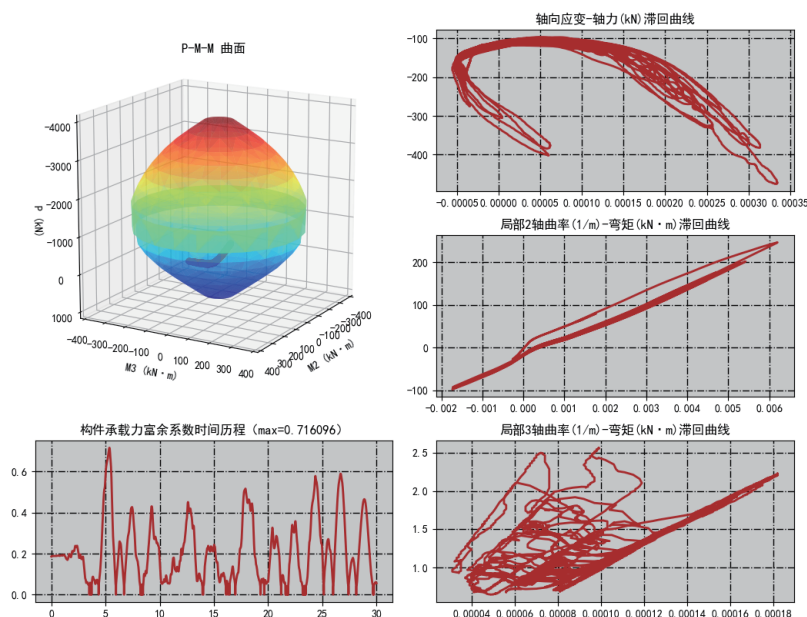
说明构件基本完好或者轻微破坏。



中震水准地震激励

- ★ 梁的局部2轴弯矩未超过极限承载力并出现明显下降
- ★ 构件承载力富余系数达0.7。

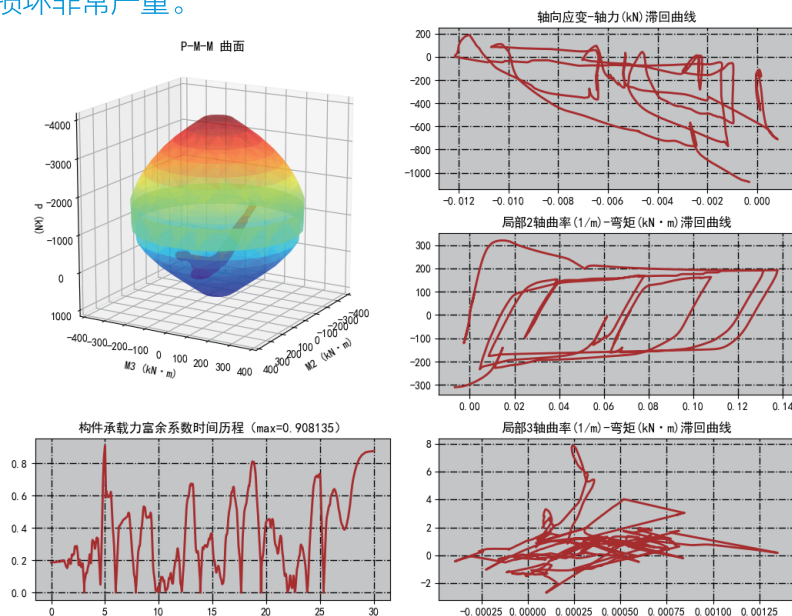
说明梁构件内力曾达到70%左右承载力，可以界定为轻微/轻度破坏。



大震水准地震激励

- ★ 梁的局部2轴弯矩已经超过极限承载力并出现明显下降
- ★ 构件承载力富余系数已达0.9。

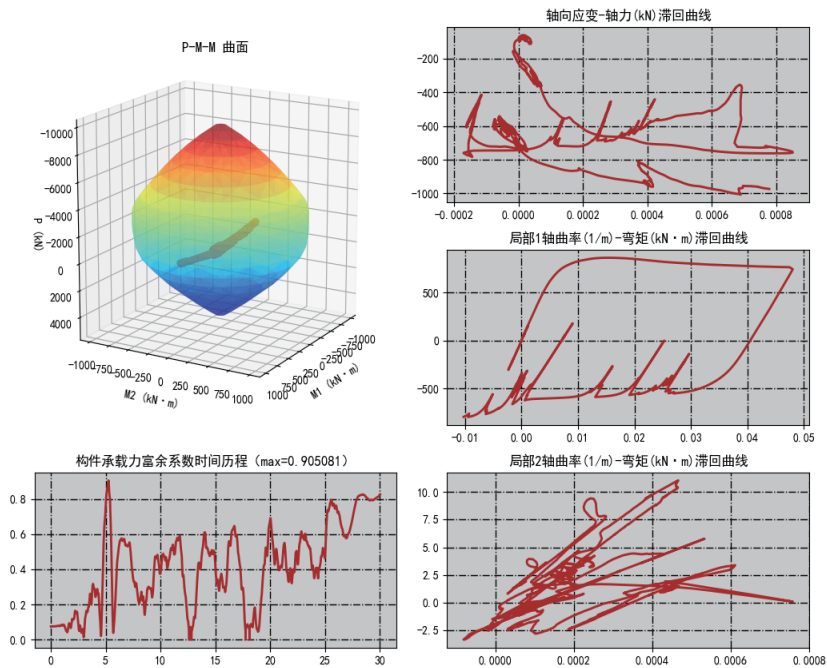
说明梁构件损坏非常严重。



3.2 构件补强后大震水准地震激励下的反应

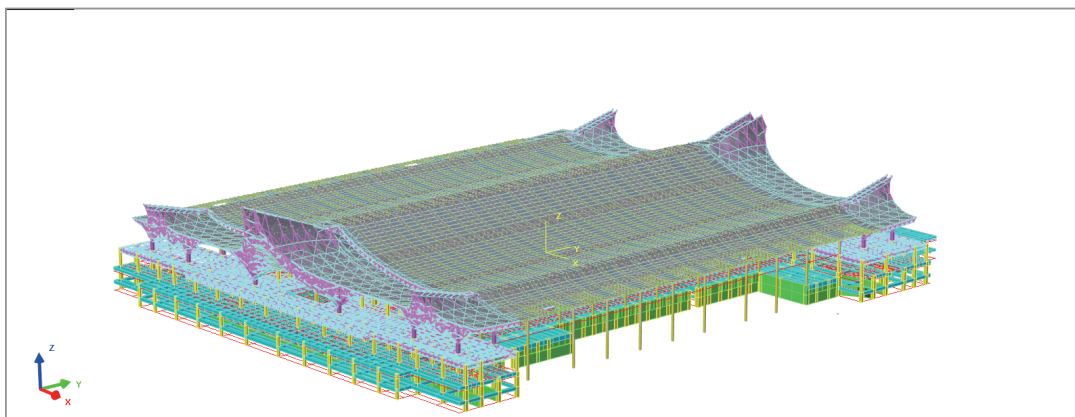
构件通过增加工字钢补强后（也可在施工图中增加钢筋）。承载能力得到了提高，大震下梁构件滞回曲线也表现出了钢的特性。

- ★ 梁的局部2轴弯矩承载能力从300多 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 提高到了 $862\text{kN} \cdot \text{m}$
- ★ 构件承载力富余系数仍达0.9以上。但相对于补强前0.14的曲率，现在构件的变形小了许多（曲率为0.05）。

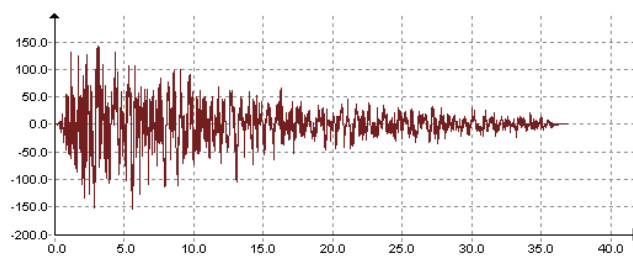


04 能胜任大跨屋盖空间结构和多塔楼、上连体结构的弹塑性时程分析

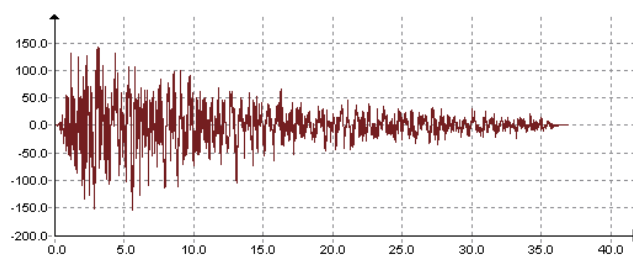
大跨屋盖空间结构



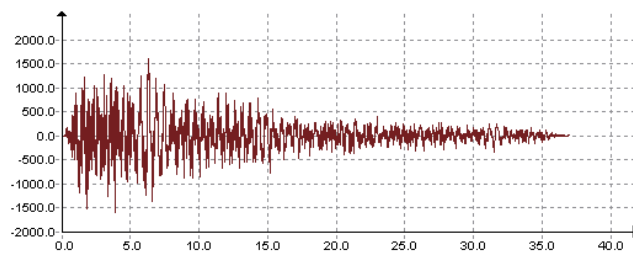
支持采用含竖向地震波的三向地震波输入：



X向输入



Y向输入



Z向输入

计算完成后输出垂重比等指标，方便审查专家和工程师对结果进行合理性判断。

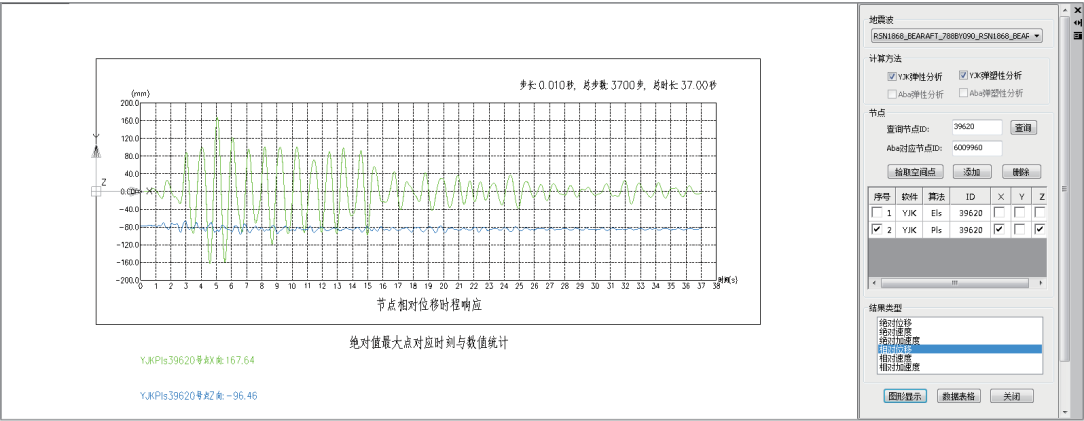
3682	0.102E-01	0.182E-02	0.200E+00
3686	0.102E-01	0.182E-02	0.200E+00
3690	0.102E-01	0.182E-02	0.200E+00
3694	0.102E-01	0.182E-02	0.200E+00
3698	0.102E-01	0.182E-02	0.200E+00
3700	0.102E-01	0.182E-02	0.200E+00

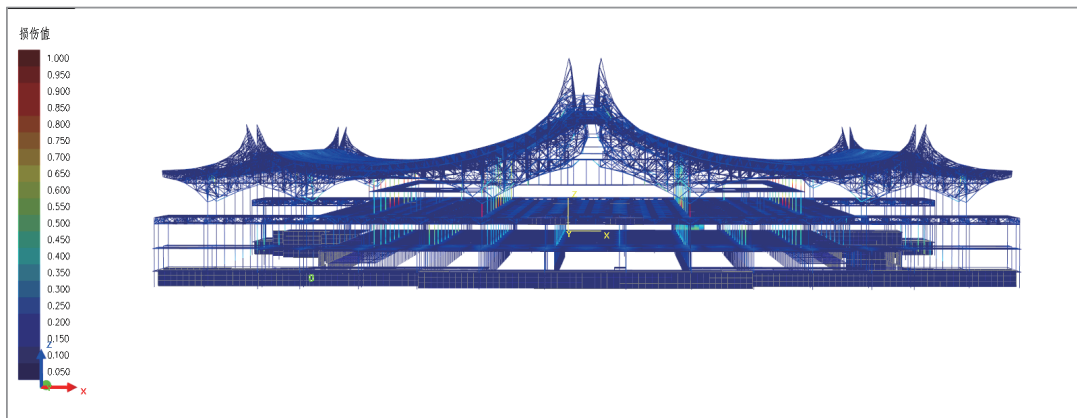
非线性时程计算正常结束

层号	X向楼层剪重比	Y向楼层剪重比	Z向楼层垂重比
1	0.146	0.099	0.921
2	0.183	0.123	1.152
3	0.197	0.096	1.173
4	0.238	0.102	1.183
5	0.381	0.150	1.170
6	0.468	0.189	1.181

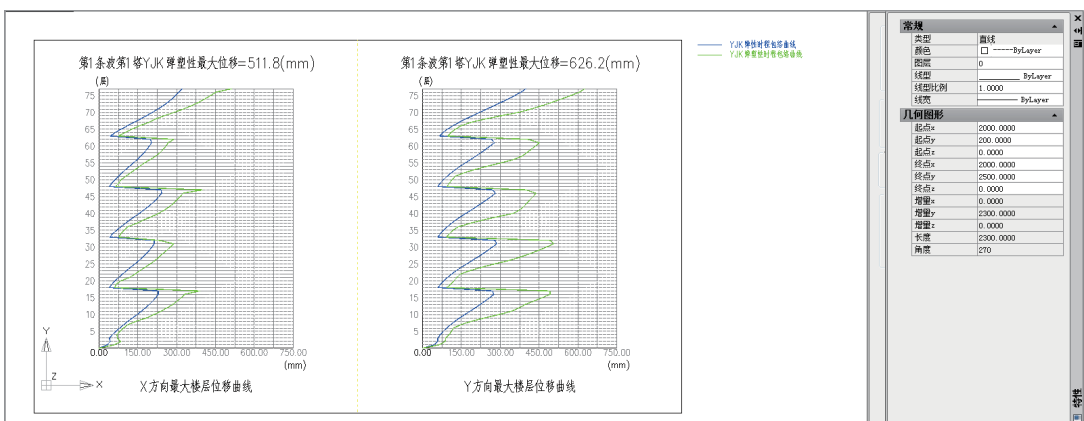
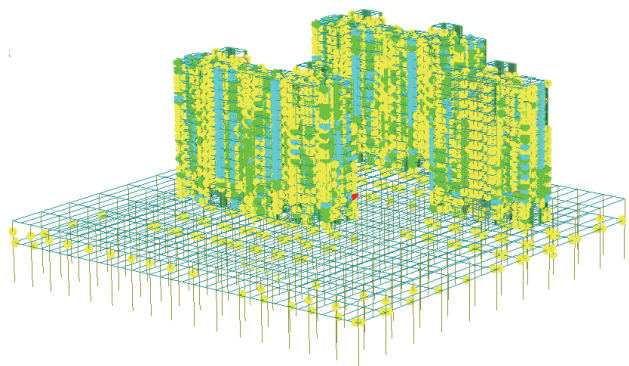
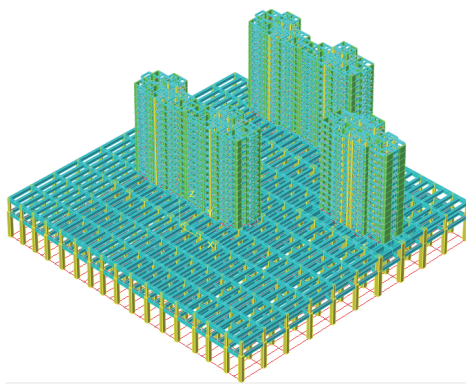
结束时间 2017.08.16.02.50
Cpu共计用时 2849分 4秒
实际共计用时 517分13秒
V1.8.2.3

下图为顶层节点X与Z向弹塑性位移时程曲线。从图中可以看到，Z向位移幅值明显要小，并且由于继承了重力荷载代表值作用下的效应，开始时刻就有向下80mm左右的偏移。

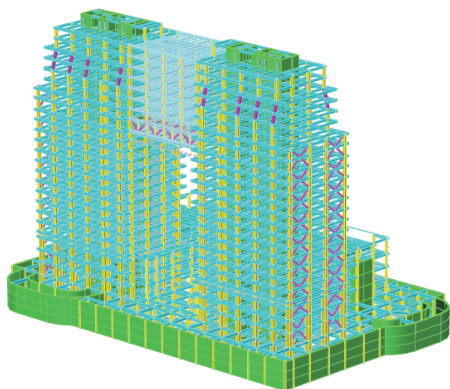




某带转换层5塔楼复杂多塔结构



上连体多塔结果分析结果展示



第1条波第1塔YJK弹塑性最大剪力=54679.0(kN)

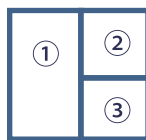
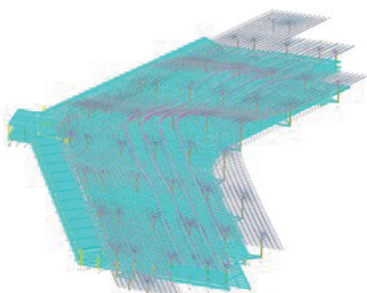
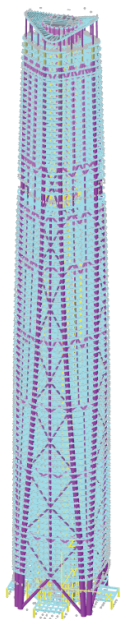


(上部结构弹性反应谱法CQC基底剪力: 39857.15kN)

05 提供减震隔震项目全地震水准的分析与解决方案

在通用有限元软件中，虽计算功能强大，单元库丰富，但建立带减震/隔震元件模型，需要定义单元，截面，本构曲线等一系列参数，过程复杂，且非常容易出错。而在传统的专业建筑结构分析软件中，有效刚度/有效阻尼等设计参数需要手工做多次迭代，操作繁冗。

而这些在YJK中已得到较好的解决。既能快速建模，也能采用反应谱法进行配筋设计或性能设计，也可采用FNA时程分析方法、直接积分方法对结构进行中大震动力计算及性能评估，呈现一个不同水准的一体化分析与解决方案。已在众多的实际减震/隔震项目中得到了成功应用。



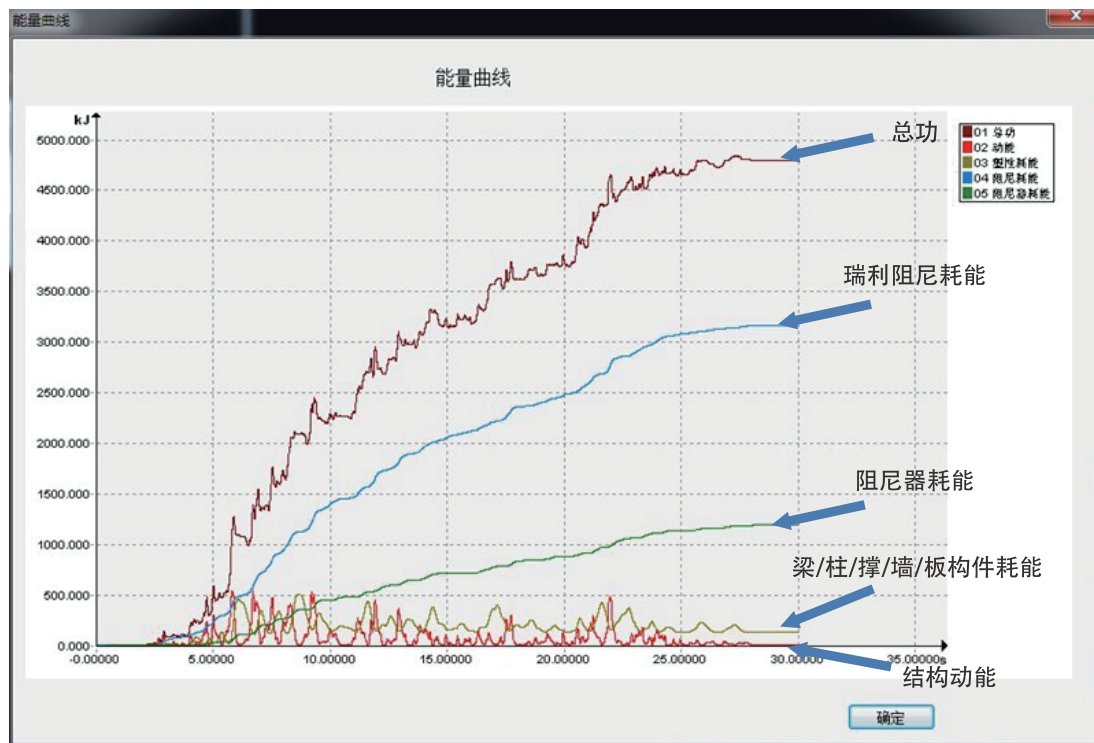
塔楼通过隔震支座与裙房完全隔开

剪力墙筒体结构电梯间与裙房分离，底部与基础间设置隔震支座隔开

- ① 400m+超高层减震工程，在这个工程当中，屈曲约束支撑与速度型阻尼器同时使用
- ② 某机场项目，整个机场模型底部采用隔震支座与上部结构隔开
- ③ 某多塔双隔震层复杂超限结构

支持位移型BRB减震器、速度型阻尼器以及隔震支座的快速建模输入。软件还内置了部分减震器产品库，可以通过选择产品型号快速完成建模。

建模完成后，可以通过强制解耦法或能量法完成反应谱法分析与设计。尚可利用软件的直接积分法自动计算减震/隔震构件的有效阻尼和有效刚度，并可将有效阻尼和有效刚度自动返回反应谱法分析模型。设计完成后可直接将前续结果一键式导入大震模块进行弹塑性时程分析，通过能量曲线对比分析消能减震效果等，如下图。



若干减震隔震实例

06 创新的可基于弹塑性计算结果进行性能目标量化设计的软件

现下常用的大震下弹塑性时程分析方法，计算结果仅停留在查看结构总体变形，构件的屈服或损伤程度，塑性铰弹塑性滞回曲线等，对结构设计起不到较好的指导作用。

本软件可涵盖小震、中震及大震设计内容，作为对现行设计方法—仅考虑小震分析及构造要求设计方法的改进，供量大面广的一般建筑和超限建筑设计采用：

- ★ 对计算结果不仅仅停留在查看结构总体变形和构件的损伤程度；
- ★ 将大震计算结果用于截面配筋设计，通过设置不屈服项，可对不屈服构件进行截面配筋验算，把大震不倒设计落到实处；
- ★ 引入FEMA破坏状态的判别和变形验算方法（如图 11），进行不同性能水准的变形验算，比常规损伤判断概念更加明确。

性能水准	2	3	4	5
塑性铰区塑性转角	0.003	0.006	0.01	0.015
边缘混凝土压应变	0.005	0.007	0.009	0.012

性能水准	2	3	4	5
钢筋平均拉应变	0.003	0.006	0.009	0.012
钢筋最大拉应变	0.005	0.01	0.02	0.035

图 11 软件内置各类变形指标及其性能水准限值图

目前软件能完成基于性能目标的抗震设计与评定，此功能与规范二阶段设计及性能设计指导思想结合紧密。对于可屈服的构件/项次，输出塑性转角与混凝土压应变及钢筋拉应变等，并自动与既定的各性能水准变形限值进行比对，以不同颜色区分显示。对不屈服构件/项次，采用弹塑性分析内力进行承载力设计，给出抗剪、抗弯等配筋设计及验算结果，并可自动与小震弹性结果进行包络（整个流程如图 12）。

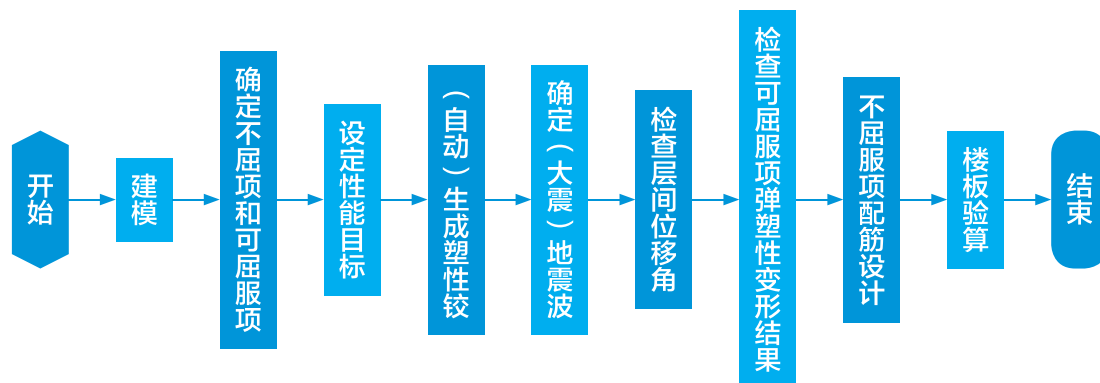


图 12 性能设计流程图

在特殊构件菜单中可完成指定关键构件、楼板切割线及屈服项/不屈服项三部分工作。指定成关键构件的杆件可以通过后处理中“构件内力滞回”菜单查看构件内力-位移滞回曲线；选取弹性楼板薄弱部位作为楼板切割线；软件内集成了专家经验，可依据经验对各种结构体系快速指定屈服与不屈服构件/项次，通过修改构件不屈服项功能可单个或者批量修改是否可屈服属性，如图 13、图 14。计算完成后自动求取楼板切割线和不屈服项对应的最大目标组合内力并进行设计及验算，通过后处理中“性能水准”菜单查看结果，省去了同类软件需通过塑性铰分量输入去实现可屈服与不屈服等繁琐操作。

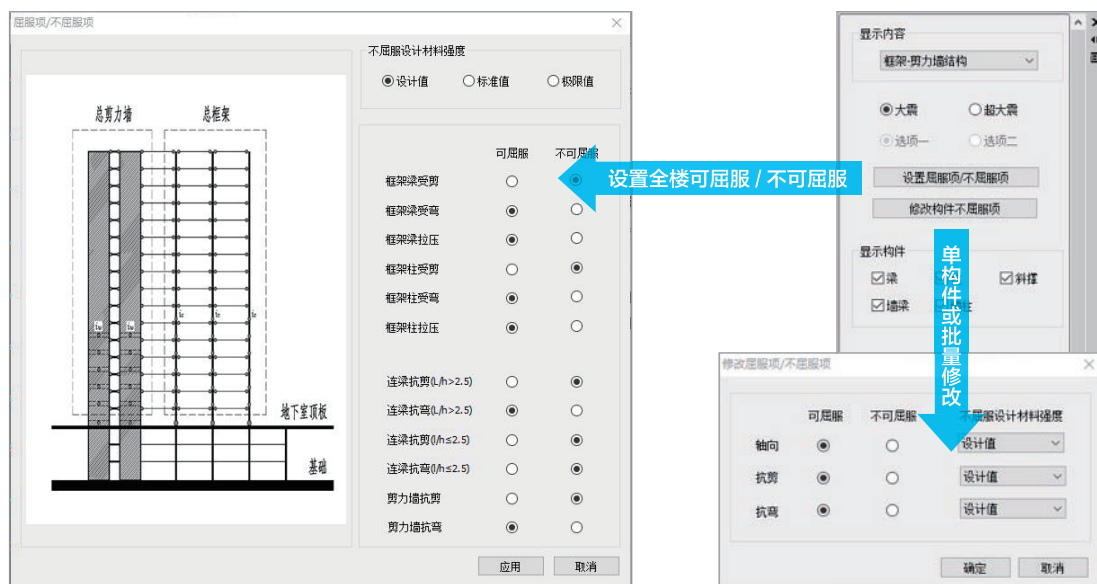


图 13 屈服项与不屈服项指定及修改图

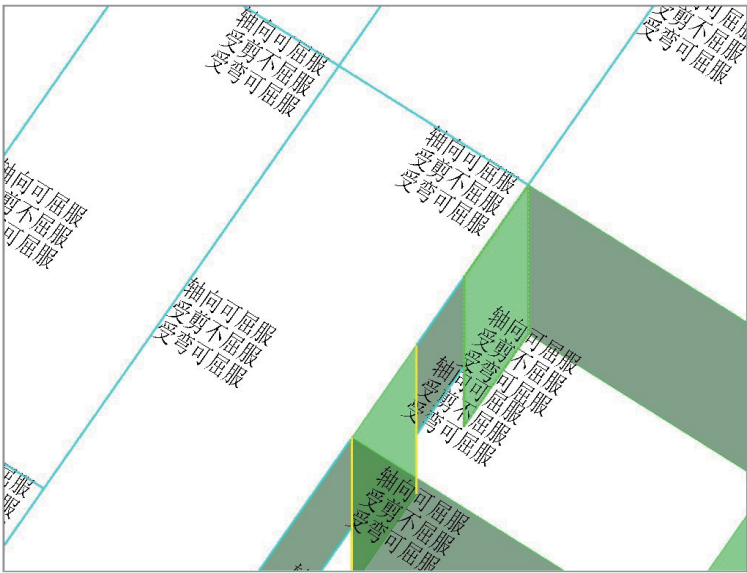


图 14 屈服项与不屈服项显示与查看图

通过性能水准菜单可查看不可屈服项按弹塑性内力做完承载力配筋设计及验算的结果，含受剪钢筋面积、剪压比、正截面受弯钢筋面积等。对于可屈服的项次，可查看塑性转角、混凝土受压应变、钢筋拉应变等（与各性能水准对应的限值进行比较后，以数值加颜色的方式显示构件的性能状态，如图 15）。

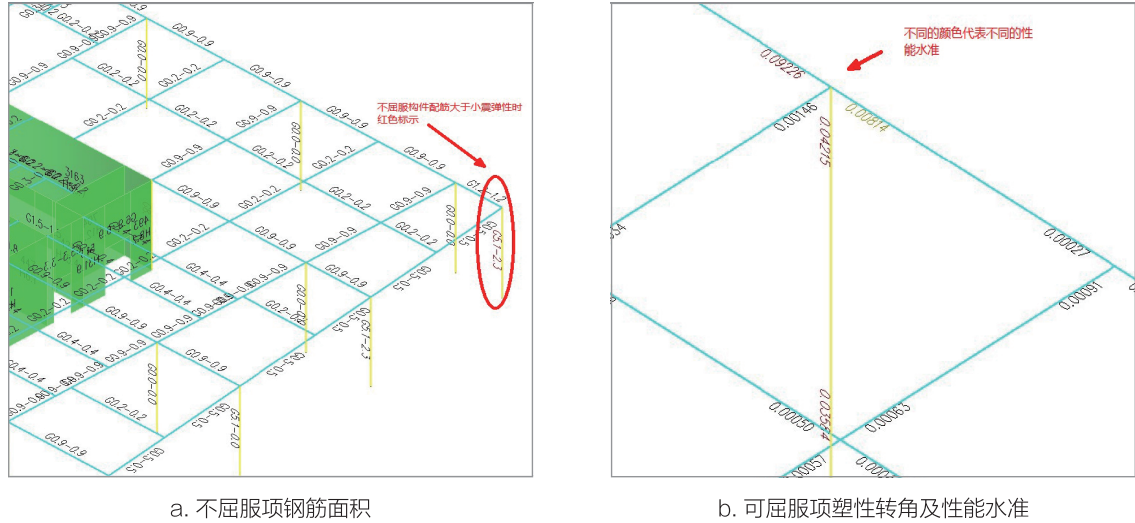
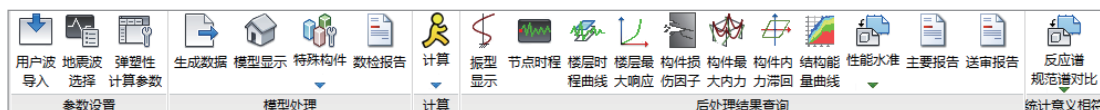
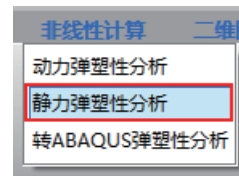


图 15 性能水准输出结果图

07 同时提供静力弹塑性分析 PushOver 软件

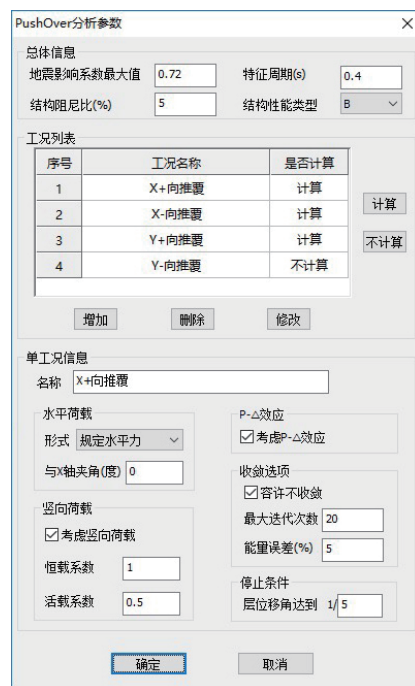
静力弹塑性分析模块功能设置如下图所示，同样具有界面功能分区清晰、操作简便的特点。



本产品有以下两方面应用亮点

★ 自动实现常用分析工况的指定

对于初入这个分析领域的用户，内置常用的分析工况是非常有必要的。静力弹塑性分析不是采用地震波的方式，而是采用等效于地震波作用的侧向荷载，荷载的选取方式对计算结果影响在某些情况下是非常明显的，故将常用的荷载形式内置并且作为默认值自动指定，是有指导和参考意义的，也省去了设计师指定分析工况参数等繁冗工作。



★ 输出内容全面丰富

包含能力曲线、需求曲线、最大层剪力等内容输出。性能点信息输出包含前述两曲线交点图位置及交点处的剪力、位移、谱加速度和谱位移，附带输出便于对结构性能做出判断的等周期线和谱曲线族。为了适应不同用户习惯，谱曲线输出同时提供国外软件（谱位移-谱加速度方式）和国内软件（周期-谱加速度方式）所采用的绘制方式，如图 16、图 17。除此之外还输出了性能点处的位移角、塑性铰分布及其状态等，如图 18。

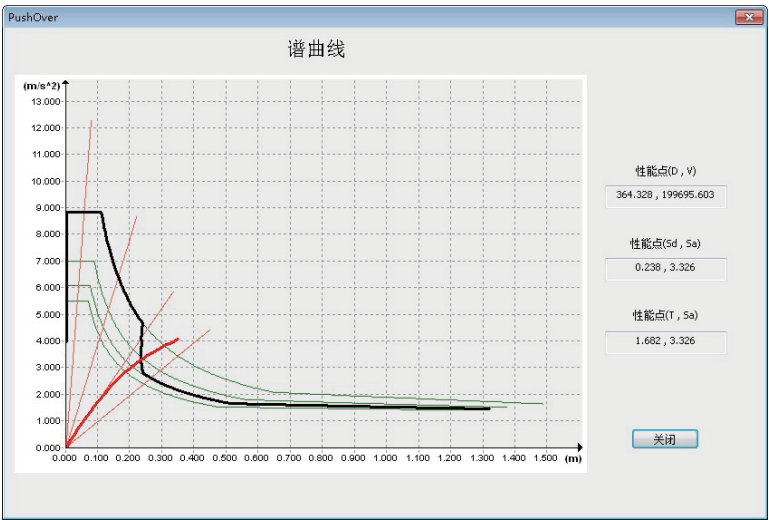


图 16 谱位移-谱加速度曲线图

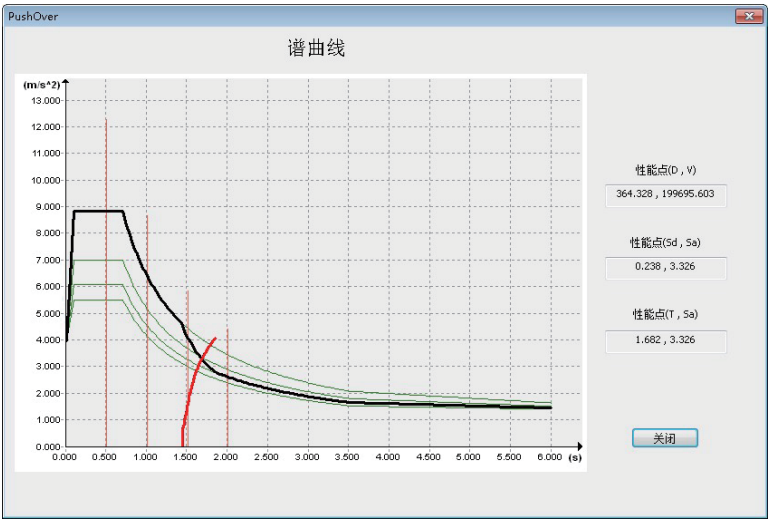


图 17 周期-谱加速度曲线图

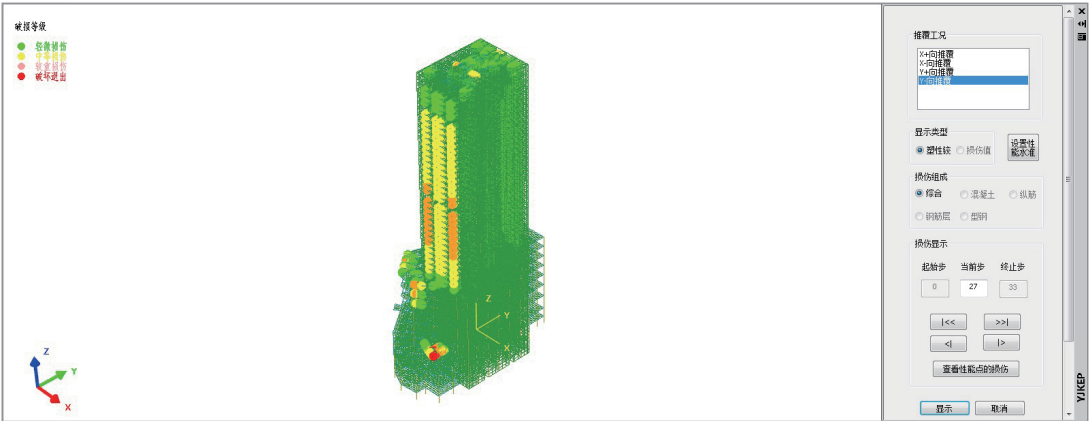
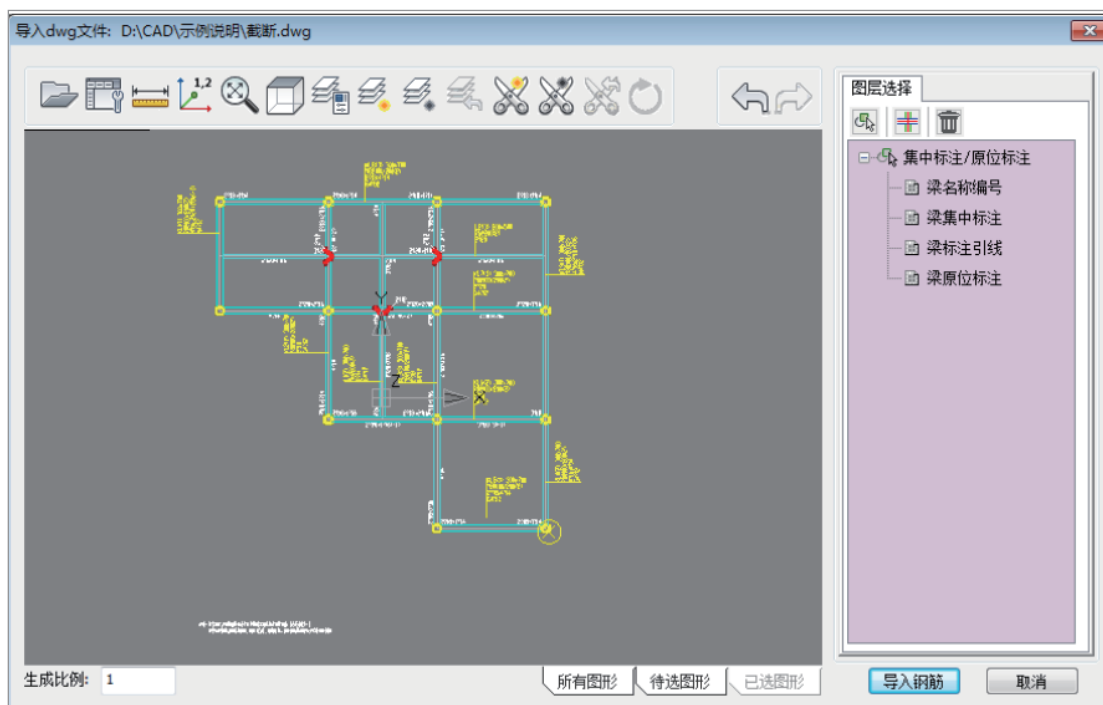


图 18 性能点处塑性铰图

08 提供自动识别施工图文件功能助力既有结构抗震性能分析

具备自动识别施工图文件功能。如果是新建项目，可以采用现有设计软件的配筋结果（实配钢筋或者计算配筋），这点比较容易实现，国内外已有同类软件能做到。但是对于既有建筑，只有施工图纸的情况，重新录入一遍钢筋的工作量是巨大的，并且很容易出错，此时可以利用施工图自动读入分析软件的功能，将大大提高分析的效率和成功率。



WWW.YJK.CN



全国销售热线：400-068-0163
全国服务热线：010-60936006

地址：北京市东城区北三环东路环球贸易中心C座906
邮编：100013