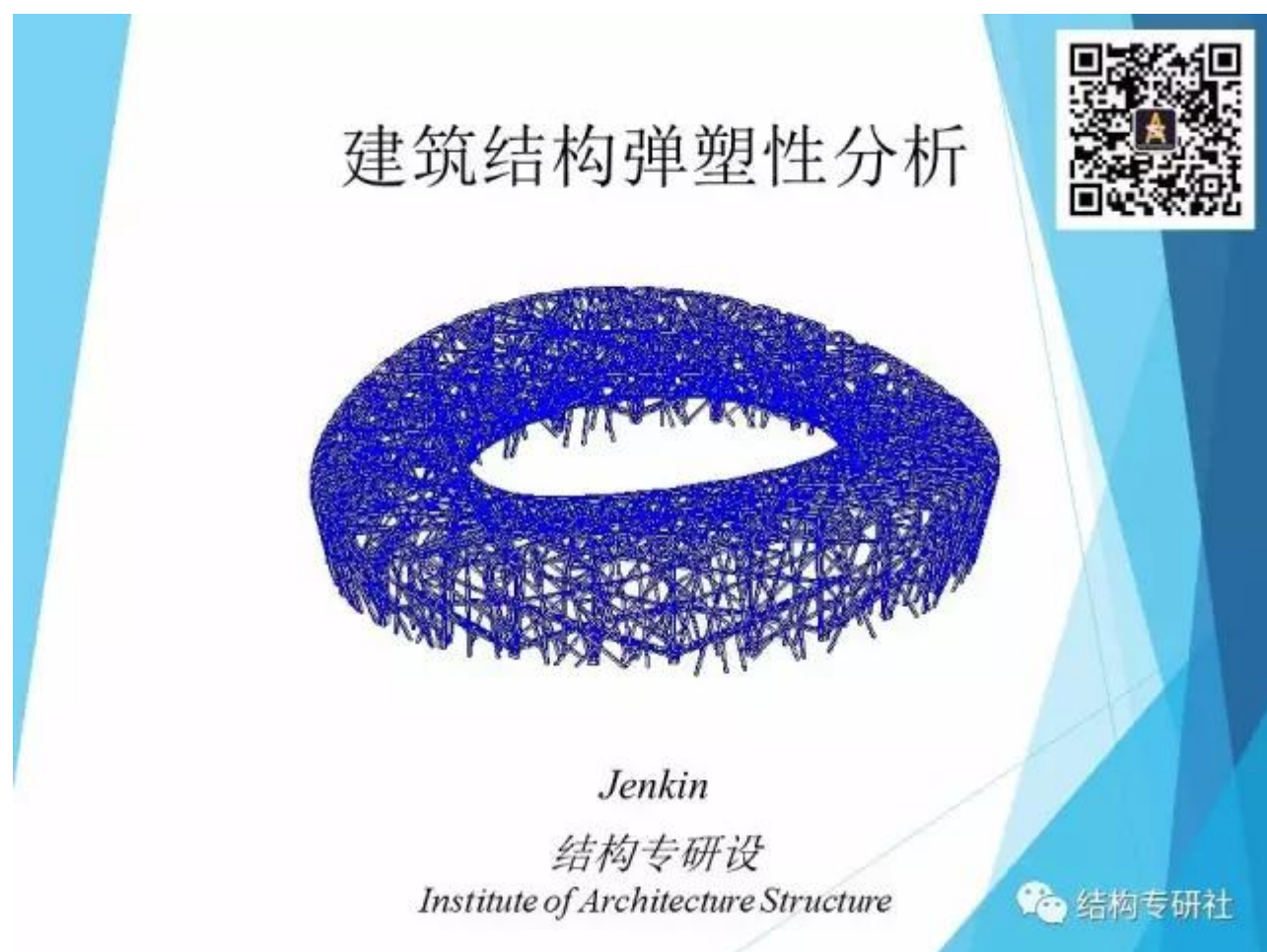


[分享]建筑结构弹塑性分析（一看就懂）

本文结合现行[规范条文](#)，对弹塑性分析进行了总结，并且讲述了软件实现的通用流程，便于网友整体了解静力弹塑性与动力弹塑性的整个分析的流程。



弹塑性分析目的、意义

弹塑性分析方法

弹塑性分析的实现

弹塑性分析目的、意义

三水准设防中的“大震不倒”

两阶段设计中的“第二阶段弹塑性变形验算”

强震下变形验算的基本问题：计算薄弱层位移反应和变形能力

通过改善结构均匀性和加强薄弱层使得层间位移角满足限值要求

弹塑性分析的规范规定



《建筑抗震设计规范》

3.4.3条 竖向不规则结构应(宜)进行弹塑性变形分析

5.5.2条 何种结构需要进行弹塑性变形验算

应进行弹塑性变形验算的结构

- 1) 8度III、IV类场地和9度时，高大的单层钢筋混凝土柱厂房的横向排架
- 2) 7~9度时楼层屈服强度系数小于0.5的钢筋混凝土框架和框排架结构
- 3) 高度大于150m的钢结构
- 4) 甲类建筑和9度时乙类建筑中的钢筋混凝土结构和钢结构
- 5) 采用隔震和消能减震设计的结构

《建筑抗震设计规范》

3.4.3条 竖向不规则结构应(宜)进行弹塑性变形分析

5.5.2条 何种结构需要进行弹塑性变形验算

宜进行弹塑性变形验算的结构

- 1) 本规范表5.1.2-1所列高度范围且属于本规范表3.4.3-2所列竖向不规则类型的高层建筑结构
- 2) 7度III、IV类场地和8度时乙类建筑中的钢筋混凝土结构和钢结构
- 3) 板柱-抗震墙结构和底部框架砌体房屋
- 4) 高度不大于150m的其他高层钢结构
- 5) 不规则的地下建筑结构及地下空间综合体

《建筑抗震设计规范》

3.6.2条 弹塑性分析可以根据具体情况采用弹塑性静力、时程、简化方法

5.5.3条 弹塑性变形
验算方法

5.5.4条 弹塑性分析的
简化方法

5.5.5条 弹塑性
层间位移角限值

验算方法选择

- 1) 不超过12层且层刚度无突变的钢筋混凝土框架和框排架结构、单层钢筋混凝土柱厂房可采用本规范第5.5.4条的简化算法;
- 2) 除1款以外的建筑结构,可采用静力弹塑性分析方法或弹塑性时程分析法等。
- 3) 规则结构可采用弯剪层模型或平面杆系模型,属于本规范第3.4节规定的不规则结构应采用空间结构模型。

《建筑抗震设计规范》

3.6.2条 弹塑性分析可以根据具体情况采用弹塑性静力、时程、简化方法

5.5.3条 弹塑性变形验算方法

5.5.4条 弹塑性分析的简化方法

5.5.5条 弹塑性层间位移角限值

弹塑性层间位移角限值

表 5.5.5 弹塑性层间位移角限值

结构类型	$[\theta_p]$
单层钢筋混凝土柱排架	1/30
钢筋混凝土框架	1/50
底部框架砌体房屋中的框架-抗震墙	1/100
钢筋混凝土框架-抗震墙、板柱-抗震墙、框架-核心筒	1/100
钢筋混凝土抗震墙、筒中筒	1/120
多、高层钢结构	1/50

《高层混凝土结构技术规程》

3.11.3 不同性能水准
设计方法规定；

3.11.4 结构弹塑性计
算分析补充规定；

基本遵从《建筑抗震设计规范》

公式包含内
容丰富，你
看到了什么？

性能水准

1) 第1性能水准 $\gamma_G S_{GE} + \gamma_{Eh} S_{Ehk} + \gamma_{Ev} S_{Evk} \leq R_d / \gamma_{RE} \quad (3.11.3-1)$

2) 第2性能水准 $S_{GE} + S_{Ehk} + 0.4 S_{Evk} \leq R_k \quad (3.11.3-2)$

3) 第3性能水准 $S_{GE} + 0.4 S_{Ehk} + S_{Evk} \leq R_k \quad (3.11.3-3)$

4) 第4性能水准 $V_{GE} + V_{Ek} \leq 0.15 f_{ck} b h_0 \quad (3.11.3-4)$

$(V_{GE} + V_{Ek}) - (0.25 f_{ak} A_s + 0.5 f_{yk} A_{sp}) \leq 0.15 f_{ck} b h_0 \quad (3.11.3-5)$

结构专研社

《高层混凝土结构技术规程》

3.11.3 不同性能水准
设计方法规定；

3.11.4 结构弹塑性计
算分析**补充规定**；

基本遵从《建筑抗震设计规范》

补充规定

- 1) $H \leq 150\text{m}$ (静弹)； $150 < H \leq 200\text{m}$ (静弹或动弹)； $H > 200\text{m}$ (动弹)； $H > 300\text{m}$ (动弹和静弹)。
- 2) 复杂结构应进行施工模拟分析，应以施工全过程完成后的内力为初始状态。
- 3) 弹塑性时程分析宜采用双向或三向地震输入。

《高层民用建筑钢结构技术规程》

6.3.2 构件变形考虑；

6.3.3 弹塑性变形计算补充规定；

6.3.4 杆件的恢复力模型规定

6.3.5 静力弹塑性分析规定

6.3.6 动力弹塑性分析规定

基本遵从《建筑抗震设计规范》

变形考虑

- 1) 梁的弹塑性弯曲变形 (M_3)，柱在轴力和弯矩作用下的弹塑性变形 (PMM)，支撑的弹塑性轴向变形 (P)，延性墙板的弹塑性剪切变形，消能梁段的弹塑性剪切变形；
- 2) 宜考虑梁柱节点域的弹塑性剪切变形；
- 3) 采用消能减震设计时尚应考虑消能器的弹塑性变形，隔震结构尚应考虑隔震支座的弹塑性变形。

《高层民用建筑钢结构技术规程》

6.3.2 构件变形考虑;

6.3.3 弹塑性变形计算补充规定;

6.3.4 杆件的恢复力模型规定

6.3.5 静力弹塑性分析规定

6.3.6 动力弹塑性分析规定

基本遵从《建筑抗震设计规范》

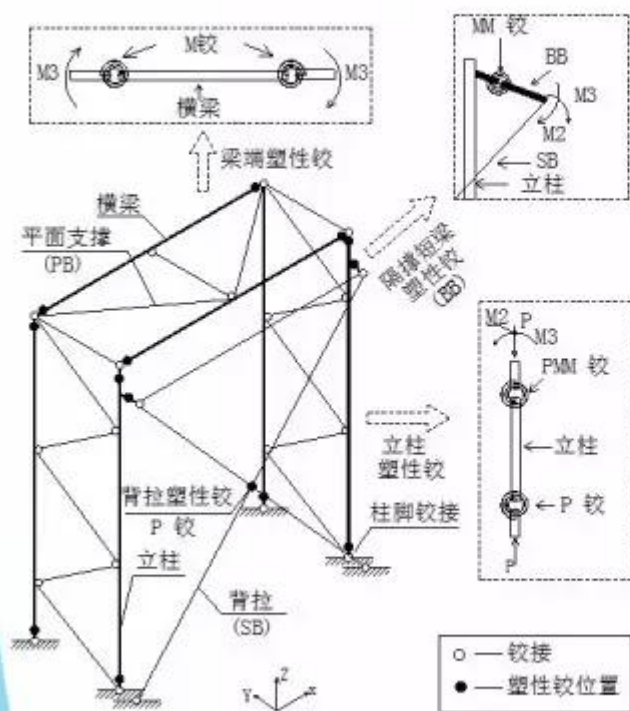
恢复力模型

钢柱、钢梁、屈曲约束支撑及偏心支撑消能梁段恢复力模型的骨架线可采用二折线型，其滞回模型可不考虑刚度退化；

钢支撑和延性墙板的恢复力模型，应按杆件特性确定。

杆件的恢复力模型也可由试验研究确定。

《高层民用建筑钢结构技术规程》



二阶静力分析模型-塑性铰设置

一张图解释弹塑性分析一般规定



塑性铰力-位移曲线关系

弹塑性分析方法



弹塑性分析方法

Pushover分析（静力弹塑性）基本原理

建立结构模型



确定荷载模式



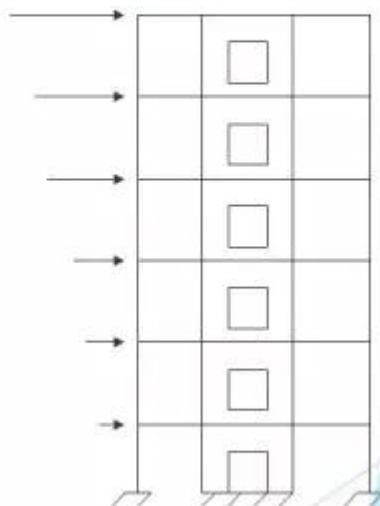
选择控制位移



运行Pushover



能力评价



弹塑性分析方法

动力弹塑性时程分析基本原理

建立结构模型



选择地震波



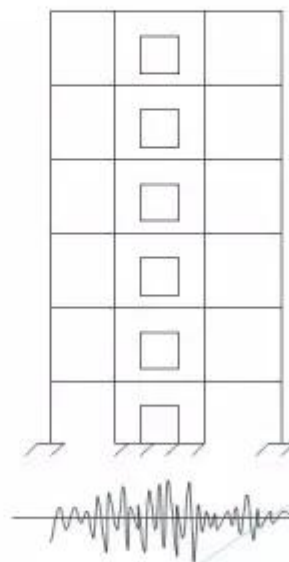
调幅



运行



性能评价



弹塑性分析的实现



弹塑性分析的实现

- ▶ Perform 3d
 - ▶ ABAQUS
 - ▶ SAP2000
 - ▶ ETABS
 - ▶ Midas Gen
 - ▶ PKPM
 - ▶ YJK
- ▶ 前处理较复杂，界面操作难度大
 - ▶ 后处理速度快，易收敛
 - ▶ 前处理易操作
 - ▶ 后处理耗时长，且不易收敛
1. Perform 3d、ABAQUS为专业的分析类软件，理论要求高，处理速度快；
 2. SAP2000、ETABS为设计分析类软件，且两款软件相似度极高，ETABS 2016号称合并Perform 3d，实则一直在模仿SAP2000的前处理，后处理短期内也不可能达到Perform 3d的速度；
 3. Midas Gen 弹塑性分析相比以上几款软件，唯一的特点是，可以将节点带入整体模型中，模拟真实边界条件；
 4. PKPM、YJK两款老牌软件，可以做弹塑性分析，可靠性笔者来验证。

弹塑性分析的实现

为便于读者整体了解静力弹塑性与动力弹塑性的整个分析的流程，
本文选择可视性较好的SAP2000软件为大家演示。

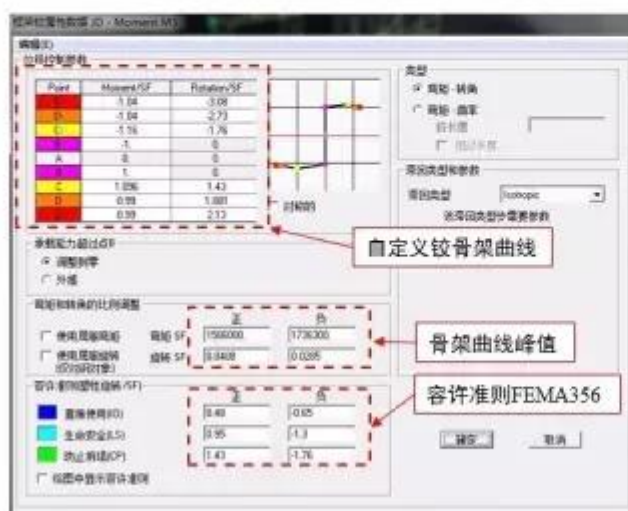
静力弹塑性与动力弹塑性区别在于分析方法，分析模型的前处理
基本一致

（若涉及到倒三角荷载进行Pushover分析，前处理模型会有差别）

弹塑性分析的实现

建立结构模型

模型为设计用模型，关键是塑性单元的选择与定义



自定义塑性铰

简单来说：根据构件的受力特点，选择相应的塑性单元类型。

（如支撑只有轴向力，可以选择P铰；柱按照压弯构件，故选择PMM铰；对于非常规节点，可根据试验的骨架曲线，自定义铰）

弹塑性分析的实现

建立结构模型

指定

框架

铰

将已定义塑性铰指定到相应的构件上



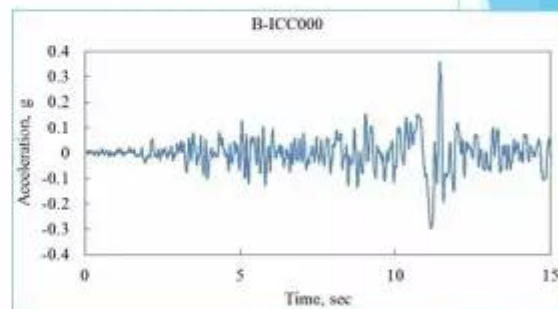
弹塑性分析的实现

确定荷载模式
(静弹)

选择地震波
(动弹)



通常结构前两阶为平动，
按照振型分别加载即可。



按照《建筑抗震设计规范》
5.1.2要求进行选波。

弹塑性分析的实现

定义工况
(静弹)

定义工况
(动弹)



弹塑性分析的实现

控制位移
(静弹)

调幅
(动弹)

非线性静力分析荷载施加控制

荷载施加控制

☐ 荷载控制

☒ 位移控制

控制位移

☐ 使用耦合位移

☒ 使用监测位移

加载到此位移，停止加载

加载到监测位移值

610

监测位移

☒ 自由度

U1

在节点

113

☐ 广义位移

可按弹性限制预估，后需反复调整

确定

施加的荷载

荷载类型	荷载名称	函数	比例系数
Accel	U1	LDS000	853.66
Accel	U1	LDS000	853.66

调幅至相应的加速度
如7度0.1g为220gal

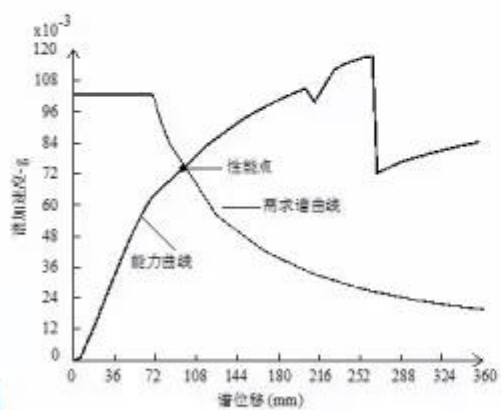
表 4.3.5 时程分析时输入地震加速度的最大值 (cm/s²)

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)	820

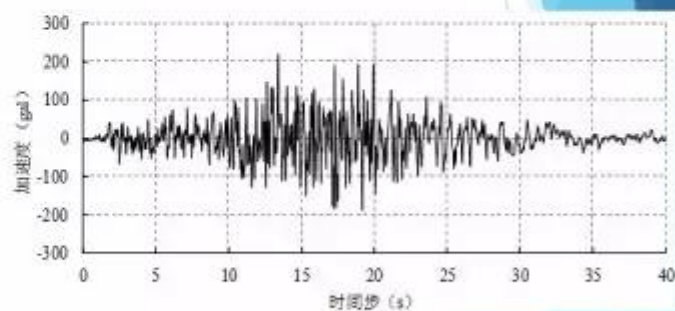
弹塑性分析的实现

能力评价
(静弹)

性能评价
(动弹)

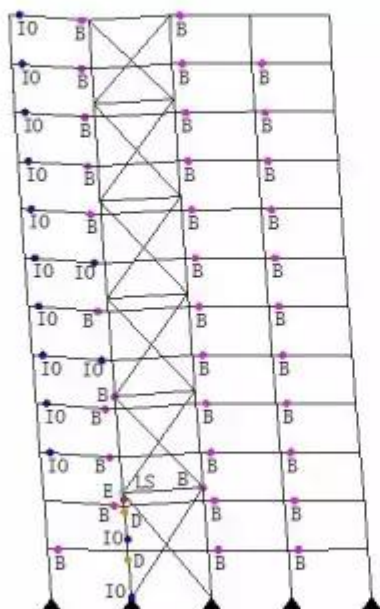


性能点



持时一般为基本周期的5~10倍

弹塑性分析的实现



塑性铰分布

(便于观察，此为笔者处理过图片)

观察构件塑性铰的分布，
可适当加强某些构件（柱）
的强度或刚度，以达到需
要的性能水准。

结束语

软件
是手段

理论
是关键



Jenkin

结构专研社

Institute of Architecture Structure

本文仅提供了部分手段，理论部分还



结构专研社

微信号: jzzyanys