

# START大震弹塑性分析技术条件简介

(上海佳构软件科技有限公司)

通用建筑结构STRAT软件是一款功能全面的有限元分析软件和结构设计软件。大震弹塑性PushOver分析和大震弹塑性时程分析是其功能之一。

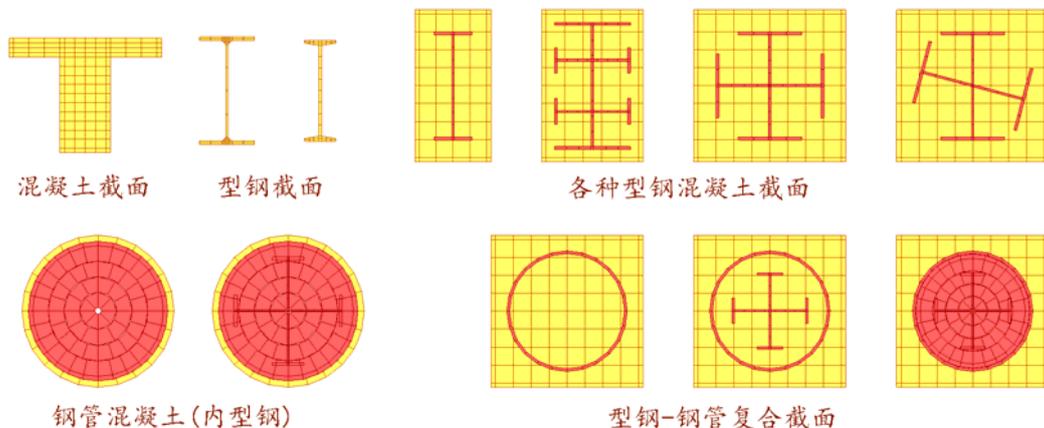
STRAT实现全纤维单元的大震分析，梁柱单元采用三维纤维细分，墙单元采用平面内分块纤维，板单元采用厚度分层纤维。完全摒弃了塑性铰模型，非线性分析直接建立在基本材料(钢、混凝土)的本构关系基础上。STRAT软件大震分析广泛采用先进技术的基础上，并结合自身的研究成果，在多个方面取得突破性进展。

软件具有全面的结构设计功能，能直接利用软件形成的构件计算配筋、或施工图配筋，形成大震分析数据。具有全面细致的结果输出，图表方式给出构件层次、结构层次上各项性能数据，能直观的查看和分析结构破坏形态，量化评估抗震性能。软件直接利用大震分析的结果进行构件的抗震性能设计。

软件具有高速度、大容量核心求解器，其计算速度居国内外前列。STRAT是当前最高效的大震分析软件，工程应用表明其速度是国内外同类软件的3~10倍。

## 1. 梁柱纤维单元

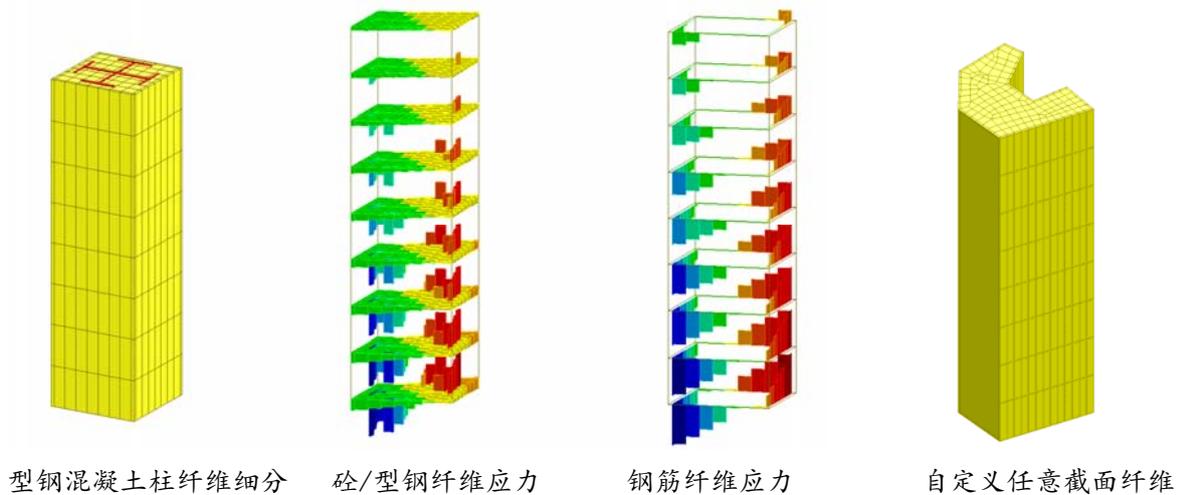
梁柱单元首先对截面进行纤维细分。程序区分混凝土构件和钢构件。属于混凝土构件的截面，钢筋保护层部分单独形成纤维。程序支持型钢混凝土、钢管混凝土、钢-混凝土复合等各种类型的截面类型，自动进行截面纤维细分。



混凝土、型钢混凝土截面的配筋，等效为保护层以内的钢筋片。截面各边的钢筋片的厚度，按实际钢筋面积确定。程序自动读入构件计算钢筋面积，或者直接读入施工图

中实配钢筋面积。梁的纵筋分布于顶、底边，其中顶面纵筋长度按照1/3跨长或实际施工图标记长度，底面钢筋通长。

STRAT梁柱纤维单元的一个重要技术优势，是积分算子法的应用<sup>[4,5,6,7]</sup>。积分算子法使纵向纤维可以任意细分和加密，摆脱数值积分点位置相对固定的限制，以满足可能的端部屈服、跨中屈服等各类工程问题的计算要求，提高非线性分析精度和可信度。相比于柔度法，积分算子具有更强的荷载计算能力，完好地解决了非线性过程中的不平衡内力的计算。积分算子法能直接得到单元刚度矩阵，避免了柔度法矩阵求逆的过程，这是STRAT速度超过一般软件的重要因素之一。



## 2. 剪力墙纤维单元

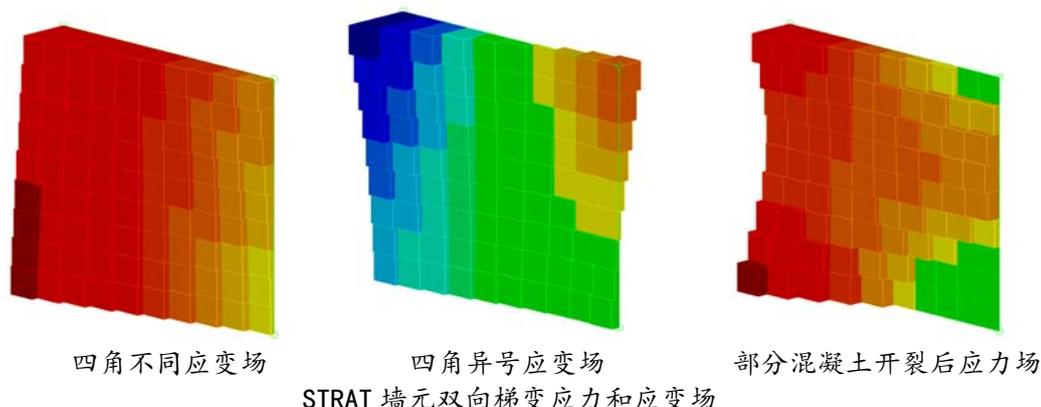
剪力墙分析一直是建筑结构计算的难点。当前众多软件，仅就弹性计算仍存在显著问题：1) 不能可靠计算墙-梁连接节点<sup>[1]</sup>，2) “开洞模型”与“加梁模型”存在刚度差异。(见附件材料)。

结构大震分析中剪力墙模拟更是一个难点。要求达到的条件：1) 墙-梁节点的可靠计算满足基本力学性能，2) 体现墙面内不同部位屈服和破坏的差异，3) 体现墙两方向(水平/竖向)的非线性性能。

剪力墙多竖杆模型(多竖杆模拟压弯，水平杆模拟剪切)，其本质是刚臂杆模型，对空间受力的剪力墙结构而言只是初级阶段(弹性计算经历刚臂杆→薄壁杆→墙元的发展过程)。通用有限元软件对墙面直接用有限元细分，能较好的反映墙面内的双向性、不同部位的屈服破坏，但与梁连接节点需要特别处理，如处理不好就是铰接点，失去墙元的基本力学性能。如此同时，单元细分增加计算量，对于需要计算数千次的大震分析而言显然不是一种有效途径。

STRAT 软件所包含的墙单元，采用全新的单元构成方式<sup>[2,3]</sup>，具有优异的弹性力学

性能，能可靠计算梁-墙连接节点，算例表明优于当前国内外同类软件。不同于一般的二次插值的墙元(四节点附加旋转位移场的 Allman 模式)，STRAT 墙单元是高次单元，单元内部具有高于一次的双向梯度应变场，这为大震分析中的墙元材料非线性问题，提供了良好的载体。



STRAT 大震分析中剪力墙平面内纤维分块模型，即以该单元为基础。对应外部双向压弯、剪切作用，单元内部产生相应的非均匀分布应变。在单个较小的纤维分块内，应力、应变可以假定均匀分布。每个纤维分块具有独立的应力-应变历程信息，独立地确定是加载、屈服、卸载乃至破坏的过程。由墙面内二维分布的多个纤维分块组合，得到墙单元整体非线性力学性能。

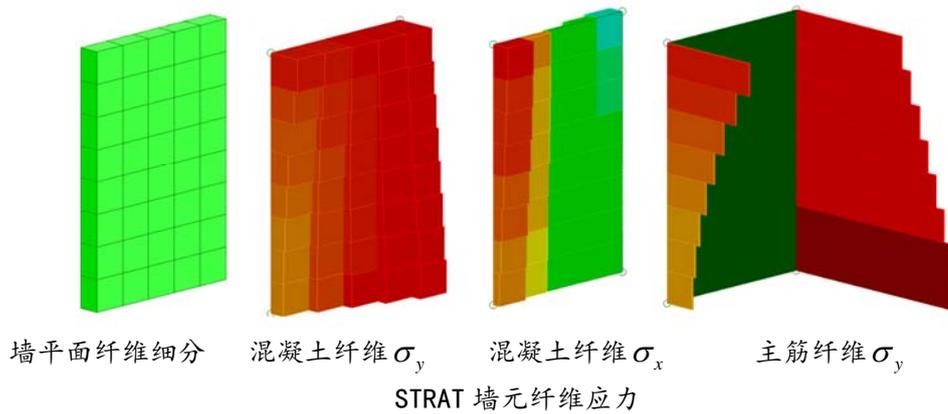
STRAT 墙元平面分块纤维模型，较好地取得了精度与速度平衡。相比于多竖杆模型，能考虑双向受力，能充分考虑局部屈服、开裂的刚度贡献。相比于直接有限元细分模型，显著减少计算量和计算时间，并且墙元本身的双向梯变应变场，本身即能很好的模拟高层结构中剪力墙的受力特点。这种面内分块纤维模型最早在 V4.0 版本中发布(2006)，在国内外属首次(未见同类文献)。STRAT 墙元作为软件的核心技术未公开发表，使得这项技术具有唯一性。

STRAT软件中剪力墙纤维单元内包含3种纤维。

1) 混凝土纤维，具有 $(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy})$ 三种应力和相应的应变。按照主应力分别考虑其非线性滞回性能，考虑混凝土纤维双向作用下的弹塑性本构，可以计算混凝土开裂并包含混凝土对钢筋的握裹增强。

2) 分布筋纤维，模拟剪力墙的水平、竖向分布钢筋作用。分布筋纤维与混凝土纤维重叠，具有 $(\sigma_x, \sigma_y)$ 两种应力和应变。应力方向保持不变，两方向具有独立的非线性滞回性能。

3) 主筋纤维，模拟剪力墙两端暗柱内的主要受力筋(如墙端无暗柱纤维面积为0)。为线纤维，只有拉压应力 $\sigma_y$ 和相应应变。



### 3. 分层壳板单元

STRAT 板单元采用典型的分层壳模型。程序对板单元沿厚度分层(隐含 10 层)，作为层混凝土纤维。板顶、底面分别设一个钢筋纤维层，模拟楼板的配筋。配筋顶底面、各角点可以不同，线性插值得到内部板面的钢筋。

程序记录混凝土、钢筋层纤维在单元角点处理应力、应变等全过程信息(包括 xy 方向应力/应变和剪切特性)。程序独立处理角点出纤维层的非线性本构特性，考虑混凝土纤维双向作用下的弹塑性本构，可以计算混凝土开裂并包含混凝土对钢筋的握裹增强。钢筋纤维只考虑两方向独立的拉压性能。单元内部本构特性由角点插值得到。

分层壳模型沿厚度分层，能较好地模拟厚板弯曲作用下的材料非线性受力过程，适用板式楼盖中大板的模拟。STRAT 的板单元是 Allman 类型单元，单元内部具有线性应变场(不同于 STRAT 墙元高次应变场)。对于转换梁、转换墙的复杂受力构件细分单元模拟时，大震分析即相应采用分层壳模型。建筑结构中的弹性楼板，以面内拉压受力为主，也采用分层壳模型。

分层壳模型本质也是纤维单元，只需针对混凝土、钢筋等基本材料定义本构特性。STRAT 材料本构定义同时适用于梁、墙、板。

### 4、材料本构特性

STRAT 软件实现了结构大震分析的全纤维模型，所有梁柱、墙、板的本构关系，在纤维层次上实现统一。由基本纤维的拉压非线性本构特性(单向/二维)，实现构件的非线性性能、及整体结构的非线性性能。

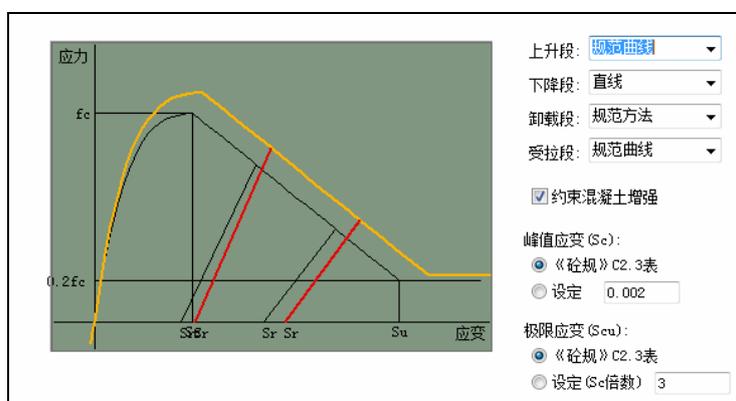
在 STRAT 软件中，用户只需对基本的混凝土、钢材、钢筋、橡胶等，设定其单向拉

压本构关系。所有构件采用统一设定的材料本构模型。参数设置依据现行规范或其它得到公认模型，不需要塑性铰、屈服面等过多的人为干预，使计算具有客观性。

#### 4.1 混凝土

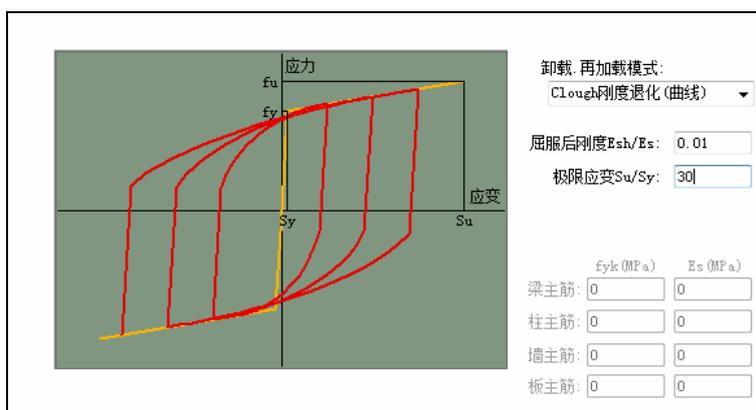
混凝土的基本本构关系较为复杂，除规范推荐之外，仍有多中被广泛采用的本构模型。我们综合研究各类模型的特点，创造性地在STRAT软件中实现菜单式混凝土本构模型。对混凝土的上升段、下降段、卸载段、受拉段，分别提供多种选项。用户可以计算的需要，分段选择设定，既具有灵活性，又避免由用户烦琐的直接设定。程序确保各分段本构模型在各控制点的协调。

程序将Kend-Park模型中的约束混凝土增强的特性，推广到各类本构模型中。



#### 4.2 钢材、钢筋

软件提供三种本构模型，但钢材、钢筋的本构模型分别设置，体现同一工程中钢筋、钢材材质的差异。其中钢筋的强度、弹性模型，除根据工程已经录入的信息(计算配筋时设置的钢筋类型)自动设定外，用户还可以另外设置，例如直接输入实测值。



#### 4.3 约束屈曲支撑 (略)

#### 4.4 橡胶隔座 (略)

## 5、分析结果的输出、判别与使用

### 5.1 塑性铰的类型

混凝土构件的塑性铰是一个广义的概念，是钢筋屈服、混凝土屈服、钢筋粘结滑移的综合结果。纤维模型能真实地分析和记录了梁柱、墙、板在一个截面内钢筋和混凝土的受力历程，一般意义上的塑性铰，在纤维模型中通过钢筋、混凝土的屈服体现。在一个截面中，钢筋屈服、混凝土屈服可以不同步，甚一种屈服而另外一种不屈服。

### 5.2 构件性能评估

软件输出多项结果，用于判断构件的性能。

- 1) 构件最大内力，用于性能设计。
- 2) 最大应变，用于判断构件的屈服程度。
- 3) 塑性铰的位置，塑性铰出现的先后顺序(分别按钢筋屈服、混凝土屈服)。
- 4) 构件破损程度(轻微/轻度/中度/严重)。

### 5.3 构件破损程度

规范定性地将大震作用下构件的破损程度分为轻微、轻度、中度、严重四类。但没有具体的量化依据。STRAT软件结合纤维单元的特点，根据应变屈服、应变超限的纤维数量比例，给出构件截面的破损程度的指标。

当截面最大纤维应变屈服、但不超过极限应变时：

- 轻微： 屈服30%以下
- 轻度： 屈服30%~60%
- 中度： 屈服60%以上

当截面最大纤维应变已经超过极限应变时：

- 中度： 超限20%以下
- 严重： 超限20%以上。

### 5.4 整体性能评估

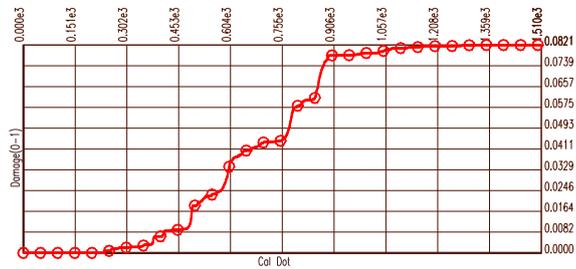
大震分析结果需要判断。除了判断结构是否满足抗震要求之外，最好还需要知道结构抗震性能的好与坏，地震作用的破损程度，以及在满足基本要求的前提下存在的富余度。不同于PushOver分析中有一个明确的P- $\delta$ 整体性能曲线，大震时程分析得到只是一个离散的时间历程结果。最大位移控制，只是一个包络控制，不能反应结构的性能的变化过程。

STRAT软件首次给出大震时程过程中刚度曲线和整体损伤曲线。前者通过结构整体

刚度的随时间的变化体现结构整体的屈服程度，后者体现了大震作用之下混凝土结构承载能力降低的幅度。



大震时程刚度曲线



大震时程损伤曲线

### 参考文献

- 1、Jing-Zhong Xie, Research on Local Deformation of Shear-wall Structures, The Fifth International Conference on Tall Buildings, 1998, Hongkong
- 2、谢靖中, 剪力墙精确分析, 第十七届全国全国建筑结构学术交流会论文集, 2002.11
- 3、Jing-Zhong Xie, A General Method for Computing Stiffness and Load Matrixes of Non-uniform Beam-Column Element Based on Integration Operators(Abstract), Seventh World Congress on Computational Mechanics (WCCM-VII, 2006)
- 4、谢靖中、李国强, 一种新的集成非线性杆件单元刚度矩阵的方法, 工程力学, 2002
- 5、谢靖中、李国强, 非线性杆单元荷载矩阵积分算子直接集成算法, 计算力学学报, 2003
- 6、谢靖中, 变截面梁预应力计算的积分算子法, 工程力学, 2006.
- 7、Jing-Zhong Xie, Applications of the Integral Operator Method in Beam-Column Element, Computational mechanics, proceedings of ISCM 2007..