

# 建筑结构连续倒塌分析在 SAP2000 中实现

筑信达 张振鹏 吴文博

结构的连续倒塌已成为严重威胁公共安全的重要问题，国家也出台了《建筑结构抗倒塌设计规范》（CECS392：2014）来指导设计人员进行抗倒塌设计。根据《建筑结构抗倒塌设计规范》（后简称规范），对于需要进行抗连续倒塌设计的建筑结构，有三种方法可供选择：拉结构件法、拆除构件法和局部加强法。其中拆除法中的非线性动力方法，具有简单易行又足够精确等优点，被很多工程师所采用。在最新的 SAP2000 V20.2.0 版本的时程分析中，新添加了 Consider Collapse 功能，可以很好的模拟规范相应条款的要求，并且操作简单。在此以一框架结构的抗连续倒塌分析为例，介绍新版 SAP2000 软件当中 Consider Collapse 法的具体操作步骤。

## 1 结构基本模型

案例模型为三层钢框架结构，X 向 3 跨，Y 向 2 跨，柱距均为 6m，层高 3m，如图 1 所示。

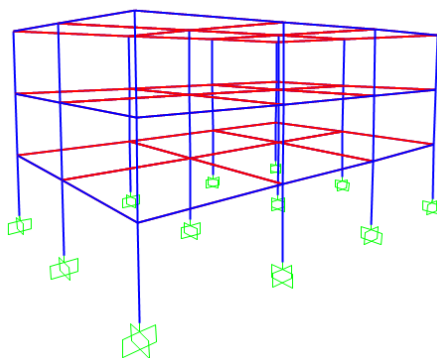


图 1 结构三维布置图

框架柱均为 YB-WH400X300X6X10 型钢，框架梁均为 GB-I24a 型钢，所用材料为 Q345，楼板为 200mm 厚的 C30 混凝土板，使用膜单元模拟，楼板恒荷载 1 KN/m<sup>2</sup>，楼面活荷载 3KN/m<sup>2</sup>。

### 1.1 非线性属性设置

本例中，仅考虑了框架结构中的梁柱可能失效，因此对结构中的所有梁柱构件均设置了塑性铰，其中梁采用默认的 M3 铰，柱采用默认的 P-M2-M3 铰，铰参数均依据美国规范 ASCE41-13 取用。

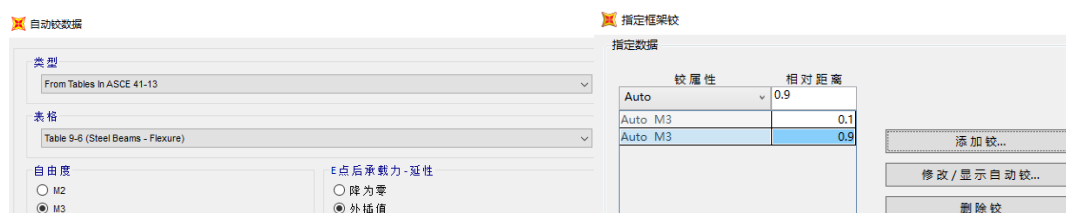


图 2-1 默认的 M3 铰

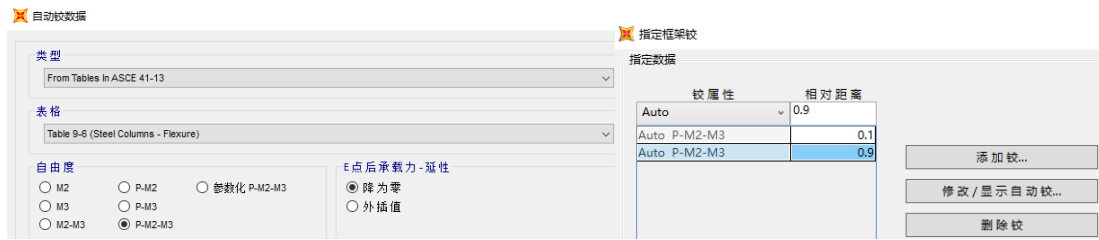


图 2-2 默认的 P-M2-M3 铰

## 1.2 质量源的定义

依据《规范》4.4.6 和 4.4.8 条，结构质量可设置为 1.0 恒荷载+0.5 活荷载，如图 3 所示。



图 3 质量源定义

## 2 规范拆除法的实现

规范拆除法的非线性动力方法大致可分为以下步骤（如图 4）：

- 1) 建立初始模型，确定失效构件，获取失效构件的节点力。
- 2) 建立等效静力模型，拆除掉失效构件，并在相应位置处施加反向节点力以维持结构平衡。
- 3) 以一定速度移除节点力，并进行非线性动力时程分析。

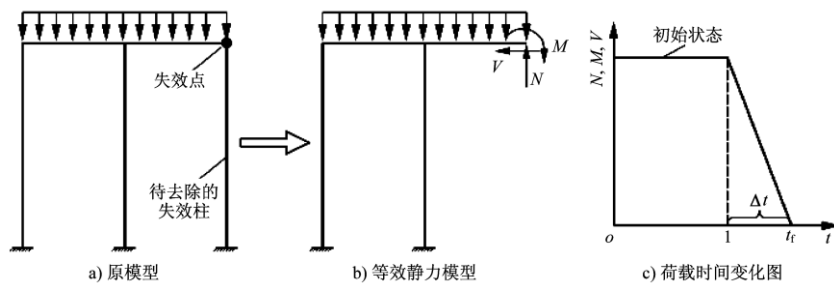


图 4 等效静力图示

以上过程在 SAP2000 早期版本中也是可以实现的，但是步骤略微复杂。以下方法一即早期版本的操作方法，方法二是当前 V20.2.0 版的方法。

### 2.1 方法一

首先确定失效构件，并获取失效构件的节点力。失效框架标签为“12”，失效节点标签为“42”。通过查看>表格>分析结果>单元输出>Frame Output>Table: Element Joint Forces-Frames 命令查取内力(如图 5-2)。



内力工况或组合应为 1.0 恒荷载+0.5 活荷载，注意，为了获取失效构件的等效节点力，这里的 D+0.5L 工况不适合使用非线性工况，不考虑 P-Δ 效应。

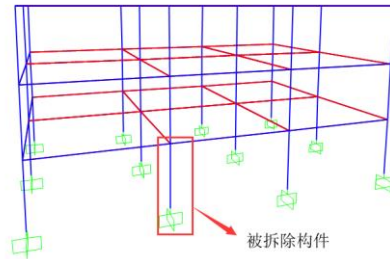


图 5-1 拆除构件

Frame Text	Joint Text	OutputCase	CaseType Text	F1 KN	F2 KN	F3 KN	M1 KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m	FrameElem Text
12	15	D+0.5L	LinStatic	-0.09	-0.372	421.188	0.3666	-0.074	-2.126E-08	12-1
12	42	D+0.5L	LinStatic	0.09	0.372	-419.275	0.7503	-0.1963	2.126E-08	12-1

图 5-2 拆除构件两端反力

然后建立等效静力模型，拆除掉失效构件，并在相应位置处施加反向节点力以维持结构平衡(如图 5-3)。定义新的荷载模式（节点反力）用于施加反向的节点力，这样方便后续时程工况进行调用。并在节点 42 处施加节点反力，节点反力与图 5-2 中节点力等大反号。原则上框架单元或壳单元的单元节点力包括力和力矩（共 6 个分量），实体单元则只有力（共 3 个分量），在此将 6 个分量全部考虑在内。

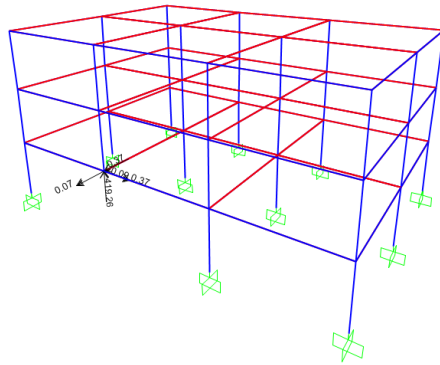


图 5-3 失效杆件内力与反内力

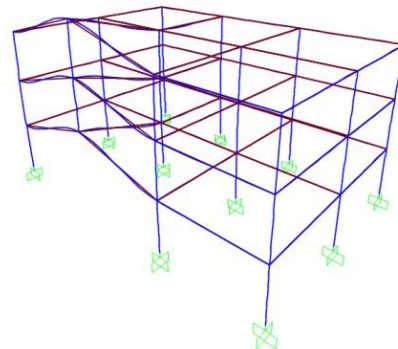


图 5-4 竖向基本周期对应的模态

以一定速度移除节点力，并进行非线性动力时程分析。根据规范要求，失效时间不超过剩余结构基本周期的 0.1 倍。注意：此处的基本周期应为剩余结构的竖向基本周期。经过模态分析，本例中第一阶竖向振动周期为约 0.65s，因此失效时间可取为 0.05s，时程函数可定义为 (0, 0), (1, 0), (1.05, -1)。在定义非线性时程分析工况之前，应先定义非线性前置静力工况，其中包含恒载、活载以及替代失效杆件的节点力 (1×恒载+0.5×活载+杆件内力)，用于模拟结构的初始状态。

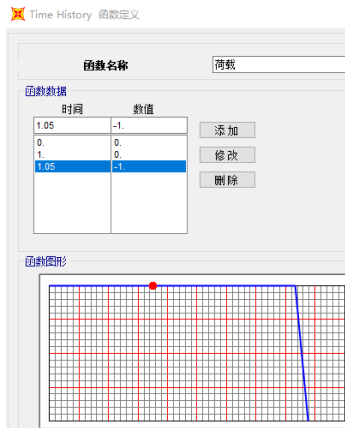


图 5-5 失效杆件时程函数

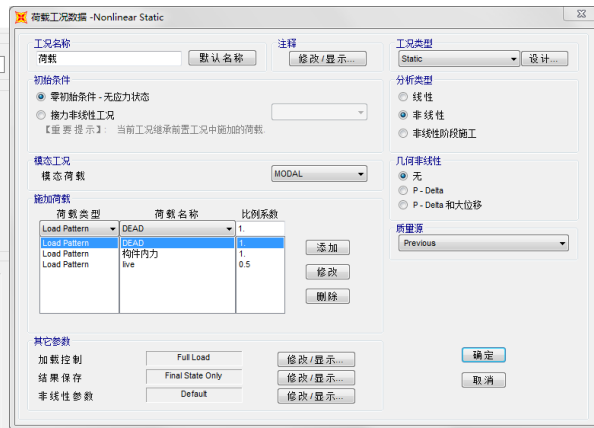


图 5-6 非线性静力工况

以非线性静力工况为前置工况，设置非线性时程工况，分析类型为非线性直接积分法。荷载类型选择为 Load Pattern，荷载名称选择为上文定义的构件内力，比例系数为 1，考虑几何非线性“P-Δ”（详规范 4.4.14），步长取为 0.005s（详规范 4.4.14）。另外结构阻尼可选用瑞利阻尼，钢结构阻尼比取为 0.02，设置可依据图 5-7。

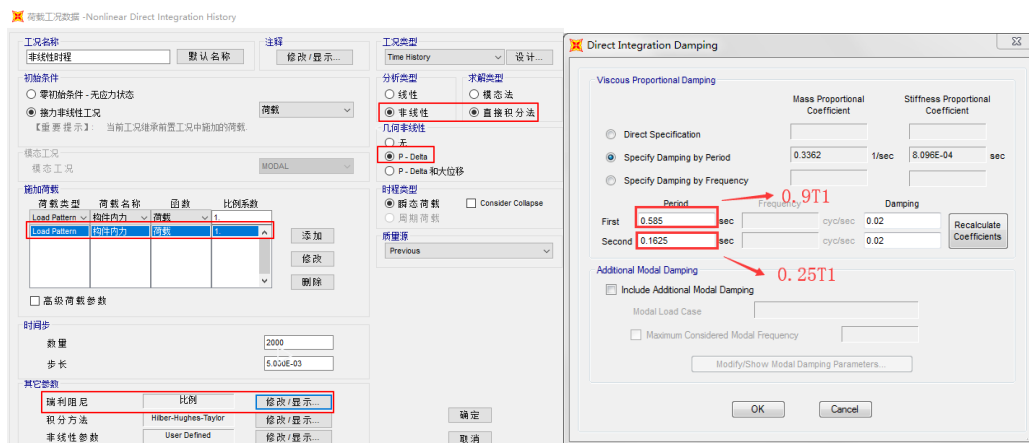


图 5-7 非线性时程工况与瑞利阻尼的设置

## 2.2 方法二

SAP 2000 V20.2.0 中的 Consider Collapse 法相比上文的方法简单许多，只需要在原始模型中，定义相应的工况即可。

首先，确定失效构件，并将此构件指定到相应的组中（GROUP1）。其次，定义前置重力工况，与前文非线性静力工况相同，但不包含失效杆件的等效内力。之后定义非线性时程工况，与前文中不同的是，时程类型须勾选 Consider Collapse，在左边的对话框（Object to Remove）中，第一项选择为 Group，第二项选择为 GROUP1，移除时间（Removal Time）选为 1s，持续时间（Duration）选为 0.05s，其他与上文一致，如图 5-8 所示。其中，移除时间对于只移除单根构件来讲意义不大，此项更多是用于不同时间移除多根构件，持续时间是指拆除当前构件所需的时间。

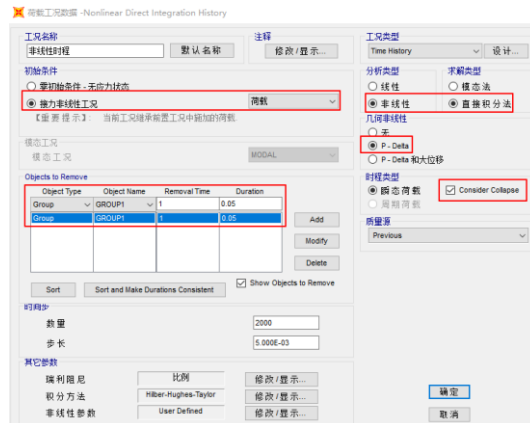


图 5-8 加入 Consider Collapse 的时程工况

### 2.3 结果分析

我们以失效柱顶节点 42 为参考点，参考点的 z 方向位移为比较对象，对比两者之间的差别：

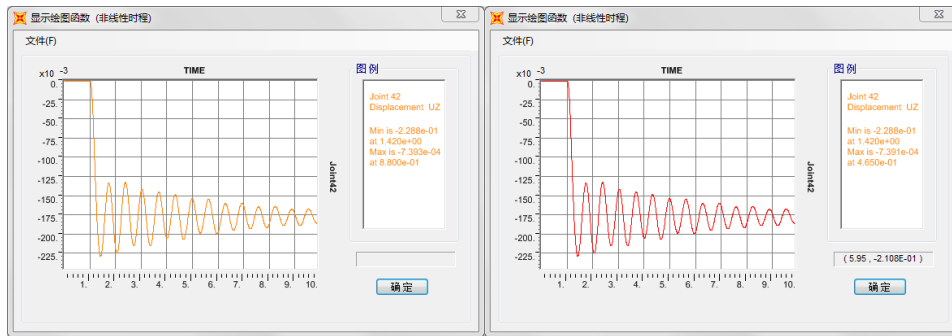


图 6-1 方法一

图 6-2 方法二

将数据放置在图表当中，我们发现两者几乎一样，误差不超过 0.001%。方法二的操作步骤比方法一简便得多。

规范是通过较塑性转角来判定结构是否发生破坏（详规范 4.4.18），但我国规范中的限值要求与美国规范 ASCE41-13 的性能准则判定有所不同，但一般可按照性能水准不超过 LS 作为判断依据（如图 7-1）。用户也可以根据较结果自行判定（如图 7-2）。

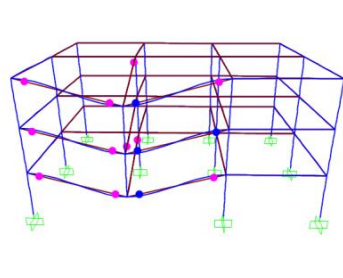


图 7-1 最终时刻结构的出铰状态

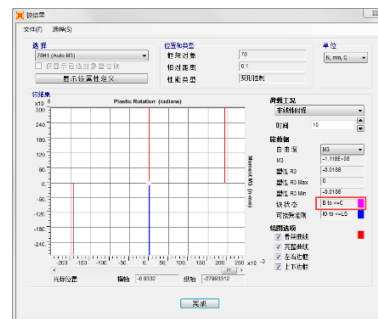


图 7-2 铰状态

### 3 结语

虽然旧版本的 SAP2000 也可以实现抗连续倒塌分析，但是新版 SAP2000 当中的 Consider Collapse 法更加便捷，功能也更加强大。新的方法无需建立等效模型，因此可以非常方便的在原始模型中进行多次拆除，并且还可以实现同一工况中，在不同时间拆除多个构件，这是传统方法很难实现的。