

# 提高弹塑性时程分析效率的几点建议

筑信达 吴文博

随着人们对弹塑性分析的认识逐渐深入，弹塑性时程分析也越来越多的应用于工程当中。同时设计软件也不断的升级换代，使弹塑性时程分析变得越来越方便。ETABS 2016 具有强大的分析功能，高效的求解速度，同时又提供了方便的前后处理功能，可以满足人们对弹塑性时程分析的各类要求。即便 ETABS 2016 具备诸多好处，弹塑性时程分析仍然十分耗时，因此如何提高弹塑性时程分析的效率仍是用户关注的热点，在此提出几点建议与大家共享。

## 1 适当的简化模型

当模型的规模很大，节点的数量很多时，适当的简化模型是非常有必要的。简化模型首先应从非抗侧力构件入手，例如：悬挑梁、悬挑板、次梁、不参与抗侧的楼梯以及其他的次要构件。应当注意的是简化掉构件后，应将荷载传递到相邻构件上。

其次，具有可靠嵌固作用的地下室、地下车库以及刚性地坪以下的基础短柱和基础拉梁也可以进行简化。通常结构地下部分受到土体的约束作用具有很大的刚度，并且上部结构的能量可以通过地下结构传递到土体当中，因此简化掉地下部分是偏于保守的。

最后，减少一些不必要的分割与剖分。例如，当次梁被简化之后，被分割开的框架梁可以进行合并。当对面对像（单元）使用了自动边约束功能后，连梁与墙肢交界处可以不必分割等等。而对于剖分，通常来讲框架单元按照默认的剖分即可，设有墙较的面单元可不必剖分，而设有分层壳的面单元不应进行过细的剖分，过细的剖分可能导致应力与塑性变形过于集中，反而与实际情况不符。

在进行模型简化之后，用户应仔细核对结构的质量、荷载、周期以及其他弹性分析参数，保证弹塑性模型与弹性模型的分析结果基本一致。

## 2 合理的使用和布置非线性属性

合理的选用非线性属性会大大减少弹塑性分析时间。一般来讲，纤维铰比塑性铰更加耗时，分层壳比墙铰更加耗时。对于框架梁，推荐使用塑性铰；框架柱推荐使用纤维铰，因为纤维铰能够更好的模拟柱轴力与弯矩耦合作用；对于长连梁，推荐使用框架单元进行模拟并在梁两端布置塑性铰，而对于可能发生剪切破坏的短连梁可以采用分层壳单元进行模拟；对于高宽比较大的墙肢推荐采用墙铰，否则应采用分层壳。

特别需要注意的是分层壳单元的使用，分层壳的层数以及非线性行为的数量都会对分析时间产生极大的影响。因此用户需要十分清楚需要用分层壳模拟

构件的那些非线性行为，例如，对于剪力墙我们通常关心其平面内的非线性行为，这样平面外的行为可以设置为弹性，并且可以将多排的竖向钢筋合并为一个钢筋层。而对于高宽比较大的剪力墙我们通常关心其压弯的非线性行为，这时候水平钢筋可以忽略，并且将混凝土剪切方向的材料行为设置为弹性。如下图所示。因此合理的定义分层壳需要抓住构件的主要特征，这样既加快了分析速度，也便于对分析结果进行解读。



另外，非线性属性的数量也会大大影响到弹塑性分析的时间。即便很多构件并未出现塑性变形，仍然会因为铰状态判定与铰状态上传而浪费大量计算时间，如下图所示。用户需要对可能产生塑性变形的部位进行预估的判断，然后再通过短时的试算进行验证。以框筒结构为例，通常底部若干层的墙肢以及大部分的连梁和框架梁可能会屈服，因此可以对底部若干层的墙肢和所有的连梁和框架梁布置非线性属性。而框架柱则需要通过试算确定是否布置纤维铰，例如先在首层与变截面各层布置纤维铰，然后对柱发生明显屈服的位置处向上延伸布置纤维铰，如此反复几次。

TIME FOR INITIALIZING ANALYSIS	=	12.91
TIME FOR CONTROLLING ANALYSIS	=	895.74
TIME FOR FORMING STIFFNESS MATRIX	=	922.40
TIME FOR SOLVING STIFFNESS MATRIX	=	431.23
TIME FOR CALCULATING DISPLACEMENTS	=	642.98
TIME FOR DETERMINING EVENTS	=	395.76
TIME FOR UPDATING STATE	=	17134.01
-----		
TOTAL TIME FOR THIS ANALYSIS	=	20495.03

## 3 检查模型的稳定性

一个不稳定的或数值敏感模型通常会花费更多的时间进行求解，甚至可能因收敛性问题导致分析无法完成，因此建议大家首先检查一下模型是否是稳定的或者是病态的。用户可以使用标准求解器运行模态工况（最好使用特征值向量法），标准求解器可

以给出最为详细的警告信息，如下图所示，这些警告信息可能对线性分析影响不大，但是对弹塑性时程分析可能会有显著影响。



#### 4 非线性时程分析方法的选择

在 ETABS 2016 中有两种非线性时程分析方法，一种为 FNA 法，另一种为非线性直接积分法。由于 ETABS 2016 中增加将较模拟为连接单元的功能，因此 FNA 法的应用范围得到了极大的扩展。一般来讲，FNA 法是一种更为高效的方法，特别是处理减、隔震结构具有十分巨大的优势，因为通常来讲这类结构的非线性构件的数量比较少。当非线性自由度数量超过节点自由度数量的 20%~25% 时，FNA 法在计算效率上的优势将会消失，此时应当转而采用非线性直接积分法。另外 FNA 法在阻尼的处理上更加灵活，可以采用模态阻尼、材料阻尼以及瑞利阻尼，而非线性直接积分法只能采用瑞利阻尼。非线性直接积分法是一种更加普适的方法，可以处理所有类型的材料非线性以及几何非线性，因此在大震弹塑性分析当中有更多的应用。

#### 5 几何非线性的选择

ETABS 2016 提供了两种几何非线性，一种为 P-Δ 效应，一种为大位移效应。对于大多数结构，P-Δ 选项是足够的，特别是当材料非线性控制时。但是对于经历显著变形的索结构应使用大位移选项。P-Δ 效应对结构的影响通常比较显著，特别是对于高层结构。由于考虑了 P-Δ 效应之后会增加计算量，并且可能因部分构件发生屈曲而导致分析不收敛，因此建议用户在试算阶段先进行没有几何非线性的分析，待模型调试基本完成后，再添加 P-Δ 效应进行最后的计算，这样既方便确认问题的根源，也可以节省大量的试算时间。

#### 6 时间积分方法的选择

在 ETABS 2016 中，内置了多种时间积分方法，这里主要介绍两种方法，即 Newmark 法和 Hiber-Hughes-Taylor 法（简称 HHT 法）。

由于 ETABS 2016 中只有隐式积分法，所以推荐大家使用无条件稳定的时间积分方法。对于 Newmark 法，当  $2\beta \leq \gamma \leq 0.5$  时，此方法是无条件稳定的，因此我们推荐取  $\beta=0.25$ ， $\gamma=0.5$ ，即为大家所熟知的平均加速度法。

HHT 法是无条件稳定的，其中  $-1/3 \leq \alpha \leq 0$ ，带有一定  $\alpha$  值的 HHT 法对处理收敛性较差的结构是很有效的，并且会提高计算效率。 $\alpha$  值相当于算法阻尼，与物理阻尼不同，其耗能作用会随着分析步长  $\Delta t$  的减小而减小。当  $\alpha$  取为  $-1/3$  时，此方法会很大程度上过滤掉周期小于  $10\Delta t$  的成分；当  $\alpha$  取为 0 时，此方法退化为平均加速度法，并且不会耗散任何能量，但是可能会高估了高频的响应。通常推荐大家根据分析步长取  $\alpha$  值为  $-1/24$  或  $-1/48$ 。若用户的非线性分析收敛有困难，可以使用  $\alpha=-1/3$  得到一个初始解，然后使用减小的步长和  $\alpha$  值重新运行分析，来得到更准确的结果。

#### 7 非线性参数

对于大部分非线性参数建议用户使用默认值，唯一需要注意的是事件到事件方法（Event to Event）。程序允许设置一个事件凝聚容差，即当某个塑性铰进入事件时，程序认为状态跟其很接近（小于设置的事件凝聚容差）的其它铰也一同进入这一事件。这样可以减少出现的事件数，从而减少刚度更新的次数，减少求解时间。事件到事件方法在 ETABS 2016 版本中适用于塑性铰、纤维铰、墙铰、分层壳以及部分连接单元等非线性单元。相比于程序默认的迭代方法，此方法在非线性价件数量较少时会提高计算效率，但是对于非线性构件数量非常巨大的结构，可能会增加分析时间。但是对于迭代方法收敛困难的结构，建议使用事件到事件步方法，此方法会显著提高分析的收敛性。

#### 8 求解器选择

ETABS2016 中提供了三种求解器，分别为标准求解器、高级求解器和多线程求解器。其中标准求解器可以提供最为详细的警告信息，但是只能进行处理器单核运算，运行速度最慢；高级求解器可以给出部分警告信息，可以调用处理器所有核心，是程序默认的求解器；多线程求解器不提供任何警告信息，可以最大化利用处理器所有核心以及内存，运行速度最快。因此推荐大家使用标准求解器检查模型的稳定性后，再使用多线程求解器求解以得到最佳的分析效果。

上述建议对于大多数结构是适用的，但是结构模型千变万化，需要具体问题具体分析。希望以上内容能帮助用户理解程序的功能，合理恰当地使用程序完成分析。

更多相关内容请访问筑信达知识库，如下：

- 1、非线性分析的分析时间报告
- 2、求解器解析
- 3、如何在 FNA 法中合理考虑 P-Delta 效应
- 4、并行计算的应用范围
- 5、不同分析工况对硬件的需求

