

# 抗震性能化设计在 ETABS 中的实现

筑信达 李立

性能化设计 (Performance Based Design) 是对传统结构设计概念的一次重大转变, 代表着地震工程学的未来。新的设计方法将帮助工程师确定, 在给定的地震作用下, 设计方案能可靠地满足所需的性能水平。PBD 的基本内容是要明确地模拟构件的屈服后行为, 通过非线性动力分析来捕捉结构在地震作用下的弹塑性行为, 进而解读结构的塑形发展状态和能量耗散来判断结构是否达到预期的性能目标。可以看出, 要完成性能化设计, 必须先了解: 如何模拟构件的屈服后行为? 如何进行非线性动力分析? 抗震性能化设计与常规弹性设计的不同? 下文将结合 ETABS2016 的相关功能来阐释这些问题。

## 1 构件非线性行为的模拟

常见的结构构件有梁、柱、支撑、剪力墙、楼板等等, 在 ETABS 中对应为框架对象与壳面对象。对于框架对象, ETABS 用塑性铰或纤维铰来模拟其非线性行为。对于壳面对象, ETABS 用墙铰或分层壳来模拟其非线性行为。对于消能减震和隔震结构, 其减隔震装置也是十分重要的非线性构件, ETABS 用相应的连接单元来模拟其非线性行为。

### 1.1 塑性铰

塑性铰实质是一种力-变形行为的约定, 体现了构件截面的力学属性。根据受力方式, 塑性铰可分为弯矩铰 (M 铰)、剪力铰 (V 铰)、轴力铰 (P 铰) 和轴力-弯矩 (P-M 或 P-M-M) 铰。所以, 构件上布置的铰类型要与该构件的主要受力状态相符。此外, 塑性铰也区分延性铰和脆性铰, 前者监控变形指标 (例如转角), 后者监控力指标 (例如剪切强度)。定义塑性铰的基本内容包括: 屈服后的力-变形行为 (屈服前的行为由截面的弹性属性确定)、性能水准 (也称为可接受准则)、滞回模型等。这些内容可以根据程序内置的规则自动生成, 即自动铰; 也可以逐项人工定义, 即自定义铰。当给框架对象指定自动铰 (Auto) 时, ETABS 会提示用户选择相应铰类型, 然后基于 ASCE41-13 的规定自动生成相应的塑性铰信息。对于非常规截面, 例如组合截面、异性截面等, 则需要用户通过数值模拟或实验来获取构件截面特

性, 从而自定义铰属性信息。

### 1.2 纤维铰、墙铰

纤维铰是基于材料的非线性本构关系和截面纤维划分来确定构件的非线性行为。对于指定了纤维铰的构件, 程序根据截面特性自动划分纤维、并赋予相应的材料。ETABS 内置了常用材料的非线性本构曲线, 当然本构模型也可以自定义。对于混凝土材料, 如果使用程序内置的 Mander 模型, ETABS 可根据截面箍筋的位置, 自动区分约束区和非约束区, 并分别赋予不同的混凝土模型, 这是非常便利的功能。

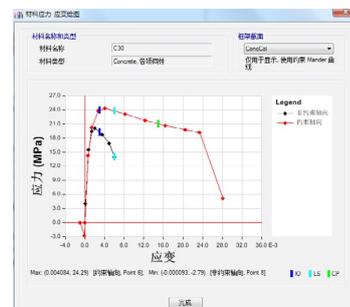


图 1 内置的约束、非约束混凝土本构曲线

ETABS 的墙铰本质也是纤维铰。墙体的配筋可来自设计结果、指定配筋率或指定钢筋布置。图 2 即指定墙体钢筋布置的对话框。通过该对话框能很方便

便的设置边缘构件区域，各区域竖向钢筋、水平钢筋的直径、间距等。基于这些信息程序自动生成墙铰，如图 3 所示。



图 2 自定义墙铰配筋

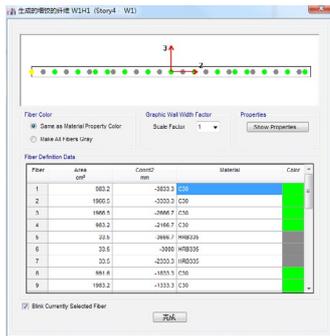


图 3 墙铰纤维

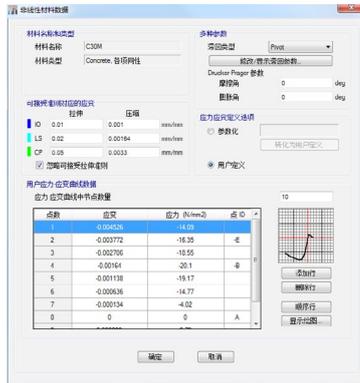


图 4 材料本构定义（含可接受准则）

注意，纤维铰、墙铰的性能水准均来自于材料应变，即使用纤维应变来表征构件的性能状态。如图 4，在材料定义时，需定义材料应变的可接受准则。

### 1.3 分层壳

分层壳也是广泛用于模拟壳对象弹塑性行为的一种模型，很多年前就已经嵌入 SAP2000，也已嵌入 ETABS 2013 及以上版本。分层壳是基于材料的本构关系和复合层模型的平截面假定来确定构件的非线性行为。使用分层壳最重要的，是注意控制非线性自由度的数量，尽可能减少层数，以及每层激活非线性自由度的数量。这样不仅计算效率更高，也便于解读结果。更多内容请阅读 ETABS 随机技术文档《CSI 分析参考手册》第十章，本文不再赘述。

### 1.4 连接单元

ETABS 的连接单元是一系列力-变形行为的约定，用来模拟节点间复杂的连接关系。表 1 给出了用于模拟减隔震装置的常见连接单元类型，每种类型的具体属性请查阅 ETABS 随机技术文档《CSI 分析参考手册》第十五章。

此外，ETABS 在框架截面定义中新增了 BRB 类型，能够快速定义 BRB 重量、截面尺寸、弹性段刚度、屈服段长度等信息，并基于截面数据自动计算其非线性属性（也支持用户自定义）从而生成铰属性，大大方便了含 BRB 结构的建模及非线性分析。注意这里 BRB 并没使用连接单元来模拟。

表 1 减隔震装置与连接单元

减隔震产品类型	ETABS 对应连接单元类型
橡胶隔震器	Rubber Isolator
摩擦摆隔震器	Friction Isolator 或 T/C Friction Isolator
三摆隔震器	Triple Pendulum Isolator
指数型粘滞阻尼器	Damper-Exponential
双线性力-速率关系的粘滞阻尼器	Damper-Bilinear
摩擦弹簧阻尼器	Damper-Friction Spring
软钢阻尼器、BRB 等位移型阻尼器	Plastic (Wen)或 Multilinear Plastic

## 2 非线性分析

抗震性能化设计相关的非线性分析主要指静力推覆分析和动力弹塑性时程分析，限于篇幅这里重点介绍动力弹塑性时程分析相关的功能增强。

### 2.1 FNA 法拓展应用

对于动力弹塑性时程分析，ETABS 提供两种求解方法：FNA 法和直接积分法。ETABS 的老用户对 FNA 法一定不陌生，这是一种基于模态叠加来求解动力问题的方法，以计算效率高著称，最早由 Wilson 教授提出，并一直应用于 CSI 系列软件中。在早期的 ETABS 中，FNA 法仅用于考虑连接单元的非线性行为；如今，FNA 法被推广应用于考虑塑性铰、纤维铰、墙铰等材料非线性问题，具体通过设置“以连接单元模拟铰”来实现用 FNA 法求解非线性铰的问题（如图 5 所示）。但前提是，有足够的模态数量来确保 FNA 法计算结果的准确性。所以，对于较小规模的弹塑性模型，FNA 法不失为一种快捷高效的计算方法。但如果存在大量的非线性单元，所需计算的模态数量倍增（增加一个非线性自由度，相应增加一个模态数），分析效率的优势不再突出，此时使用通用的直接积分法更加合适。





图5 设置非线性较的分析模型对话框

## 2.2 生成人工波

ETABS 自带了丰富的地震波文件，可随时调用；也可以导入地震波数据，生成用于时程分析的时程函数。除此以外，ETABS 增加了自动生成人工波的功能。该功能可基于一条参考时程函数和目标反应谱，生成一条新的时程函数（人工波），该时程函数的反应谱将与目标反应谱拟合。图 6 中，右侧是参考时程函数（蓝色）与新生成的匹配时程函数（红色）的叠合图；左侧是参考时程反应谱（蓝色）、匹配时程反应谱（红色）与目标反应谱（灰色）的叠合图。

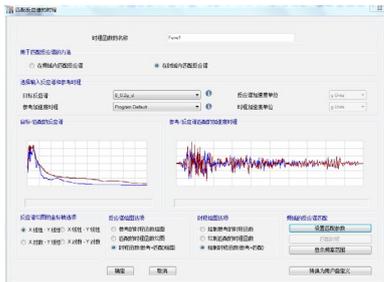


图6 生成人工波对话框

## 2.3 滞回模型

滞回是通过变形进行能量耗散的过程，当荷载反向或循环加载时，滞回行为将显著影响非线性分析的结果。所以，设置合理的滞回行为是进行动力弹塑性分析重要内容。通过 ETABS 定义材料非线性本构、塑性铰、连接单元时，都需要设置滞回类型。

ETABS 内置了丰富的滞回模型，用以体现不同材料或构件的行为特征。这些滞回模型包括：弹性滞回模型、随动滞回模型、退化滞回模型、Takeda 滞回模型、Povit 滞回模型、素混凝土滞回模型、BRB 强化滞回模型、各向同性滞回模型等。ETABS 的联机帮助可查看各个模型的详细介绍。

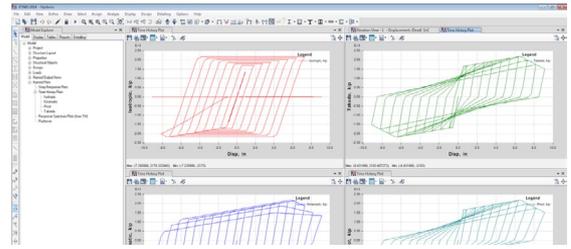


图7 滞回模型

## 2.4 结果表达

动力弹塑性分析完成后，除了通过视窗显示结构变形及塑形发展状况，还可通过显示菜单下的各项命令便捷查看具体的分析结果，常用显示命令及说明见表 2。所有数据也可通过表格便利地查询、筛分、提取。

表 2 常用于显示动力弹塑性分析结果的命令

命令	说明
显示-绘图函数	查看各种响应的时程曲线、非线性行为的滞回曲线、能量曲线等，已能满足大多数需要
显示-较结果	查看每个较的滞回曲线、较状态、纤维较每根纤维的应变等
显示-累积能量分量	查看能量耗散图，FNA 法和直接积分法均适用
显示-快速滞回	快速显示连接单元的滞回曲线
显示-楼层响应图	查看楼层响应图，包括楼层力、位移角、倾覆力矩等
显示-楼层响应联动图	动态显示楼层响应（位移/加速度、位移角、楼层剪力、倾覆力矩）随时间的变化。目前对于大模型，图像刷新较慢，正在进一步优化。
显示-性能校核	查看给定性能水准下构件的需求能力比率

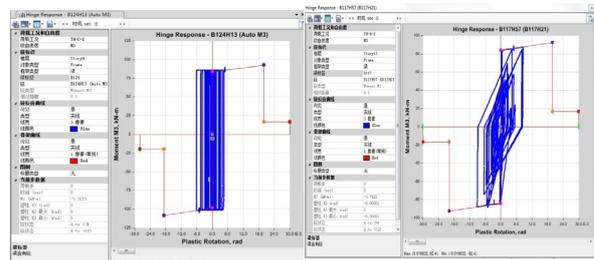


图8 塑性较滞回结果

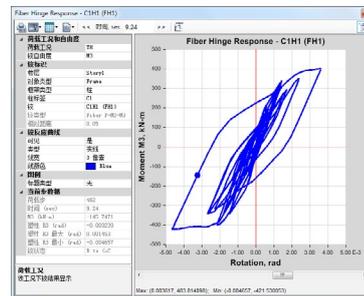


图9 纤维较滞回结果

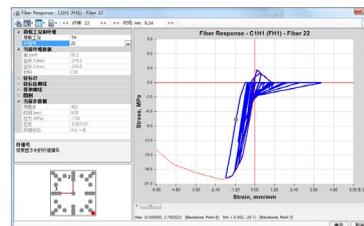


图10 单根纤维结果



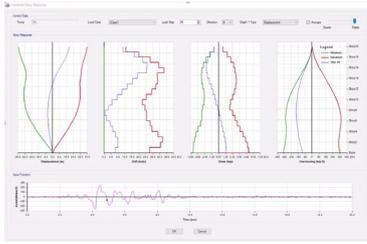


图 11 层位移角最大值

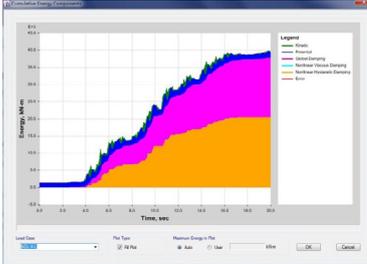


图 12 能量耗散图

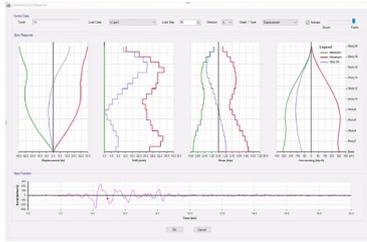


图 13 楼层响应联动图

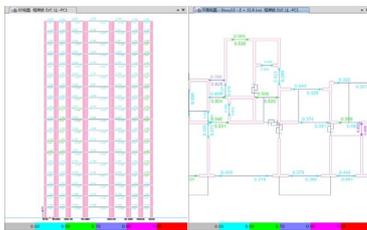


图 14 显示需求 / 能力比率

值得一提的是，“显示性能校核”能够显示给定性能水准下各构件的需求 / 能力比率 (D/C)，这些结果可以是多条地震波的包络值或平均值。如图 14 所示，D/C 越接近 1，代表其性能状态接近给定性能水准的临界值。这是判断构件性能状态最直观的结果表达。

### 3 求解效率

在分析效率方面，ETABS 近几年的每个新版本都将计算效率带到一个新高度。我们在一些实际工程案例中对比了不同版本的计算效率，下列案例供读者参考。

某消能减震框架结构。抗震设防烈度 8 度 (0.30g)，乙类建筑。结构东西向约 95m，南北向 71m，嵌固面以上结构高度超过 24m。框架塑性铰 4419 个；软钢消能器 212 个，计算耗时对比如下：

地震时程分析单工况计算时间 (直接积分法，地震波时长 20s )		机器配置
ETABS 2013	5.5 小时	Windows 7 64 位；内存 8GB；Intel(R) Core(TM) i5-4570 CPU @3.20GHz
ETABS 2015	2.5 小时	
ETABS 2016	1.0 小时	

## 4 认识误区

### 误区一，弹塑性模型等同于弹性模型。

为了快速完成分析，工程师们常常希望将已有的用于弹性设计的模型直接用于弹塑性分析，这其实很难两全。弹性模型是用于截面设计，模型应建得比较具体，反映出每个结构构件的实际受力状况，才能得到完整的设计结果。弹塑性模型是用于分析结构的抗震性能，更关注抗侧力体系、关键构件的行为发展，加之弹塑性分析的复杂性，往往要求合理等效地简化模型，能反映结构的主要传力路径，这不仅提高分析效率，也便于解释结果。所以，直接将用于弹性设计的模型用于弹塑性分析，常常是不合适的。另一方面，不能完全依靠软件来将弹性模型转化为用于性能分析的弹塑性模型。结构构件弹塑性行为的发展，很大程度依赖于模型中的人为设定。例如什么地方布置铰？布置什么样的铰？这类问题需要工程师结合结构方案来把握和判断，而不是全部交给软件去处理。

### 误区二，设计初期就进行性能化分析。

性能化分析是一种验证而非设计，是在构件截面、配筋、连接关系等确定之后，对结构抗震行为（特别是屈服后行为）发展的模拟，判断其是否符合预期。有时为了赶进度，在还未完成结构设计时，就盲目建立弹塑性模型进行性能化分析，最终往往因为结构方案本身不合理导致结果异常，这时又不得不改方案从头再来。前期的概念设计、弹性分析很重要，前面的工作做扎实了，不仅结构方案合理性有保障，工程师对结构的理解也更到位，这时再进行性能化分析，往往能起到事半功倍的效果。

## 5 小结

以上从不同方面介绍了 ETABS 2016 实现抗震性能化设计的功能特性，有些内容限于篇幅不能详细展开。希望广大用户在使用过程中，积极与筑信达技术工程师联系，共同用好 ETABS 为工程服务。

更多关于 ETABS 2016 的介绍，请访问筑信达主页 [www.cisec.cn](http://www.cisec.cn)。