

ETABS 纤维铰的使用

筑信达 吴文博

ETABS 中框架单元的非线性行为可以通过塑性铰和纤维铰两种方式实现，塑性铰是通过建立力与变形关系，从整体上描述截面的非线性行为，而纤维铰则是通过将截面离散为有限根纤维，并假定每根纤维处于单轴应力状态，在平截面假定的基础上依据纤维材料的本构关系确定截面的非线性行为，这在模拟轴力（特别是变轴力）与双向弯矩耦合作用下的非线性行为非常有效。

1. 纤维铰的分类

纤维铰的有限元实现方式有两种，一种为刚度法，另一种为柔度法。刚度法是通过位移形函数建立单元刚度矩阵的方法，这种方法计算效率高，易收敛。但由于刚度法中位移形函数采用的是 hermite 插值（三次多项式插值），而曲率为位移的二阶导，因此曲率为线性分布。因而，对于强非线性部位通常需要多个纤维铰才能精确模拟位移分布，如图 1 所示。但是对于常规的框架梁、柱，非线性行为通常集中出现于框架两端的塑性区，如果能够合理的确定塑性区的长度，分别在框架两端布置纤维铰，刚度法也具有很好的精度，如图 2。如果无法预估出塑性铰的长度，宜使用多个纤维铰以获取更高的精度。

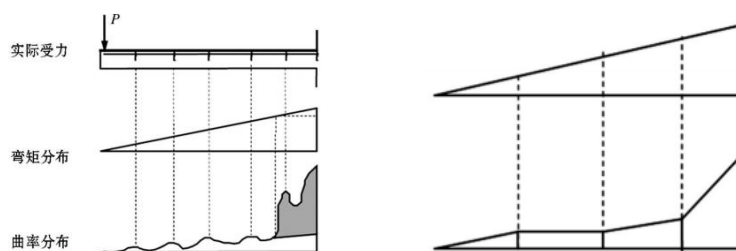


图 1 结构受力形态与四个刚度法单元模拟效果

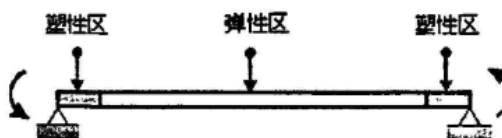


图 2 常规框架集中铰设置

柔度法则是以单元截面力插值为出发点，形函数可以由力平衡条件直接确定，单元内任意截面的内力都可以由形函数得到，利用虚力原理，得到单元的柔度矩阵，求逆后得到单元刚度矩阵。柔度法虽然计算量有所增加，但是一个单元即可较精确地模拟构件的非线性行为，因而总体上计算效率仍然很高。

纤维铰从积分方法上还可以分为集中铰和分布铰两种形式，由于单元刚度矩阵需要截面刚度沿杆件长度进行积分得到，因此需要进行数值积分，积分点位置选取不同，计算结果也有差异。当选取塑性铰区域中某一有代表性的位置（通常取为塑性铰区的中间位置）的截面，用此截面刚度代表整个塑性铰区域的截面刚度，进而获得单元的刚度矩阵的方法叫做特征值截面法，也就是集中铰法。分布铰法是在构件中，依据积分法则选取若干截面，计算截面刚度后，再依据积分法则积分得到整个构件的单元刚度。

在 ETABS 中，纤维铰采用的是刚度法以集中铰的形式施加至构件。如图 2 所示，一般在框架两端设置塑性区，中间区域设为弹性区，这种方式计算简单，效率高，而且概念清晰，与实际震害情况相吻合，但是铰长度设定需要有一些经验。程序默认是将铰长度的中点截面作为特征截面，合理的铰长度可使计算结果更加精确。



2. 设置纤维铰

2.1 纤维铰的定义

用户可以点击命令【定义】>【截面属性】>【铰属性】>【添加铰属性】，铰属性类型选择为 FiberP-M2-M3，程序将弹出铰属性数据对话框，如图 3 所示。对话框中**纤维定义选项**即纤维的划分，当用户选择纤维定义**来自于框架截面的默认值**，程序会对钢截面、混凝土柱截面以及 SD 截面自动进行纤维的划分。图 4 为程序默认的混凝土柱的纤维划分，默认的划分原则是将纤维分为保护层、核心区以及钢筋三个部分。其中保护层采用的是默认的混凝土本构，可以认为是素混凝土本构；核心区的混凝土则可能不同，在定义混凝土本构时，如果参数化定义中选择了 Mander，那么核心区混凝土将会自动变更为约束混凝土，否则将采用默认的混凝土本构；而钢筋纤维的位置和面积则来源于截面定义中对钢筋的布置。

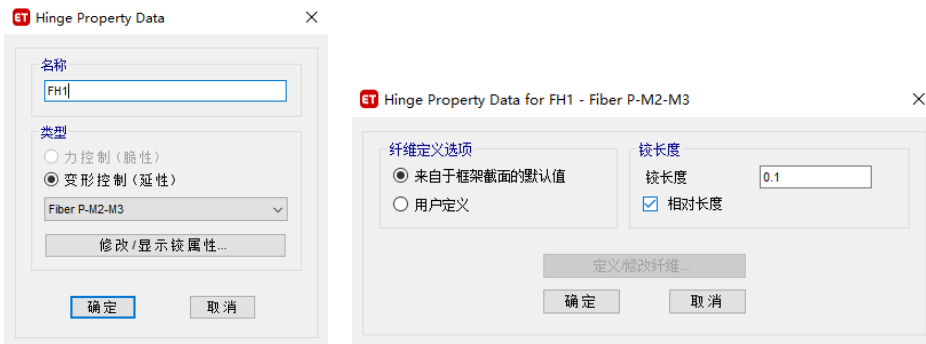


图 3 纤维铰的铰属性数据对话框

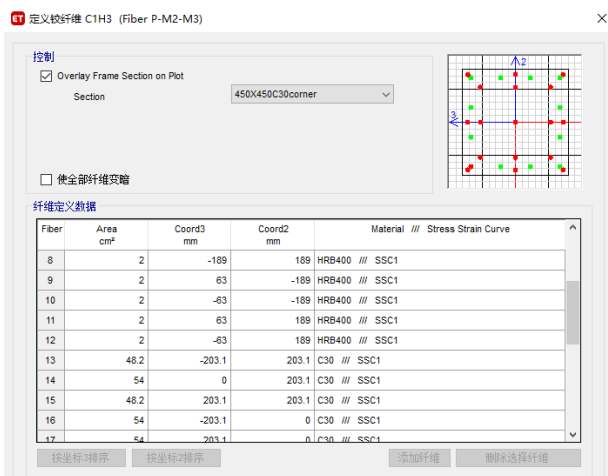


图 4 柱铰纤维自动划分

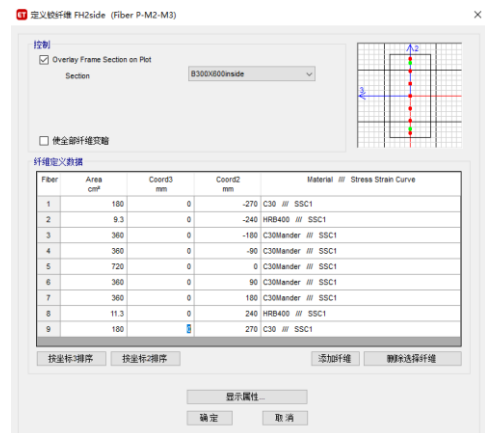


图 5 用户自定义的梁铰纤维

当用户在纤维定义时选择**用户自定义**时，则可以处理更加复杂的情况，或者更加灵活地定义纤维及其本构曲线。如图 5 中用户自定义的梁铰纤维，与柱类似，分别考虑了保护层、核心区以及钢筋的分布，但是由于梁主要是绕 3 轴的弯曲行为，因此将纤维简化为一列，这样做减少了纤维数量会大大提高分析的效率而不会造成精度损失。

铰属性对话框中另一项为铰长度。铰长度的输入有两种方式，一种为相对长度（默认选项），一种为绝对长度。相对长度表示的是纤维铰区域占整个构件长度的比例，取值在 0 到 1 之间。而绝对长度则为纤维铰区域的绝对长度，默认单位为 mm，如果认为铰长度与柱截面高度有关时，可以选择这种定义方式。铰长度的取值应该慎重，铰长度不但对分析结果有影响，对可接受准则的影响更大。对于常规的梁柱，工程中常简化取铰长度为构件长度的 0.1 倍，并将铰布置于杆件的两端，这通常是符合实际破坏状态的。但是对于一些特殊情况则不然，例如端柱，因为端柱本身应作为剪力墙的一部分，并不会像普通柱那样，有反弯点，两端发生弯曲破坏，而是作为墙的边缘构件受拉或受压，破坏状态也是整个构件受拉或受压破坏，此时铰长度取值应该与墙的铰长度相同，甚至直接取为 1。



2.2 材料非线性属性定义

纤维铰中各个纤维的行为是通过材料定义的。用户可以通过【定义】>【材料】>【高级属性】>【非线性属性】进行定义，材料非线性属性定义包括三个部分：应力-应变曲线、滞回曲线和可接受准则。

应力-应变曲线用户可以通过两种方式进行定义，一种为参数化定义，一种为用户自定义。参数化定义是程序内置了相关材料的骨架曲线计算公式，这些公式可以通过【帮助】>【文档】>【Technical Notes】>【Material Stress-Strain Curves】进行查询，用户只需指定一些控制点即可，如图6红框部分所示，用户只需指定混凝土的峰值强度对应应变、极限应变以及极限应变后的下降段斜率即可，其中峰值强度取值为设计强度参数中的标准值（钢筋材料使用的是期望的屈服强度）；下降段的斜率为负值，其绝对值越大，下降越陡峭。

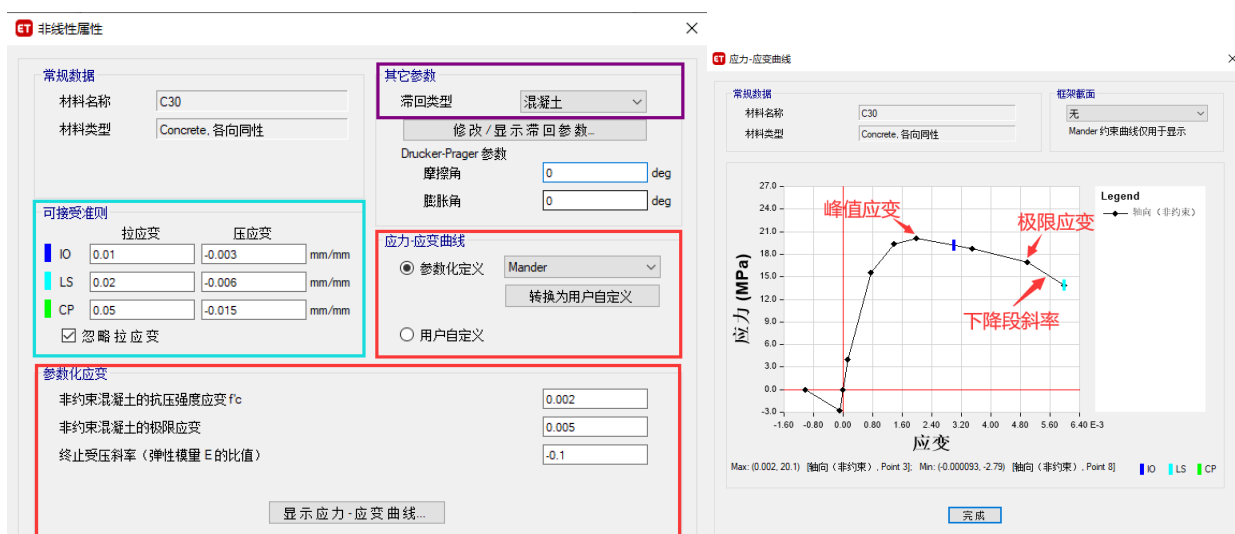


图6 材料非线性属性定义（以混凝土为例）

材料的滞回曲线共有8种（如图7），分别是弹性、随动、各向同性、退化、BRB硬化、Takeda、Pivot和素混凝土，可通过图6中紫色框的滞回类型进行设置，其中对于混凝土材料建议使用Takeda或素混凝土模型，而对于钢材或钢筋则宜使用随动或退化模型，使用不同的滞回曲线，纤维铰的行为也不尽相同。

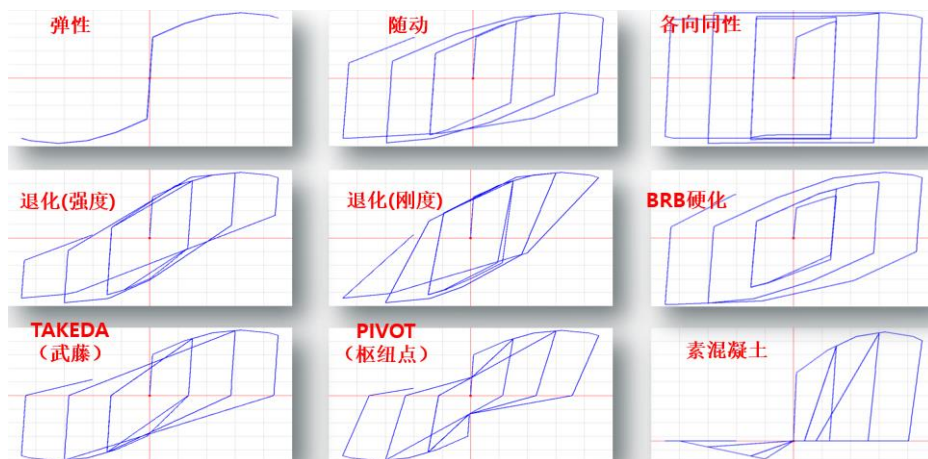


图7 ETABS中滞回曲线

可接受准则用于判断构件的破坏程度，对于塑性铰通常使用塑性转角进行判断（具体可参考技术通讯2020年3月刊中《ETABS塑性铰参数详解》中的内容）。而对于纤维铰的可接受准则是使用应变，先确定同类材料纤维的最大应变，再依据材料的可接受准则进行判断，可通过图6中蓝色框区域对可接受准则进行设置。

2.3 纤维铰的布置

用户选择需要指定纤维铰的框架对象后，可以通过【指定】>【框架】>【铰】，将纤维铰指定给框架对象，通常将铰指定于铰长度区域的中心。如图8示例，该杆件两端纤维铰的中心位于相对距离为0.05和0.95的位置。

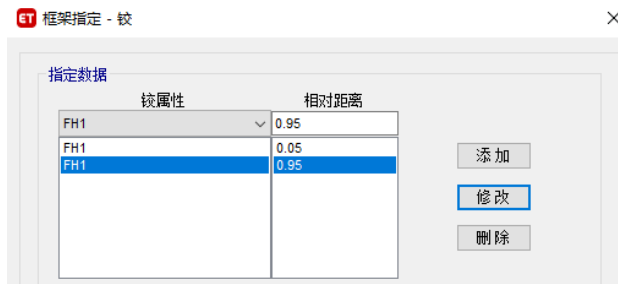


图 8 纤维铰的布置

纤维铰的布置也不必拘泥于放置于在构件两端，也不一定只放置一个纤维铰。如果需要布置多个纤维铰，用户可通过插入多个铰来近似模拟沿单元长度分布的塑性。例如，用户在一个杆件单元上布置 10 个铰，相对位置为 0.05, 0.15, 0.25, ..., 0.95，假定每个铰的长度为杆件长度的 1/10，则可以模拟整根杆件任意位置的塑性行为。显然，添加更多的铰会增加计算量，因此只有在需要的情况下才这样做。

3. 铰的选择

纤维铰可以同时考虑轴力和弯矩对截面滞回关系的影响，因而理论上精度高，适用范围广。但是这并不代表纤维铰是“万能”的。任何模型都有其使用范围，一旦超出使用范围，纤维铰未必一定优于塑性铰。例如，如果混凝土存在显著的剪切变形时，平截面假定已不再成立，此时纤维铰并不能获取到更好的计算结果。反而是基于宏观模型的塑性铰模型可以较好地地进行模拟，如图 9 所示，塑性铰可以考虑剪力对骨架曲线的影响。

Table 10-7. Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Beams

Conditions	Modeling Parameters ^a			Acceptance Criteria ^a				
	Plastic Rotation Angle (radians)		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle (radians)				
	a	b		IO	LS	CP		
Condition i. Beams controlled by flexure ^b								
$\frac{P_u - P_u^e}{P_{uall}}$	Transverse reinforcement ^c	$\frac{V_u^e}{d_w d \sqrt{f_c E_s}}$						
≤ 0.0	C	≤ 3 (0.25)	0.025	0.05	0.2	0.010	0.025	0.05
≤ 0.0	C	≥ 6 (0.5)	0.02	0.04	0.2	0.005	0.02	0.04
≥ 0.5	C	≤ 3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≥ 0.5	C	≥ 6 (0.5)	0.015	0.02	0.2	0.005	0.015	0.02
≤ 0.0	NC	≤ 3 (0.25)	0.02	0.03	0.2	0.005	0.02	0.03
≤ 0.0	NC	≥ 6 (0.5)	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≤ 3 (0.25)	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≥ 6 (0.5)	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
Condition ii. Beams controlled by shear ^b								
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.01
Condition iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span ^b								
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.005	0.01
Condition iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint ^b			0.015	0.03	0.2	0.01	0.02	0.03

图 9 ASCE41-17 钢筋混凝土梁的塑性铰属性考虑了剪力影响

此外，如果实际构件的变形不满足事先假定的形函数规律，从截面积分得到的构件行为与真实构件行为就会有很大差异，此时纤维铰也不再适用。例如构件出现整体或局部屈曲，如图 10 所示，为一个支撑构件的拟静力试验结果，其中 (b)、(c) (d) 的破坏无法通过纤维铰进行模拟，而 (a) 也无法通过单个纤维铰进行模拟，需要将构件分割为多个对象，并对每个对象设置纤维铰，同时通过**修改未变形几何**命令对构件施加初始缺陷，而后在分析工况中考虑 P-Δ 与大位移，方可对整体屈曲进行一定程度的模拟。即便如此，纤维铰也无法完全考虑残余应力对整体稳定的影响，ETABS 模拟效果如图 11 所示。相比较而言，虽然 P 铰滞回行为描述稍差，但是可以较好地反应支撑构件的屈曲行为，特别是屈曲承载力的计算可以考虑计算长度以及截面分类的影响。如图 12 所示的 P 铰骨架曲线可以看到，铰受压达到屈曲荷载后，承载力迅速退化也与工程概念相符，并且 P 铰的计算量会大大减少。

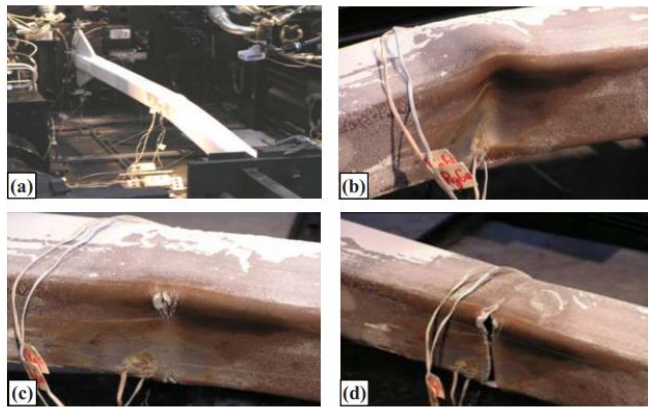


Fig. 4. Typical progression of brace specimen damage (a) global buckling; (b) local buckling; (c) fracture initiation; and (d) loss of tensile strength

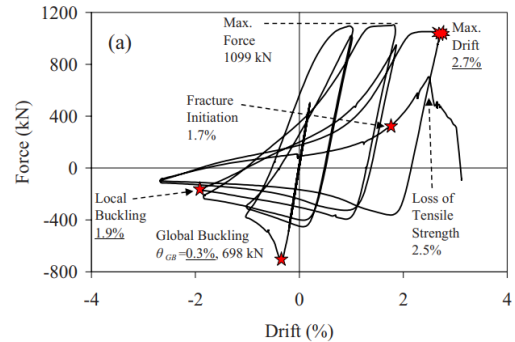


图 10 支撑构件的破坏过程

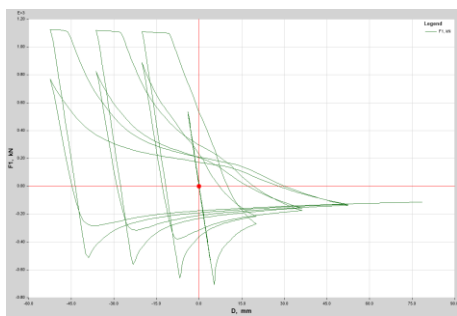


图 11 ETABS 模拟结果

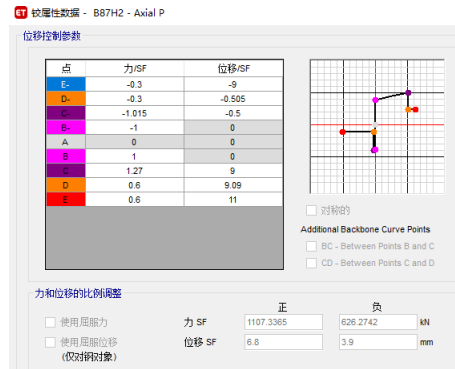


图 12 默认较 P 铰定义

同样，塑性铰也存在一些缺陷，例如 PMM 铰只能采用各向同性滞回，这大大高估了柱的耗能能力，并且 PMM 铰在处理变轴力下的非线性行为时，很难提供足够的精度；塑性铰的骨架曲线也难以考虑加载制度对骨架曲线的影响。因此用户应该有足够的经验来判断选择使用哪种铰进行模拟。

如果用户做 pushover 分析，由于不需考虑构件的滞回行为，更加推荐使用塑性铰，因为塑性铰考虑的因素更多一些，并且性能状态的判断更加直观，也有规范的支持，计算效率也更高一些。如果用户做非线性时程分析，对于梁、支撑等以弯曲或轴力破坏为主的构件，可以使用塑性铰（M 铰、V 铰、P 铰等）；对于框架柱等以 PMM 行为为主的构件，更加推荐使用纤维铰，因为纤维铰对柱的压弯行为以及耗能能力描述的更加准确，这对时程分析而言是很重要的。

4. 小结

本文介绍了纤维铰的分类，按有限元实现的方法分为刚度法和柔度法，按积分方法分为集中铰法和分布铰法，其中 ETABS 分别采用的是刚度法和集中铰法。用户需要依据构件可能发生的破坏形式选择合理的铰长度以及铰位置，做到有的放矢。ETABS 中有不同的铰类型可供选择，用户应结合构件的行为以及分析类型合理地选择不同类型的铰。

参考资料

[1] Computers & Structures Inc., 北京筑信达工程咨询有限公司. CSI 分析参考手册. 2019
 [2] Computers & Structures Inc. ETABS v18.1.1 联机帮助文档. 2020
 [3] B. V. Fell, A. M. Kanvinde, A.M.ASCE, G. G. Deierlein, F.ASCE, and A. T. Myers. Experimental Investigation of Inelastic Cyclic Buckling and Fracture of Steel Braces, Journal of structural engineering, © ASCE / JANUARY 2009
 [4] 陆新征, 蒋庆, 缪志伟, 潘鹏. 建筑抗震弹塑性分析 (第二版), 北京: 建筑工业出版社, 2015