

ETABS 塑性铰参数详解

筑信达 吴文博

随着工程项目日益复杂，各类超高超限也日益增多，弹塑性分析已经成为超限项目使用的常用方法之一。ETABS 经过多个版本的更迭至 V18 版本，在弹塑性分析领域已经比较成熟，我们将通过系列文章介绍一下 ETABS 在弹塑性分析中的应用与进展。

ETABS 中框架单元的非线性行为主要通过塑性铰和纤维铰两种方式实现，本文将主要介绍塑性铰的相关设置。塑性铰在我国规范中很少有相关要求，目前塑性铰的相关设置主要依据美国规范，对于建筑结构而言，ASCE41 规范是应用较为广泛的一本，目前已有 2006 版、2013 版和 2017 版三个版本，ETABS V18 用户可选择 ASCE41-13 和 ASCE41-17 两个版本，本文介绍也主要依据 ASCE41-17 版本。

1. 塑性铰的分类

塑性铰就破坏状态来讲可以分为变形控制（延性铰）和力控制（脆性铰）。对于延性铰，当铰达到屈服后（如图 1 中点 1），仍然能在维持一定的承载力的条件下有很大的变形能力（如图 1 中点 3）。而脆性铰则会在铰屈服后迅速丧失承载力（如图 1 中 Type3）

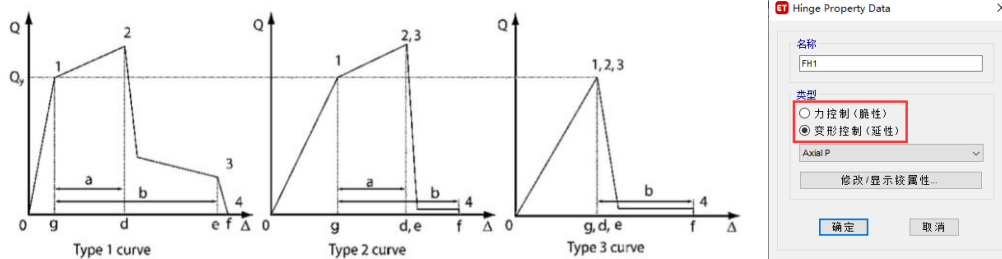


图 1 变形控制 VS 力控制（摘自 ASCE41-17）

通常来讲梁弯曲铰（M3 铰）、柱弯曲铰（P-M2-M3 铰）可视为延性铰，而混凝土梁柱的剪切铰（V 铰）可视为脆性铰。用户应当根据构件的实际可能发生的破坏状态确定塑性铰的类型，不可一概而论，例如，混凝土梁柱的剪切铰可视为脆性铰，但是对于偏心支撑框架的耗能梁段应设置延性的剪切铰。此外，支撑轴力铰（P 铰）较为特殊，支撑受拉行为属于延性铰、受压屈曲属于脆性铰，在 ETABS 中轴力铰按延性铰定义，但拉压行为的延性相差很大，如图 2。

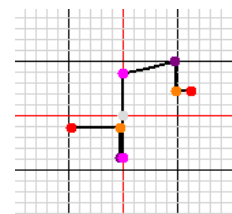


图 2 轴力铰骨架曲线

2. 塑性铰的组成

在 ETABS 中，塑性铰由骨架曲线、滞回关系和可接受准则三部分构成。分别对应图 3 中红框部分、蓝框部分和紫框部分。

骨架曲线描述了构件的屈服承载力、极限承载力、延性、承载力下降、残余承载力等，如图 4 所示。AB 段为弹性段，B 点对应屈服承载力，C 点对应的是截面的极限承载力，a 为 BC 段的长度，体现了截面的延性，a 值越大延性越好，CD 段为承载力下降段，到达 D 点时，构件已基本丧失抵抗水平力的能力，但是仍然具备一定抵抗重力荷载的能力，c 值代表构件的残余承载力，而至 E 点构件已完全丧失承载力，b 值代表了构件的最大塑性变形能力。在 ETABS 中，默认的塑性铰一侧仅包含 5 个控制点，但是自定义的塑性铰可以在 BC 段和 CD 段再分别增加一个控制点（如图 3 桔色框内部），此外，ETABS 中塑性铰的骨架曲线中并未包含 AB 段（弹性段），仅包含塑性段，如图 5 所示。

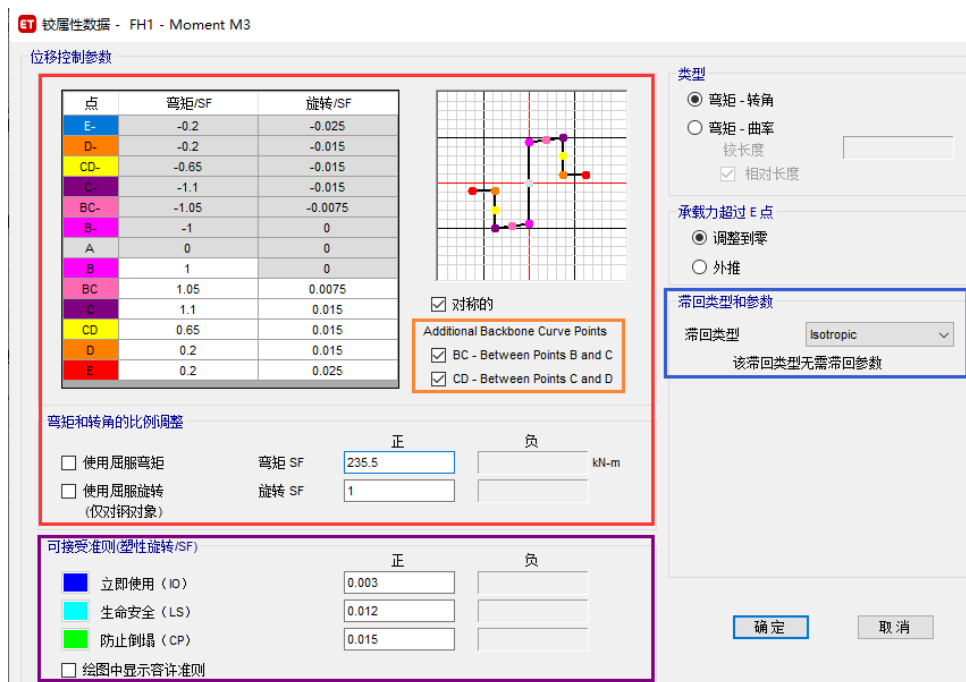


图 3 塑性铰定义

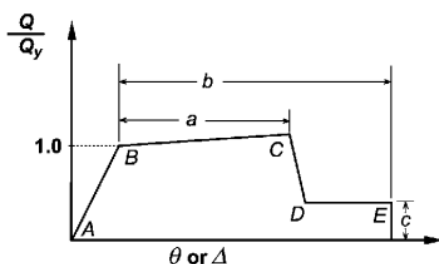


图 4 骨架曲线 (ASCE41)

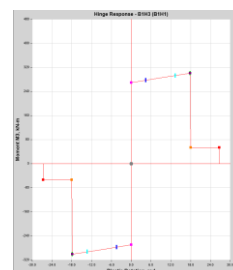


图 5 骨架曲线 (ETABS)

屈服承载力 (B 点) 是按照混凝土材料的标准值和钢筋 (或钢材) 的期望屈服强度进行计算的, 如图 6, 钢材的期望屈服强度较屈服强度更大, 可以类比《钢结构设计标准》第 17 章中超系数的概念。屈服承载力的计算与构件的配筋相关, 在 ETABS 中配筋有两种实现方式, 一种是使用设计配筋, 另一种是使用实配钢筋。这与截面的定义有关, 如图 7 和图 8。当使用设计配筋时, 用户应按下述步骤: **指定默认铰>弹性分析>构件设计>保存设计结果>解锁文件 (构件配筋信息被更新)>弹性塑性分析 (铰信息被更新)**。如果用户未按照上述要求操作, 程序会默认按照最小配筋率计算铰的屈服承载力。当使用实配钢筋时, 用户需要将实配钢筋指定到截面中, 再将其指定到构件中。由于每个截面只能定义一种配筋, 因此这需要定义大量截面并指定给对应的构件, 通常需要借助插件完成这一过程, 筑信达开发的 CiSDetailer 目前可自动完成这一过程。

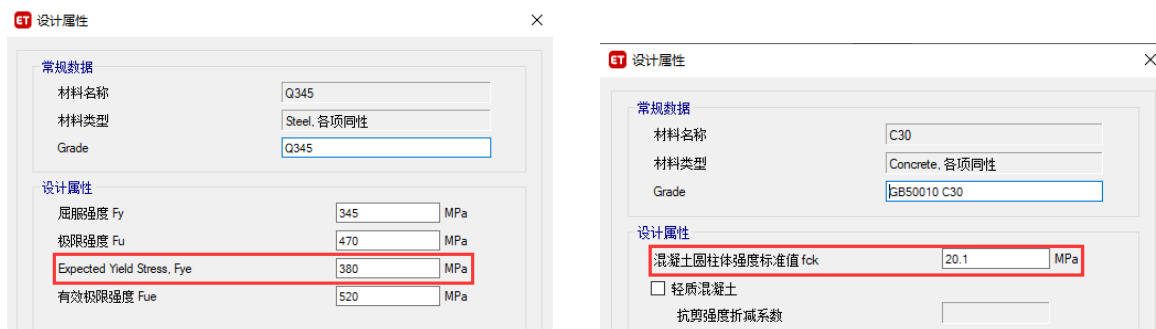


图 6 塑性铰计算所使用的材料强度



图 7 梁配筋信息（设计配筋时填为 0）



图 8 柱配筋信息

对于 CD 段，ASCE 41 规范中为垂直下降，但是这将会导致数值问题，无法收敛，也与实际情况不相符，因此 CD 段应按一定的斜率下降。CD 段的斜率通过较覆盖选项控制。较覆盖项的作用机制可参考筑信达知识库内容：[塑性较覆盖项](#)。用户可以通过细分构件改变 CD 段的斜率（如图 9）。一般来讲，并不建议采用过于陡峭的下降斜率，那样既不符合实际也不利于收敛，同时，对构件细分后，还会导致单元数量大幅增加，进而大大增加分析时间和存储空间。

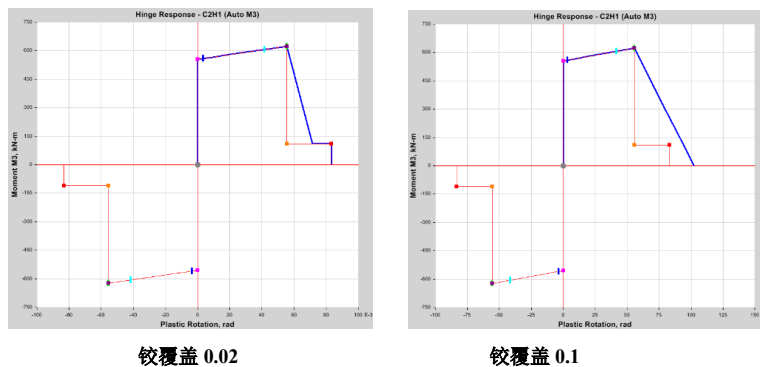


图 9 较覆盖对骨架曲线的影响

滞回曲线表征了构件的耗能能力，滞回曲线越丰满耗能能力越强，这对非线性时程分析有重要作用，但对 Pushover 分析没有作用。ETABS 中的滞回曲线类型共包含 8 种，分别是弹性、随动、各向同性、退化、BRB 硬化、Takeda、Pivot 和素混凝土，这些滞回曲线可用于塑性铰也可用于材料本构。对于钢构件，随动模型和退化模型更为合适，对于混凝土构件 Takeda 和 Pivot 模型更加适用，对于塑性铰而言，PMM 默认为各向同性滞回，不可修改，而对于 M3 铰，默认也是各向同性滞回，但可将默认铰转化为自定义铰后修改为其他滞回类型。

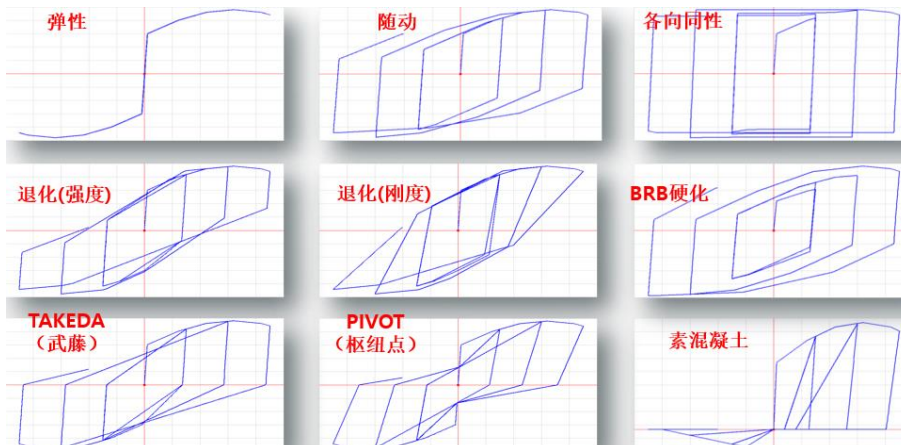


图 10 ETABS 中滞回曲线





可接受准则用于评价结构的性能水准，共分为三个水准，分别是 IO（立即入住）、LS（生命安全）和 CP（防止倒塌），对于延性铰，通常使用变形或转角来判定构件的性能水准，对于脆性铰则使用力作为判定指标。ASCE41 的不同版本，其规定的可接受准则有一定的差异，这可能导致相同的模型，在不同的版本下运行时，楼层剪力、顶点位移等大指标基本相同，但是铰的性能状态存在差异。

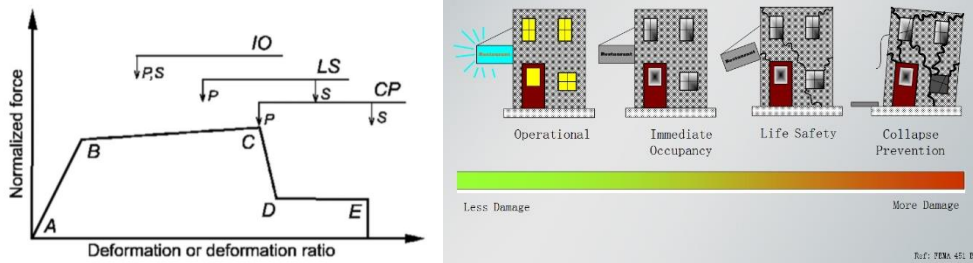


图 11 可接受准则

3. 默认塑性铰的指定

塑性铰的定义可来自程序默认也可来自用户自定义。自定义塑性铰需要用户对每一个截面都单独进行定义和指定，非常繁杂，因此推荐用户使用默认铰。但是默认铰并不是适用于所有截面，ASCE 41 规范中未涉及的截面形式不可指定默认铰，具体使用范围可参考《CSI 分析参考手册》第八章的内容。指定默认塑性铰可先选择某一个或多个框架对象后，【指定】>【框架】>【铰】进行指定，如图 12，铰属性选择为**自动**，相对距离应取塑性铰长度的中间位置处。而塑性铰长度目前有很多学者给出了不同公式，用户可依据实际情况进行选择，实际工程中常简化取塑性铰长度为 0.1 倍构件跨度。但是应当注意的是，如果在模型中设置有端部偏移时，ETABS 会默认端部偏移区域为节点区域，塑性铰通常是不会出现在于节点区内部的，因此，一旦塑性铰的位置位于节点区内，程序会自动将其偏移至节点区边缘处，如图 13。

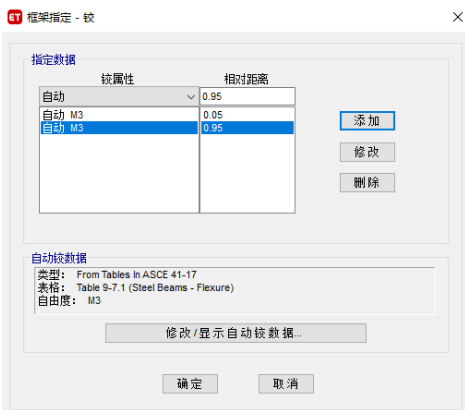


图 12 默认铰指定

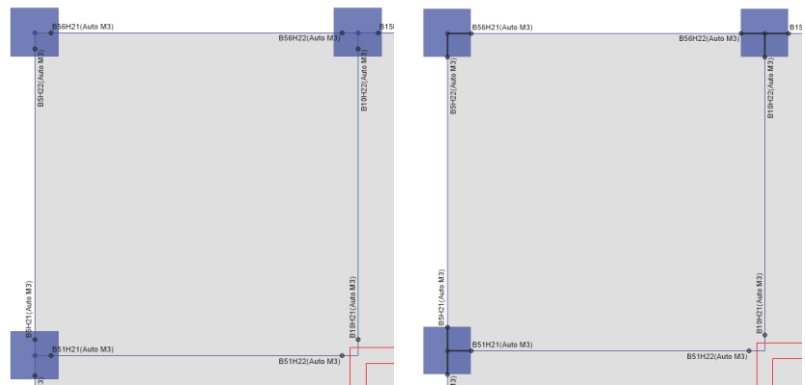


图 13 端部偏移对塑性铰位置的影响

默认铰是按照 ASCE41-17 规范自动生成的，因此设置时也应注意相关设置要满足规范要求。现对不同类型塑性铰的设置要求分别进行说明。

3.1 混凝土框架梁（M3 铰）

对于混凝土框架梁的默认铰是按照 ASCE41-17 中表 10-7 定义的。表 10-7 中将梁破坏分为了 4 种情况，但是目前 ETABS 中的默认铰只针对第一种情况。其主要与三个因素有关：受压钢筋相对配筋率、箍筋是否满足规范要求和剪压比，分别对应的是图 14a 中红框部分、紫框部分和蓝框部分。通过表 10-7 可以看出：当受压钢筋配置越多时，延性更好；箍筋满足规范时延性更好；剪压比越小延性越好。在图 14b 中红框部分，用户可以设置受压钢筋相对配筋率，其中 ρ 为受拉钢筋配筋率， ρ' 为受压钢筋配筋率， ρ_{bal} 是指 balanced ratio of tension steel reinforcement，对应的是混凝土受压破坏时恰好钢筋发生屈服时的钢筋配筋率，和中国规范中界限受压区高度（ ξb ）时的受拉钢筋配筋率相同。 ρ 和 ρ' 如果选择当前设计选项时，程序会自



动按照设计结果进行计算，如果在截面定义时输入了实配钢筋，则会按照实配钢筋计算。在图 14b 中紫框部分，用户可以设置箍筋是否满足规范要求。在图 14b 中蓝框部分，用户可以设置剪力值的来源，用户可以选择工况组合来确定构件的剪力，一般来讲可以使用 1.2D+0.6L+1.3Exy 组合，需要提醒的是，1.2D+0.6L+1.3Exy 组合下的剪力 $V_{组合}$ 与时程分析下的梁最大剪力 $V_{时程}$ 一般是不相同的，只要按 $V_{组合}$ 和 $V_{时程}$ 确定的铰骨架曲线相同，对计算结果是没有影响的，反之，如果按 $V_{组合}$ 和 $V_{时程}$ 确定的铰骨架曲线不同，对时程分析结果产生了影响，原则上是需要重新指定铰的骨架曲线。但是进行相关检查需要花费非常多的时间，也有用户偏于保守的考虑，通过用户指定选项，人为指定一个很大的数值，如 10000kN，使梁铰的骨架曲线偏于保守。

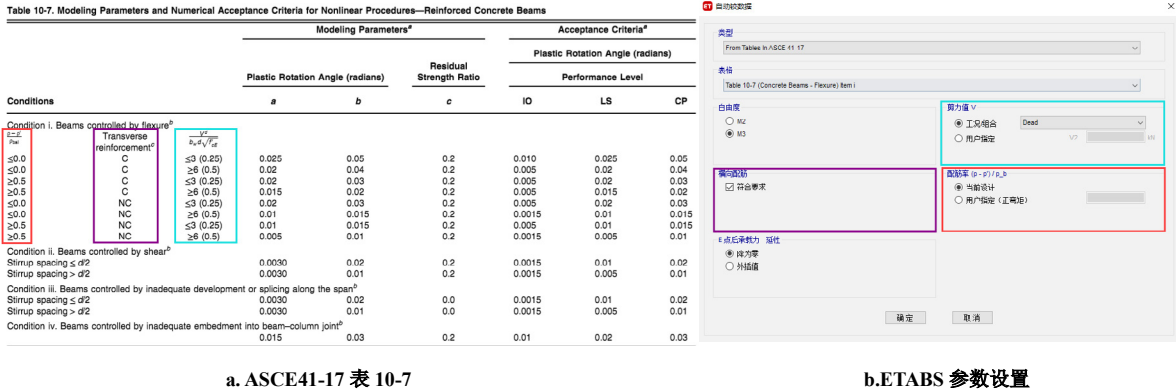


图 14 混凝土梁铰设置

3.2 混凝土框架柱 (P-M2-M3 铰)

对于混凝土框架柱的默认铰是按照 ASCE41-17 中表 10-9 定义的。其主要与三个因素有关：轴压比、抗剪配箍率和柱抗弯屈服对应的剪力与抗剪承载力的比值 V_{yE}/V_{CoIE} ，分别对应的是图 15a 中红框部分、紫框部分和蓝框部分。通过表 10-9 中公式可以看出，轴压比越小延性越好；抗剪配箍率越大延性越好； V_{yE}/V_{CoIE} 比值越小延性越好。在图 15b 中红框部分，用户可以选择柱轴力值的来源，其中 Gravity+Lateral 选项对应表 10-9 中 N_{UD} ，此项用于计算 a 值，Gravity 选项对应的是公式 10-3 中 N_{UG} ，此项用于计算 V_{CoIE} 。按照 ASCE41-17 中规定， N_{UD} 可按公式 7-34 计算，对应中国规范可取 1.2D+0.6L+1.3Exy 组合。按照 ASCE41-17 中规定， N_{UG} 可按公式 7-3 计算，对应中国规范可取 1.2D+0.6L 组合。在图 15b 中紫框部分，程序可自动按照设计结果计算抗剪配箍率，如果在截面定义时输入了实配箍筋，则会按照实配钢筋计算，当然用户也可人为指定。在图 15b 中蓝框部分，程序会自动计算 V_{yE}/V_{CoIE} 比值， V_{yE} 值与柱实配钢筋有关，而 V_{CoIE} 则按 ASCE41-17 中公式 10-3 进行计算。

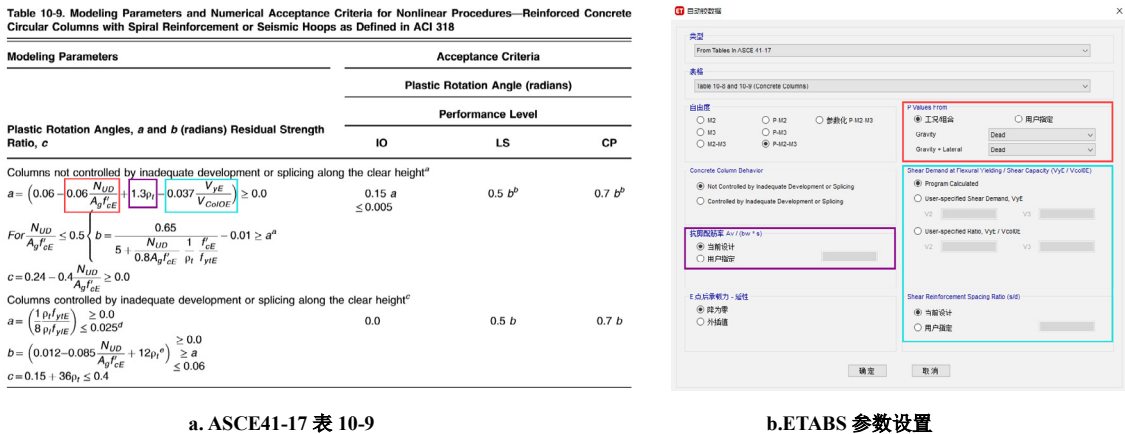


图 15 混凝土柱铰设置

3.3 钢框架梁 (M3 铰)

对于钢框架梁的默认铰是按照 ASCE41-17 中表 9-7.1 定义的。其与板件的宽厚比有关，这与中国规范是相类似的，由于宽厚比可直接通过截面信息获取到，因此用户无需进行额外设置，如图 16 所示。

Table 9-7.1. Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Structural Steel Beams and Columns—Flexural Actions

Modeling Parameters		Acceptance Criteria		
		Plastic rotation angle (radians) Performance Level		
Plastic rotation angle α and β (radians)		IO	LS	CP
Residual strength ratio c				
Beams				
1. Where: $\frac{b_f}{2t_f} \leq 0.30 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}}$		$a = 9\phi_y$ $b = 11\phi_y$ $c = 0.6$	0.25*	α
2. Where: $\frac{b_f}{2t_f} \geq 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}}$		$a = 4\phi_y$ $b = 6\phi_y$ $c = 0.2$	0.25*	0.75*
3. Other: Linear interpolation between the values on lines 1 and 2 for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lower resulting value shall be used.				

a. ASCE41-17 表 9-7.1

自动校数据

b. ETABS 参数设置

图 16 钢框架梁铰设置

3.4 钢框架柱 (P-M2-M3 铰)

对于钢框架柱的默认铰是按照 ASCE41-17 中表 9-7.1 定义的。其主要与三个因素有关：轴压比、板件宽厚比和计算长度，分别对应的是图 17a 中红框部分、紫框部分。在图 17b 中红框部分，用户可以选择柱轴力值的来源，按照 ASCE41-17 中规定， P_G 可按公式 7-3 计算，对应中国规范可取 1.2D+0.6L 组合，而宽厚比部分程序会自动读取截面信息而不必再进行设置。但是对于计算长度，程序会自动通过当前设计规范中读取无支撑长度系数和有效长度系数来计算计算长度，如图 18 所示，计算长度的变化会影响 PMM 相关面的计算。

Columns in Compression **

- Where: $\frac{b_f}{2t_f} \leq 0.30 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}}$ and $\frac{h}{t_w} \leq 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}}$
 For $\frac{P_u}{P_n} < 0.2$, $\frac{h}{t_w} \leq 2.45 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}} (1 - 0.3) \frac{P_u}{P_n}$
 For $\frac{P_u}{P_n} \geq 0.2$, $\frac{h}{t_w} \leq 0.77 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}} (2.93 \frac{P_u}{P_n}) \leq 1.49 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}}$
 $a = 0.8 (1 + \frac{P_u}{P_n})^{0.3} (0.1 \frac{h}{t_w} + 0.8 \frac{P_u}{P_n})^{-1} - 0.0035 \geq 0$
 $b = 7.4 (1 + \frac{P_u}{P_n})^{0.3} (0.5 \frac{h}{t_w} + 2.9 \frac{P_u}{P_n})^{-1} - 0.006 \geq 0$
 $c = 0.9 - 0.9 \frac{P_u}{P_n}$
- Where: $\frac{b_f}{2t_f} \geq 0.38 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}}$ or $\frac{h}{t_w} \geq 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}}$
 For $\frac{P_u}{P_n} < 0.2$, $\frac{h}{t_w} \geq 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}} (1 - 1.83 \frac{P_u}{P_n})$
 For $\frac{P_u}{P_n} \geq 0.2$, $\frac{h}{t_w} \geq 1.12 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}} (2.33 \frac{P_u}{P_n}) \geq 1.49 \sqrt{\frac{E}{F_{yw}}}$
 $a = 1.2 (1 + \frac{P_u}{P_n})^{0.3} (1.4 \frac{h}{t_w} + 0.1 \frac{P_u}{P_n} + 0.9 \frac{D}{2t_f})^{-1} - 0.0023 \geq 0$
 $b = 2.5 (1 + \frac{P_u}{P_n})^{0.3} (0.1 \frac{h}{t_w} + 0.2 \frac{D}{2t_f} + 2.7 \frac{D}{2t_f})^{-1} - 0.0097 \geq 0$
 $c = 0.5 - 0.6 \frac{P_u}{P_n}$

3. Other: Linear interpolation between the values on lines 1 and 2 for both flange slenderness (first term) and web slenderness (second term) shall be performed, and the lower resulting value shall be used.

a. ASCE41-17 表 9-7.1

自动校数据

b. ETABS 参数设置

图 17 钢框架柱铰设置

钢框架设计参数项为 Chinese 2018

选项	数值
16 考虑挠度?	是
17 Live Load Deflection Limit, L/	360
18 Total Load Deflection Limit, L/	240
19 Total-Camber Deflection Limit, L/	240
20 指定起拱, mm	0
21 净截面与毛截面面积比	0.9
22 活荷载折减系数	1
23 无支撑长度系数 (主)	1
24 无支撑长度系数 (次)	1
25 Effective Length Factor (Mue Major)	1
26 Effective Length Factor (Mue Minor)	1
27 Sway M Amplification Factor (Alpha Major)	1
28 Sway M Amplification Factor (Alpha Minor)	1

P-M2-M3 相关面的定义 C4H27

钢框架设计参数项 - Chinese 2018

选项	数值
16 考虑挠度?	是
17 Live Load Deflection Limit, L/	360
18 Total Load Deflection Limit, L/	240
19 Total-Camber Deflection Limit, L/	240
20 指定起拱, mm	0
21 净截面与毛截面面积比	0.9
22 活荷载折减系数	1
23 无支撑长度系数 (主)	1
24 无支撑长度系数 (次)	1
25 Effective Length Factor (Mue Major)	2
26 Effective Length Factor (Mue Minor)	2
27 Sway M Amplification Factor (Alpha Major)	1
28 Sway M Amplification Factor (Alpha Minor)	1

P-M2-M3 相关面的定义 C4H28

图 18 计算长度对屈服面的影响



3.5 钢支撑 (P 铰)

对于钢支撑的默认铰是按照 ASCE41-17 中表 9-8 定义的。其与板件的宽厚比和计算长度有关，这与中国规范是类似的，由于宽厚比可直接通过截面信息获取到，因此用户无需进行额外设置，如图 19 所示。计算长度对构件屈服力的影响可参考钢框架柱。

Table 9-8. Modeling Parameters and Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Structural Steel Components—Axial Actions

Component/Action	Modeling Parameters			Acceptance Criteria		
	Plastic Deformation		Residual Strength Ratio	Plastic Deformation		
	a	B		IO	LS	CP
Braces in Compression (except EBF braces)^{a,b}						
a. Slender $\lambda_c > 4.2\sqrt{E/F_y}$						
1. W, I, 2L in-plane ^c , 2C in-plane ^d	0.5 λ_c	10 λ_c	0.3	0.5 λ_c	8 λ_c	10 λ_c
2. 2L out-of-plane ^e , 2C out-of-plane ^e	0.5 λ_c	9 λ_c	0.3	0.5 λ_c	7 λ_c	9 λ_c
3. HSS, pipes, tubes	0.5 λ_c	9 λ_c	0.3	0.5 λ_c	7 λ_c	9 λ_c
4. Single angle	0.5 λ_c	12 λ_c	0.3	0.5 λ_c	9 λ_c	12 λ_c
b. Stocky $\lambda_c \leq 2.1\sqrt{E/F_y}$						
1. W, I, 2L in-plane ^c , 2C in-plane ^d	1 λ_c	8 λ_c	0.5	0.5 λ_c	7 λ_c	8 λ_c
2. 2L out-of-plane ^e , 2C out-of-plane ^e	1 λ_c	7 λ_c	0.5	0.5 λ_c	6 λ_c	7 λ_c
3. HSS, pipes, tubes	1 λ_c	7 λ_c	0.5	0.5 λ_c	6 λ_c	7 λ_c
c. Intermediate Linear interpolation between the values for slender and stocky braces (after application of all applicable modifiers) shall be used.						
Braces in Tension (except EBF braces)^{a-f}						
1. W	10 λ_T	13 λ_T	0.6	0.5 λ_T	10 λ_T	13 λ_T
2. 2L	9 λ_T	12 λ_T	0.6	0.5 λ_T	9 λ_T	12 λ_T
3. HSS	9 λ_T	11 λ_T	0.6	0.5 λ_T	8 λ_T	11 λ_T
4. Pipe	8 λ_T	9 λ_T	0.6	0.5 λ_T	7 λ_T	9 λ_T
5. Single angle	10 λ_T	11 λ_T	0.6	0.5 λ_T	8 λ_T	10 λ_T
Columns in tension (except EBF Columns) ^g	5 λ_T	7 λ_T	1.0	0.5 λ_T	6 λ_T	7 λ_T
Buckling-Restrained Braces ^{h,i}	13.3 λ_c	13.3 λ_c	1.0	3.0 λ_c	10 λ_c	13.3 λ_c

a. ASCE41-17 表 9-8

b. ETABS 参数设置

图 19 钢支撑轴力铰设置

4. 小结

本文介绍了塑性铰的分类、属性组成、以及默认塑性铰的参数设置。用户需要依据构件可能发生的破坏形式选择合理的塑性铰类型。关于塑性铰的属性，用户需要查看塑性铰的骨架曲线、滞回曲线和可接受准则，以确保铰的属性是符合预期的。默认的塑性铰是依据 ASCE41-17 规范的要求生成的，本文详细说明了默认塑性铰的参数与规范的关联，希望能帮助工程师们正确定义和使用塑性铰。

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] American Society of Civil Engineers. ASCE 41-17 Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings[S]. 2017