

ETABS 钢筋混凝土梁默认弯矩较验证算例

筑信达 Mike 刘慧璇

塑性铰用于结构构件屈服后行为的模拟，塑性铰的参数主要包括骨架曲线、滞回关系和可接受准则。美国基于长期对抗震性能化设计的研究，形成了一系列技术标准和规范。ASCE 41 是其中一本重要标准，建立了一套严格的性能评估体系，其中就包括对构件破坏时的力-变形关系(骨架曲线)和可接受准则的详细规定。ETABS 的默认铰就是基于构件截面信息和 ASCE 41 的相关规定自动生成。ETABS V18 及以上版本提供了 ASCE41-13、ASCE41-17 两本规范供用户选择，自动生成基于所选规范的塑性铰。本文将以一个 300mm X 600mm 的钢筋混凝土梁为例，通过手算结果验证程序基于规范 ASCE41-13 对钢筋混凝土梁生成的默认弯矩铰。

1. 默认弯矩铰的定义

本例定义了一个 300mm X 600mm 的混凝土梁，材料强度、梁截面尺寸、配筋等信息见图 1 和图 2 所设。需要说明的是，程序在计算默认铰的属性时，钢筋强度采用的“期望屈服强度”，根据中国规范采用钢筋强度标准值，故在“期望屈服强度”中输入 400MPa。



图 1 材料强度信息

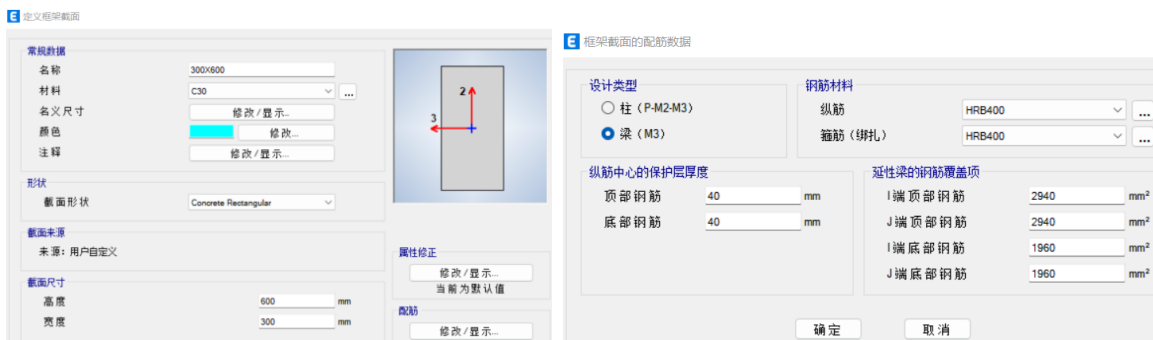


图 2 梁截面尺寸及配筋

本例假定在梁端布铰，选中该梁，点击【指定>框架>铰】，在“指定数据”一栏中，“铰属性”选择“自动”，“位置类型”选择“Relative to clear length”，“相对距离”填 0，点击“添加”，出现图 3 所示的“自动铰数据”对话框。

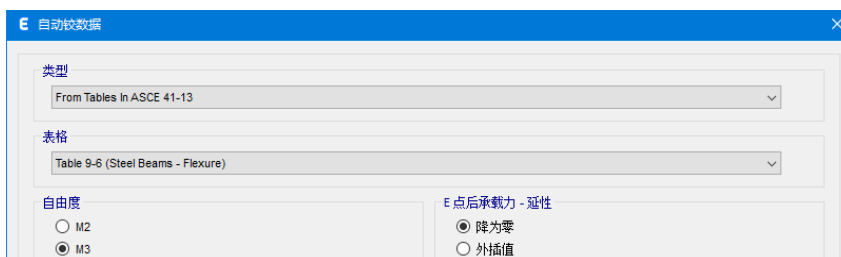


图 3 自动铰数据



在弹出的对话框中定义默认铰属性。“类型”中选择需要执行的规范，本文采用 ASCE 41-13，“表格”中基于对应的构件类型选择，此处采用混凝土梁抗弯相关的 Table10-7，对话框下方将出现对应的默认铰定义参数，如图 4，接下来对这些参数进行说明^[1]。

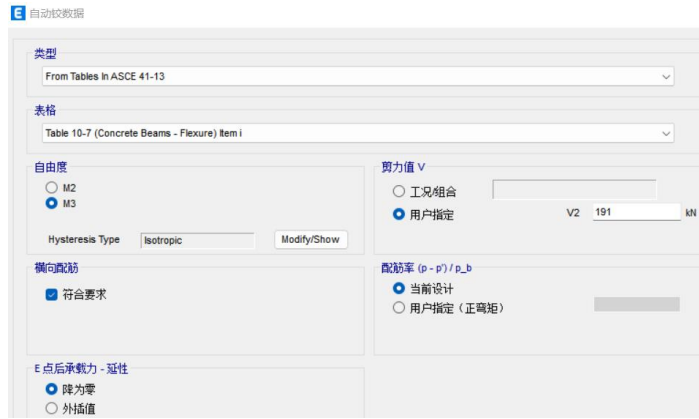


图 4 自动铰数据定义

“自由度”是塑性行为的自由度。本例中梁的主轴方向弯矩绕 3 轴，故而在“自由度”中选择 M3。下方的“Hysteresis Type”是指其滞回模型。常用于钢筋混凝土的滞回模型有 Takeda、Pivot，本例选择 Takeda。每种滞回模型的详细解释请见 ETABS 的联机帮助。

“横向配筋”是指当前构件截面采用的横向配筋是否满足规范要求。按中国规范设计得到的横向钢筋均符合要求，故勾选“符合要求”。本文第二节将对这项进行详细解释。

“E 点后承载力-延性”表示塑性铰丧失承载力之后的行为，本例选“降为零”。

“剪力值 V”，根据 ASCE 41-13 中 Table 10-7 的定义，V 应该采用非线性分析中得到的最大内力，是竖向内力与地震内力的叠加，理论上来说在计算之前无法知道非线性内力的数值，应该通过迭代得到真实剪力。因本文的重点在于塑性铰的验算，此处假定此剪力值为 191kN。

“配筋率”，本例采用来自“当前设计”。

点击“确定”，完成铰的布置。

2. 默认弯矩铰数据

铰添加在构件上后，可以在【定义>截面属性>框架铰】弹出的对话框中勾选查看生成的铰数据，如图 4 所示。

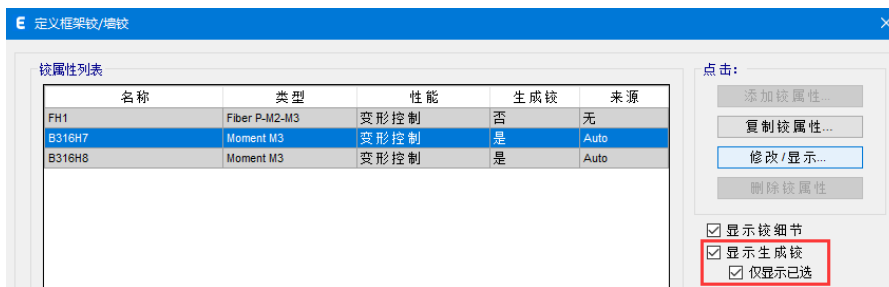


图 4 自定义铰对话框

选中需要查看的铰，点击右侧的“修改/显示”，可以看见铰属性数据，如图 5 所示。铰数据基于选择的规范 ASCE41-13 中的 Table10-7 生成。如图 6 所示，ASCE41-13 中 Table10-7 对钢筋混凝土梁铰的可接受准则进行了详细的规定^[1]。

第①项 Conditions 用于描述梁的破坏状态，从 i 到 iv 项分别为弯曲破坏、剪切破坏、梁跨内的钢筋搭接破坏、节点锚固破坏（后面三个选项多针对按早期规范设计的已有建筑的校核），中国规范的设计原则是强剪弱弯、强搭接、强节点，故按中国规范设计得到的梁是弯曲破坏，即图 6 中标黄的类别。对于弯曲破坏的梁，其骨架曲线和可接受准则由三个因素决定，其中

$\frac{p-p'}{\rho_{bal}}$ 用于描述配筋情况，Transverse reinforcement 项指的是箍筋（横向配筋）是否满足规范要求， $\frac{V}{b_w d \sqrt{f_c}}$ 指的是抗剪需求能

力比。

第②项 Modeling Parameters 用于确定构件的骨架曲线，如图 7 所示，a 为 BC 段的长度，体现截面的延性，b 为 BE 段的长度，体现构件的最大塑性变形能力，c 是残余强度比。

第③项 Acceptance Criteria 用于确定铰的可接受准则。IO(Immediate Occupy)、LS(Life Safety)、CP(Collapse Prevention)表示了破坏从轻到重不同的性能等级（塑性转角）。



图 5 自动生成的铰数据

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

1	2 Modeling Parameters ^a			3 Acceptance Criteria ^a		
	Plastic Rotations Angle (radians)		Residual Strength Ratio	Plastic Rotations Angle (radians)		
	a	b	c	Performance Level		
Conditions				IO	LS	CP
Condition i. Beams controlled by flexure ^b						
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Transverse reinforcement ^c	$\frac{V}{b_s d \sqrt{f'_c}}$				
≤ 0.0	C	≤ 3 (0.25)	0.025	0.010	0.025	0.05
≤ 0.0	C	≥ 6 (0.5)	0.02	0.005	0.02	0.04
≥ 0.5	C	≤ 3 (0.25)	0.02	0.005	0.02	0.03
≥ 0.5	C	≥ 6 (0.5)	0.015	0.005	0.015	0.02
≤ 0.0	NC	≤ 3 (0.25)	0.02	0.005	0.02	0.03
≤ 0.0	NC	≥ 6 (0.5)	0.01	0.0015	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≤ 3 (0.25)	0.01	0.005	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≥ 6 (0.5)	0.005	0.0015	0.005	0.01
Condition ii. Beams controlled by shear ^b						
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing $> d/2$			0.0030	0.0015	0.005	0.01
Condition iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span ^b						
Stirrup spacing $\leq d/2$			0.0030	0.0015	0.01	0.02
Stirrup spacing $> d/2$			0.0030	0.0015	0.005	0.01
Condition iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint ^b						
			0.015	0.01	0.02	0.03

图 6 ASCE41-13 Table10-7

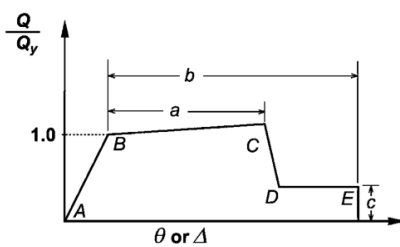


图 7 ASCE41-13 中混凝土单元或构件广义力-变形关系

3. 默认弯矩铰的验证

接下来手算本例混凝土梁的骨架曲线、可接受准则和屈服强度。

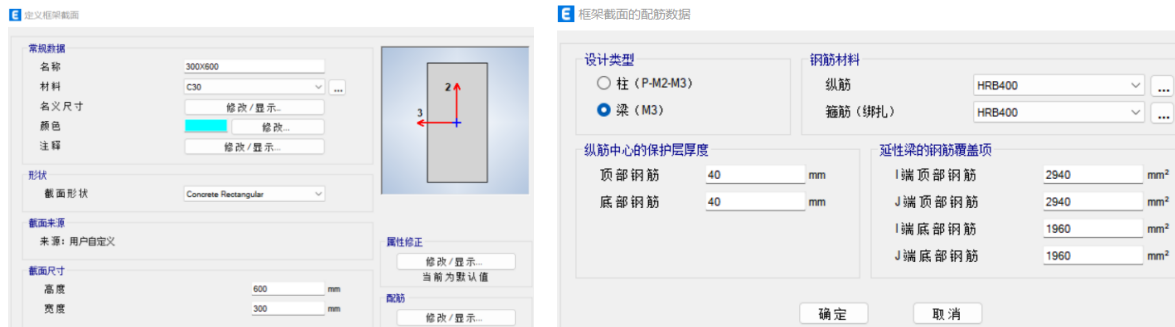


图 8 梁截面尺寸及配筋

3.1 变形控制参数和可接受准则的验算

对于正弯矩（即底部受拉）：

$$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}} < 0 ; \quad \frac{V}{b_{wd}d\sqrt{f'_c}} = \frac{191000}{300 \times (600 - 40) \times \sqrt{20.1}} \approx 0.25$$

式中 ρ 为受拉侧纵筋配筋率， ρ' 为受压侧纵筋配筋率， ρ_{bal} 为单筋截面超筋界限配筋率， b_{wd} 为截面宽度， d 为截面有效高度。根据计算结果，为图 6 中黄色区域第一行对应的情况，即骨架曲线中 $a=0.025$ 、 $b=0.05$ 、 $c=0.2$ ，可接受准则 $IO=0.01$ ， $LS=0.025$ ， $CP=0.05$ ，如图 6 中浅蓝和浅绿区域，可以看见，与程序默认生成的数据一致（图 5 中蓝色和绿色区域）。

对于负弯矩（即顶部受拉）^[2]：

$$\rho_{bal} = \frac{\xi_b f_c b h_0}{f_y A} = \frac{0.518 \times 20.1 \times 300 \times (600 - 40)}{400 \times (300 \times 600)} = 0.024 \quad (\text{混规 } 6.2.7-1、6.2.10); \quad \frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}} = \frac{(2940 - 1960) / (300 \times 600)}{0.024} = 0.225;$$

$$\frac{V}{b_{wd}d\sqrt{f'_c}} \approx 0.25$$

根据计算结果，按图 6 黄色区域第一、三行线性插值，可得 $a=0.0225$ ， $b=0.04$ ， $c=0.2$ ， $IO=0.0075$ ， $LS=0.0225$ ， $CP=0.04$ ，与自动生成的数据（图 5 中紫色和黄色区域）存在细微差异，这是中美规范在计算 ρ_{bal} 等参数时略有差别造成的（例如钢筋与砼极限应变的规定、相对界限受压区高度的计算方法等）。

3.2 屈服弯矩的验算

基于混规，近似计算双筋截面弯矩承载力如下^[2]：

$$\text{正弯矩承载力 } f_y A_s (h_0 - a) = 400 \times 1960 \times (600 - 80) = 408 \text{ kN}\cdot\text{m};$$

$$\text{负弯矩承载力 } f_y A_s (h_0 - a) = 400 \times 2940 \times (600 - 80) = 612 \text{ kN}\cdot\text{m}.$$

图 5 中所示正、负弯矩承载力分别为 407.68 kN·m、523 kN·m。正弯矩承载力与手算结果完全相符，而配筋较多的负筋侧受弯时有较大差距，对比发现软件在处理双筋截面配筋较大侧受弯承载力时近似采用单筋截面算法，验证如下：

根据混规 6.2.10-2， $f_y A_s = \alpha_1 f_c b x$ ，可得 $x=195\text{mm}$ ，则 $M=f_y A_s (h_0 - a - x/2) = 544\text{kN}\cdot\text{m}$ ，与程序输出的 523 kN·m 较接近。

4. 结语

ETABS 中内置了 ASCE41-17 和 ASCE41-13 两本规范对应的塑性铰供工程师选用，仅需设置构件的配筋情况（配筋信息可以自定义，也可以来自 ETABS 设计结果），程序便能基于所选规范自动生成塑性铰，确定构件变形的可接受准则。本文通过手算结果详细验证了程序基于 ASCE41-13 生成的弯曲铰参数，供广大工程师参考。

参考资料

[1] ASCE/SEI 41-13. 2013

[2] 混凝土结构设计规范：GB50010—2010(2015 版) [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.