

ETABS 钢筋混凝土柱默认 PMM 铰验证算例

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 500mm X 500mm 的钢筋混凝土柱为例，通过手算结果验证程序基于规范 ASCE41-13 对混凝土柱生成的默认 PMM 铰。

1. 默认 PMM 铰的定义

本例定义了一个 500mm X 500mm 的混凝土柱，材料强度、柱截面尺寸、配筋等信息见图 1 和图 2 所示。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

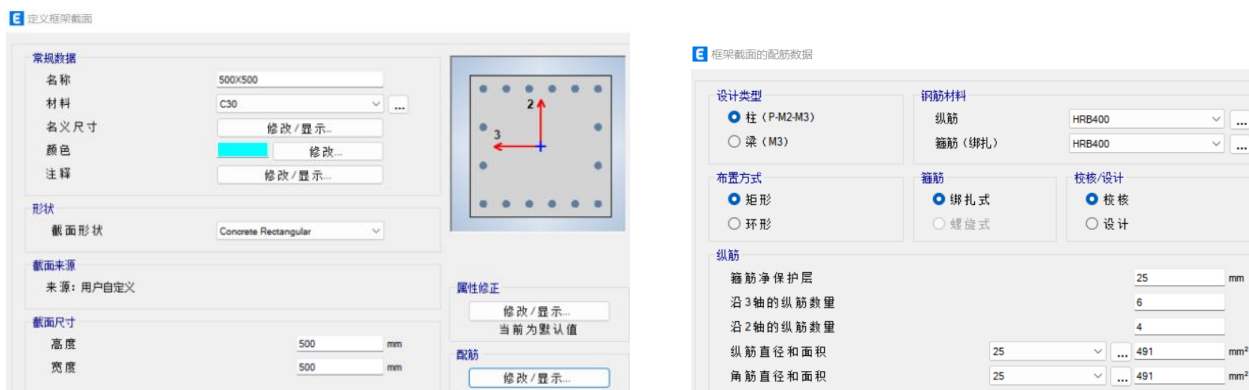


图 2 柱截面尺寸及配筋

本例假定在柱端布铰，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。

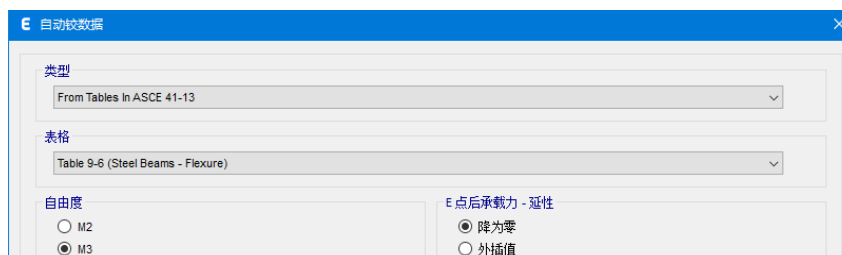


图 3 自动铰数据



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，此处采用混凝土柱相关的 Table 10-8，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]。

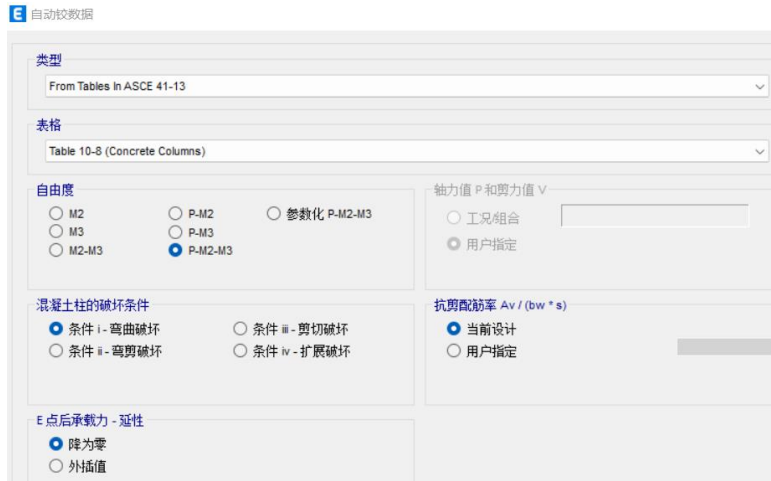


图 4 自动铰数据定义

“自由度”是塑性行为的自由度。本例中柱考虑压/拉弯，故人选 P-M2-M3。

“混凝土柱的破坏条件”按 ASCE41-13 表 10-11 判断，用于描述柱的破坏状态，从 i 到 iv 项分别为弯曲破坏、弯剪破坏、剪切破坏、柱跨内的钢筋搭接破坏。

如图 5 所示，表中 V_p 为抗剪需求， V_0 为抗剪能力。实际情况下载为压/拉弯状态，计算时需考虑轴力，本例简化为纯弯状态进行计算，设柱净跨 $L_n=3m$ ，计算如下。

①局部 2 轴方向：

$$M_{p2} = f_y A_s L = 400 \times 491 \times 4 \times (500 - 45 \times 2) = 322 \text{ kN} \cdot \text{M}$$

$$V_{p2} = \frac{2M_{p2}}{L_n} = \frac{2 \times 322}{3} = 215 \text{ kN}$$

$$V_{02} = 0.7f_c b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 = 0.7 \times 2.01 \times 500 \times 455 + 400 \times \frac{78.5 \times 4}{100} \times 455 = 320 + 570 = 890 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{p2}}{V_{02}} = \frac{215}{890} = 0.24 < 0.6$$

②局部 3 轴方向：

$$M_{p3} = f_y A_s L = 400 \times 491 \times 6 \times (500 - 45 \times 2) = 483 \text{ kN} \cdot \text{M}$$

$$V_{p3} = \frac{2M_{p3}}{L_n} = \frac{2 \times 483}{3} = 323 \text{ kN}$$

$$V_{03} = 0.7f_c b h_0 + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} h_0 = 0.7 \times 2.01 \times 500 \times 455 + 400 \times \frac{78.5 \times 4}{100} \times 455 = 320 + 570 = 890 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{p3}}{V_{03}} = \frac{323}{890} = 0.36 < 0.6$$

局部 2 轴与 3 轴之间的各角度，可认为抗剪需求能力比介于两者之间，即均小于 0.6，故所有方向均为 Condition i，因此选择弯曲破坏。

“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”。

“抗剪配筋率”，本例采用来自“当前设计”。

点击“确定”，完成铰的布置。

Table 10-11. Transverse Reinforcement Details: Condition to Be Used for Columns in Table 10-8

Shear Capacity Ratio	ACI 318 Conforming Seismic Details with 135-Degree Hooks	Closed Hoops with 90-Degree Hooks	Other (Including Lap-Spliced Transverse Reinforcement)
$V_p/V_c \leq 0.6$	i ^a	ii	ii
$1.0 \geq V_p/V_c > 0.6$	ii	ii	iii
$V_p/V_c > 1.0$	iii	iii	iii

图 5 ASCE41-13 表 10-11

2. 默认 PMM 铰数据

铰添加到构件上后，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 6 所示。



图 6 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 7 所示。

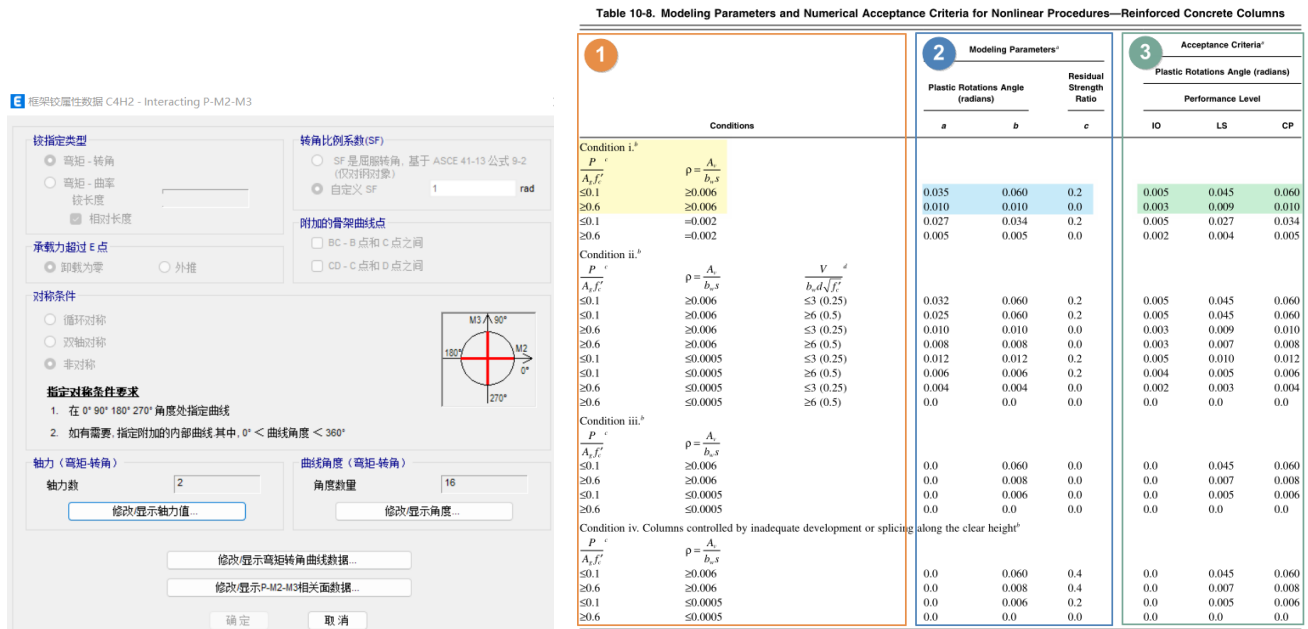


图 7 自动生成的铰数据

图 8 ASCE41-13 Table10-8

铰数据基于选择的规范 ASCE41-13 中的 Table10-8 生成。如图 8 所示，ASCE41-13 中 Table10-8 对钢筋混凝土柱铰的可接受准则进行了详细的规定^[1]。

第①项 Conditions 用于描述柱的破坏状态，如上节所述，采用 Condition i 弯曲破坏。

第②项 Modeling Parameters 用于确定构件的骨架曲线，如图 9 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）。

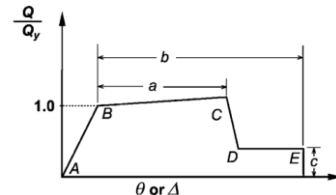


图 9 ASCE41-13 中混凝土单元或构件广义力-变形关系

3. 默认弯矩铰的验证

接下来手算本例混凝土柱的骨架曲线、可接受准则和屈服强度。

3.1 变形控制参数和可接受准则的验算

根据表 10-8 (图 8), 对于弯曲破坏的柱, 其骨架曲线和可接受准则由两个因素决定, 其中 $\frac{P}{A_g f'_c}$ 用于描述轴压比, $\rho = \frac{A_v}{b_w s}$ 指的是配筋率。本例采用四肢 $\phi 10$ 的箍筋, 箍筋间距 100mm, 则配筋率为 $\frac{78.5 \times 4}{500 \times 100} = 0.00628 > 0.006$ 。根据计算结果, 为图 8 中黄色区域对应的情况, 即:

$P = 0.1 A_g f'_c = 0.1 \times 500^2 \times 20.1 = 502.5 \text{ kN}$ 时, 骨架曲线中 $a=0.035$ 、 $b=0.06$ 、 $c=0.2$, 可接受准则 $IO=0.005$ 、 $LS=0.045$ 、 $CP=0.06$;

$P = 0.6 A_g f'_c = 0.6 \times 500^2 \times 20.1 = 3015 \text{ kN}$ 时, 骨架曲线中 $a=0.01$ 、 $b=0.01$ 、 $c=0$, 可接受准则 $IO=0.003$ 、 $LS=0.009$ 、 $CP=0.01$ 。

点击图 7 中的“修改/显示弯矩转角曲线数据”, 可以在图 10 所示的对话框中查看不同轴力下的骨架曲线和可接受准则, 几乎与表 10-8 吻合。对于轴力 3015kN 时, 考虑到 CD 直线下降容易导致计算失效, 故加一个小数使其有一定斜率。

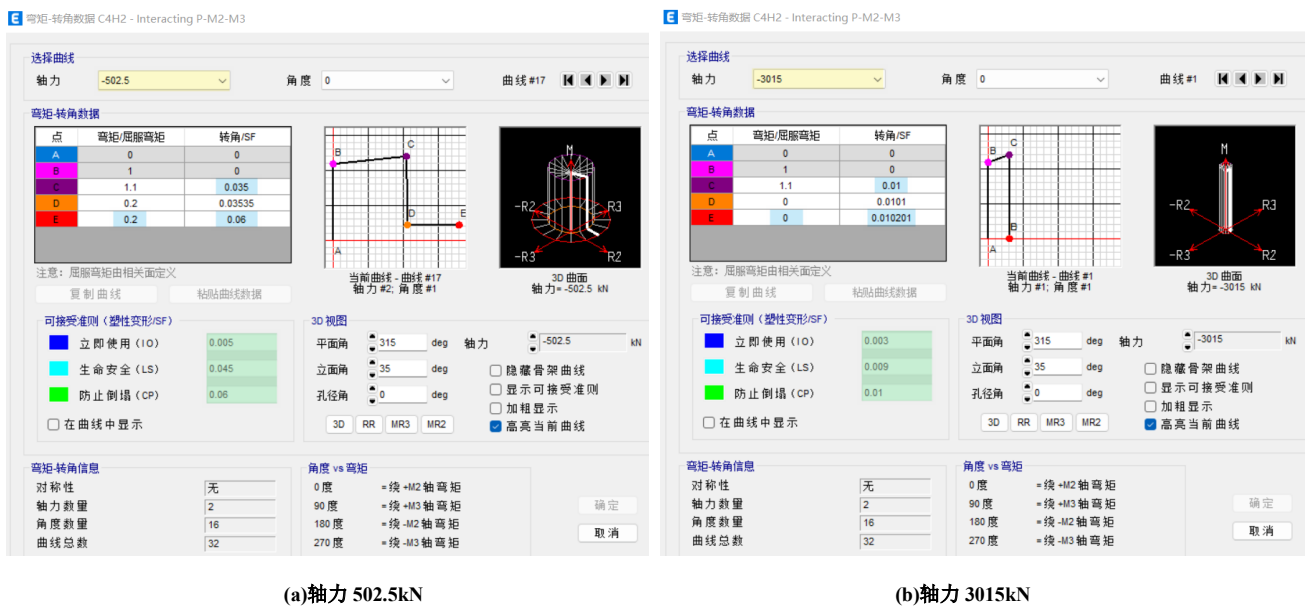


图 10 弯矩-转角数据

3.2 屈服承载力的验算

基于混规 6.2.15 和 6.2.22, 计算混凝土柱的轴心受压/拉承载力如下^[2]:

$$P_c = 0.9\varphi(f_c A + f_y A_s) = 0.9 \times (20.1 \times 500 \times 500 + 400 \times 16 \times 491) = 7350 \text{ kN}$$

$$P_t = f_y A_s = 400 \times 491 \times 16 = 3142 \text{ kN};$$

基于 XTRACT 验算纯弯时承载力为 520~580kN 之间, 如图 11 所示。

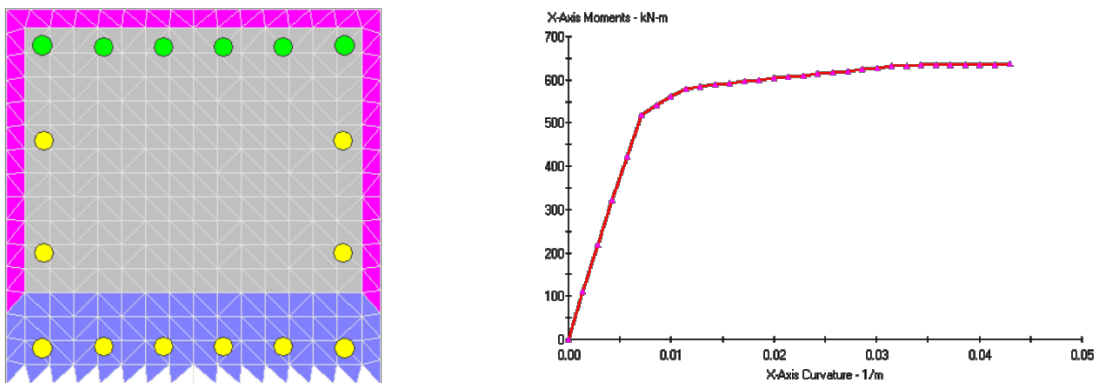


图 11 XTRACT 纯弯极限承载力计算



点击图 7 中的【修改-显示 P-M2-M3 相关面数据】>【定义/显示自定义相关面】，程序自动计算的相关面上各相关线数据如图 12 所示。因为正截面设计基于平截面假定与材料本构关系，所以本质上是一种力学方法，各国的规定都是一样的，GB 50010-2010 E.0.1 详细描述了计算方法。“相关曲线数据”中给出了每条曲线上的数据除以比例系数 SF 的数值，比例系数乘以相关曲线数据即为各点承载力数值。1 点和 11 点的 P 表示柱仅受压和仅受拉时的承载力；M₂、M₃ 分别表示绕 2、3 轴在有利轴压力作用下各自承载力中的较大值。可以看见轴心受压承载力为 7278.82kN，轴心受拉承载力为 0.4316*7278.82=3130kN，纯弯时承载力为 0.75*750.98=563kN，与上述手算、验算结果很接近。

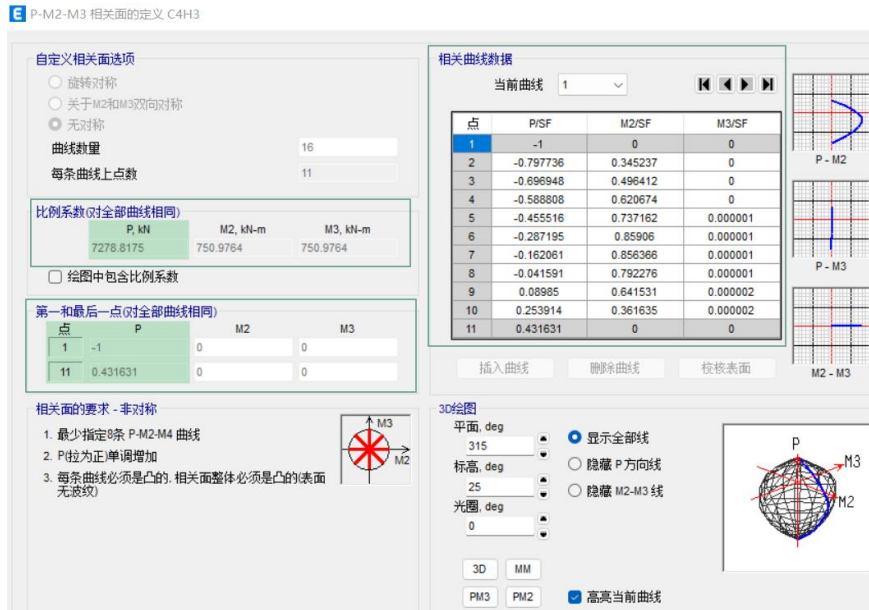


图 12 PMM 相关面数据

4. 结语

ETABS 中内置了 ASCE41-17 和 ASCE41-13 两本规范供工程师选用，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 生成的钢筋混凝土 PMM 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.