

ETABS 美标混凝土框架设计要点详解 (一) —— 框架柱设计

筑信达 李立

梁、柱等构件在 ETABS 中用框架单元来模拟。框架单元的设计类型则由该框架单元的截面属性决定（即图 1 左上方，选择“设计类型”）。所以，无论框架单元在模型中处于何种位置（竖直、倾斜、水平等），只要被赋予柱类型的截面，程序均按所选规范进行柱构件的设计。本文将基于 ACI 318-14 规范（以下简称 ACI）讨论钢筋混凝土柱设计在 ETABS 中的实现细节。

1 ETABS 柱设计的通用准则

1.1 设计流程

钢筋混凝土柱在 ETABS 中的一般设计流程包括：（1）为不同的柱截面分别生成其轴力-双向弯矩相关曲面（即 PMM 相关面）；（2）在每根柱的两端，分别为来自各个荷载组合下的设计轴力及弯矩校核其承载能力，并基于此计算所需配筋（或计算给定配筋方案的能力比率）；（3）根据设计剪力和轴力进行斜截面设计。

可以看出，PMM 相关面是柱设计的基础，而柱的配筋信息是生成 PMM 相关面的基础数据之一。所以在定义柱截面时，需要指定纵筋的数量和直径（见图 1）。当柱截面用于设计时，纵筋信息是初始值，程序会自动迭代给出最优结果（此时纵筋的分布数量不会变，直径改变）。当柱截面用于校核时，纵筋信息是确定值，由程序判断其承载力是否满足要求。



图 1 定义柱截面对话框

1.2 柱长度

ETABS 中有两个长度系数来控制柱长度：无支撑长度系数 (Unbraced length ratio)、有效长度系数 (Effective length factor)。

无支撑长度指柱在约束间的净长度。柱端约束可以是与之相连的梁、刚性隔板束缚、支座等等。程序根据是否有约束来判断柱在两个方向上的无支撑长度系数，从而识别柱的实际长度。所以，当模型中出现跨层柱、柱被人为打断、柱在主轴有约束而次轴无约束等情况时，程序仍然能正确判断柱长度。

有效长度系数对应于设计规范中基于稳定概念给出的计算长度系数，程序根据所选择的规范自动计算。

以上长度系数都可以通过设计覆盖项人为调整，见图 5 第 4、5、6、7 项。

由上可知，ETABS 进行框架设计时，柱的计算长度=柱对象长度（节点间距离）×无支撑长度系数×有效长度系数。

2 美标柱设计要点实现

2.1 PMM 相关面

计算 PMM 相关面是柱设计的前提，典型的 PMM 相关面如图 2 所示。该曲面由若干相关曲线构成，相关曲线上的点对应柱截面的某个受力状态。前提是，柱截面符合平截面假定，且柱截面配筋已知。

程序计算 PMM 相关面时，考虑相应的 ACI 规范要求包括：忽略混凝土的抗拉能力、混凝土极限应变 $\epsilon_c = 0.003$ (ACI 22.2.2.1)、钢筋屈服后应力取为屈服强度 $\epsilon_s E_s \leq f_y$ (ACI 22.2.3.1, 20.2.2.1)、计算混凝土受压区等效矩形应力区 (ACI 22.2.2.4)、考虑强度折减系数 ϕ 的影响 (ACI 21.2.2, Table 21.2.2)、考虑最大受压承载力 (ACI 22.4.2.1, 22.4.2.2) 等等。

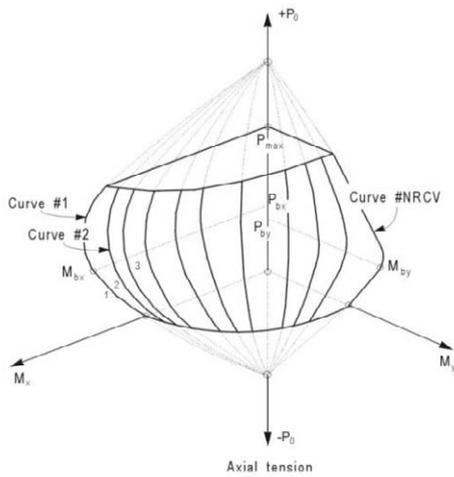


图 2 PMM 相关面

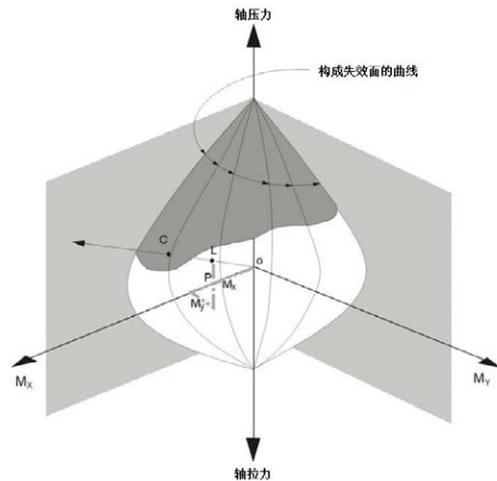


图 3 计算柱的承载能力比率的几何示意图

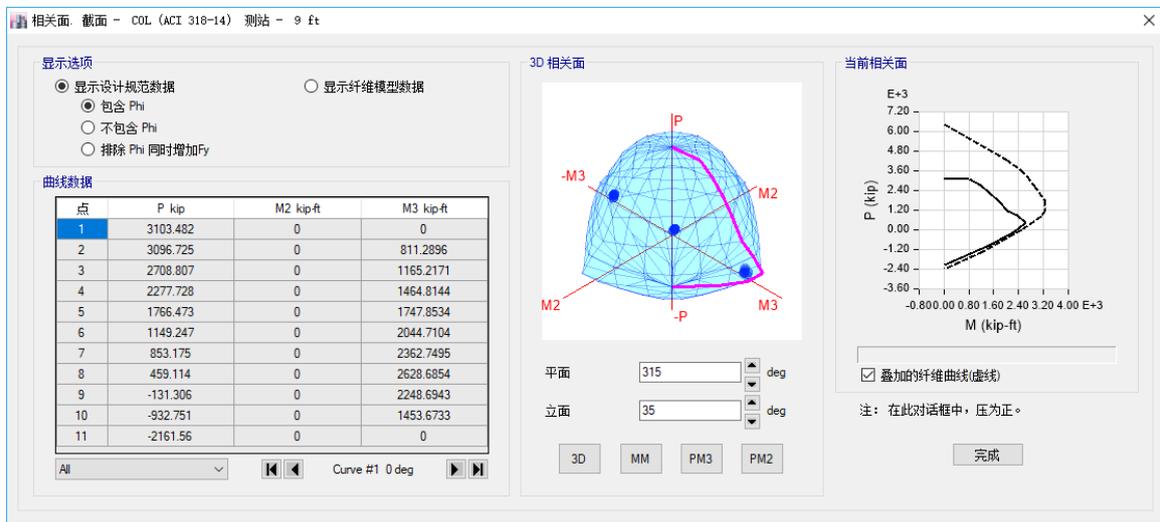


图 4 ETABS 输出的相关面

柱的一组设计内力 (P, M2, M3) 对应 PMM 空间的一个点 L, L 与坐标原点 O 的连线为 OL, 沿 OL 方向 L 点在 PMM 相关面上的投影点为 C。此时, 柱的承载能力比率 (简称 D/C) 即线段 OL 与线段 OC 的长度比值。若 OL=OC, 则 D/C=1, 代表承载能力处于临界状态; 若 OL<OC, 则 D/C<1, 代表承载能力满足要求; 若 OL > OC, 则 D/C>1, 代表承载能力不足。程序将基于柱两端测站位置处所有荷载组合下的 D/C 的结果来计算配筋面积, 或校核配筋方案。

完成设计后, 可以在 ETABS 中查看所有柱构件的 PMM 相关面数据, 如图 4 所示, 这里显示了每条 PM 曲线的相关数据, 这些数据可以按设计强度、名义强度、最大可能强度分别计算, 也可由纤维模型算得。例如图 4 右侧, 实线为由设计强度 (即考虑 ϕ 值) 算得的 PM 曲线, 虚线为用纤维模型计算的 PM 曲线, 可以看到强度折减系数 ϕ 对 PMM 曲面的影响

2.2 考虑二阶效应的弯矩调整

对于二阶效应的影响, ACI 规定, 对因框架侧移产生的 P- Δ 效应, 柱弯矩按式 (1) (ACI 6.6.4.6.1) 进行调整; 对于因构件挠曲产生的 P- δ 效应, 柱弯矩按式 (2) (ACI 6.6.4.5.2) 进行调整。

$$M = M_{ns} + \delta_s M_s \quad (1)$$

$$M_c = \delta_{ns} M \quad (2)$$

式中, 下标 ns 即 no sway, 下标 s 即 sway, 分别指代重力荷载作用和水平荷载作用下的分量。

由于 ETABS 可以在分析中考虑 P- Δ 效应, 所以放大系数 δ_s 默认值为 1。放大系数 δ_{ns} 与参数 C_m (ACI 6.6.4.5.3)、计算长度系数 k 有关, C_m 由程序自动计算。k 值对于无侧移柱可取为 1, 而有侧移柱则不小于 1。如果在分析中已考虑了 P- Δ 效应,



柱的有效长度系数可直接取为 1，程序的默认值是 1。 δ_{ns} 、 δ_s 、 C_m 、 k 都可通过设计覆盖项人为修改（见图 4 红框中的参数），在输出的设计细节中可查看相应的结果。

此外，柱端弯矩在两个方向上应分别满足最小偏心矩的要求（ACI 6.6.4.5.4），程序默认自动执行，用户也可人为取消（即图 4 第 14 项 Consider Minimum Eccentricity?选择“否”）。

ETABS 通过预设 P- Δ 选项来考虑 P- Δ 效应，如图 5 所示（命令路径：定义>预设 P-Delta 选项）。在该对话框中，需要指定用于二阶效应分析的竖向荷载作用，通常我们根据设计荷载组合中，含有侧向荷载的组合里竖向荷载设计值最大的那组，选择其中的竖向荷载及比例系数。对于美标，一般建议荷载模式取 1.2*恒载+1.6*活载，这是偏于保守的。

选项	数值	
01	Current Design Section	COL
02	Framing Type	Sway Special
03	Live Load Reduction Factor	0.640149
04	Unbraced Length Ratio (Major)	0.75
05	Unbraced Length Ratio (Minor)	0.75
06	Effective Length Factor (K Major)	1
07	Effective Length Factor (K Minor)	1
08	Moment Coefficient (Cm Major)	1
09	Moment Coefficient (Cm Minor)	1
10	NonSway Moment Factor (Dns Major)	1
11	NonSway Moment Factor (Dns Minor)	1
12	Sway Moment Factor (Dns Major)	1
13	Sway Moment Factor (Dns Minor)	1
14	Consider Minimum Eccentricity?	是
15	Seismic Detailing in CSXCAD?	是

图 5 混凝土框架柱设计覆盖项

预设 P-Delta 选项

自动方法

无

非迭代 - 基于质量

迭代 - 基于荷载

迭代 P-Delta 荷载工况

荷载模式	比例系数
Live	1.6
Dead	1.2
Live	1.6

相对收敛容差: 0.0001

按钮: 确定, 取消, 添加, 修改, 删除

图 6 预设 P-Delta 选项对话框

2.3 强柱弱梁验算

特殊抗弯框架在含有地震的荷载组合下，柱的抗弯能力应满足下式要求（ACI 18.7.3.2）：

$$\sum M_{nc} \geq (6/5) \sum M_{nb}$$

$\sum M_{nc}$ $\sum M_{nb}$ 分别为节点处相应柱、梁的名义抗弯强度。程序自动进行以上判断，分别输出柱的主次轴两个方向的结果，若不满足要求将给出警告。如图 7 是设计细节的输出结果，主轴方向梁柱抗弯承载力比为 0.879，满足要求；次轴方向由于没有梁与柱相交，故无需计算。该结果也可通过图 8 所示的命令在视图中显示。

梁柱抗弯承载力比

	(6/5)B/C Major	(6/5)B/C Minor	Col/Beam Major	Col/Beam Minor
顺时针	0.879	0.000	1.365	N/N
逆时针	0.879	0	1.365	N/N

图 7 设计细节输出

Display Concrete Frame Design Results

Design Output (6/5) Beam/Column Capacity Ratio:

Design Input

按钮: 确定, 关闭, 应用

图 8 显示设计结果

应该注意的是，美标关于“强柱弱梁”的验算是基于实际配筋进行的，并不是单纯地只调整内力。程序也是根据计算配筋来验算梁柱的抗弯承载力。而且，如果用户在定义截面时输入了实配钢筋，程序将依据输入的实配钢筋来验算强柱弱梁。

2.4 设计剪力确定

为了满足不同延性的抗震设计要求，ACI 对于不同类型框架，柱设计剪力的取值要求不同。下表总结了相关的规定，ETABS 按此自动计算。用户可通过设计覆盖项修改框架类型（即图 4 第 2 项 Framing Type）。



表 1 美标框架柱设计剪力取值要求

特殊抗弯框架 SMF Special Moment Frames	中等抗弯框架 IMF Intermediate Moment Frames	普通抗弯框架 Ordinary Moment Frames
取以下两者的小值： a) 根据柱端最大可能抗弯强度计算的剪力值 b) 根据与柱相连的梁端最大可能抗弯强度计算的剪力值 且不小于设计荷载组合下的柱剪力 (ACI 18.7.6.1.1)	取以下两者的小值： a) 根据柱两端最大名义抗弯强度计算的剪力值 b) 根据与柱相连的梁端最大名义抗弯强度计算的剪力值 且不大于按考虑超强系数 Ω 放大的地震荷载参与的组合中相应的最大剪力值 (ACI 18.4.2.3)	a) 取荷载组合下相应的轴力和剪力值 b) 抗震等级为 B 及以上且跨高比(跨度取柱净高)不大于 5 时, 同 IMF 计算 (ACI 18.3.3)

注：表中“最大可能强度”代表钢筋强度按 $1.25f_y$ 取值，强度折减系数取为 1；“名义强度”代表钢筋强度按 f_y 取值，强度折减系数取为 1。

2.5 计算抗剪箍筋

程序对抗剪箍筋的计算思路如下。其中， V_u 即设计剪力， V_c 即混凝土部分的抗剪承载力 (ACI 22.5.6.1, 22.5.7.1)， V_{max} 为剪力最大限值 (ACI 22.5.1.2)。强度折减系数对于抗震工况默认取 0.6、非抗震工况默认取 0.75 (ACI 21.2.1, 21.2.4)，强度折减系数可以通过设计首选项人为修改。注意，ETABS 不会校核箍筋最小间距、体积配箍率等要求，这部分由工程师自行判断。

If $V_u \leq (V_c/2)\phi$,

$$\frac{A_v}{s} = 0, \quad (\text{ACI } 10.6.2.1)$$

else if $(V_c/2)\phi < V_u \leq \phi V_{max}$,

$$\frac{A_v}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{ys} d}, \quad (\text{ACI } 22.5.1.1, 22.5.10.1, 22.5.10.5.3)$$

$$\frac{A_v}{s} \geq \max\left(\frac{0.75\sqrt{f'_c}}{f_{ys}} b_w, \frac{50}{f_{ys}} b_w\right) \quad (\text{ACI } 10.6.2.2)$$

else if $V_u > \phi V_{max}$,

截面不满足要求 (ACI 22.5.1.2)

此外，根据 ACI 18.7.6.2.1，对于特殊抗弯框架，如果地震作用产生的剪力较大（超过最大剪力需求的一半），且地震组合下的轴力 $P_u < A_g f'_c / 20$ ，须忽略混凝土对抗剪承载力的贡献，即此时 $V_c = 0$ 。这由程序自动执行。

3 设计计算书

常规的设计结果通过命令 **设计>混凝土框架设计>显示设计信息**，在视窗中显示。此外，ETABS 还可以输出每个构件在所有荷载组合下的设计细节数据，这些结果以表格文档的方式显示，可转化为 Word 格式保存

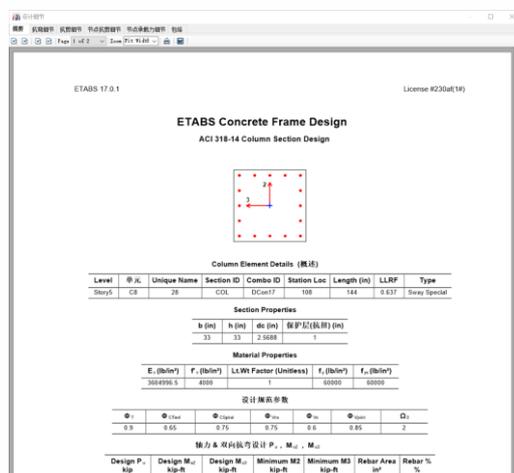


图 9 设计细节

为计算书。操作方式是，在显示设计结果的视窗中，选择某根柱，点击右键，在弹出的对话框中点击**细节**按钮，即出现如图9所示的对话框。对话框左上方是细节显示内容的选项卡，以下分别对框架柱设计的抗弯细节和抗剪细节进行说明。

3.1 抗弯细节

Column Element Details (Flexural Details)

Level	Element	Unique Name	Section ID	Combo ID	Station Loc	Length (in)	LLRF	Type
Story4	C17	57	COL	DCon20	108	144	0.63	Sway Special

该表是柱单元的基本信息，前七项来自模型定义，LLRF（活荷载折减系数）由程序计算，Type（框架类型）来自设计覆盖项定义。

Section Properties

b (in)	h (in)	dc (in)	Cover (Torsion) (in)
33	33	2.5688	1

该表是截面尺寸信息，来自截面定义。dc 截面边缘到纵筋中心的距离，Cover (Torsion)

Material Properties

E_c (lb/in ²)	f'_c (lb/in ²)	Lt.Wt Factor (Unitless)	f_y (lb/in ²)	f_{ys} (lb/in ²)
3604996.5	4000	1	60000	60000

该表是材料信息，来自材料定义。

Design Code Parameters

Φ_T	Φ_{CTied}	$\Phi_{CSpiral}$	Φ_{Vns}	Φ_{Vs}	Φ_{Vjoint}	Ω_0
0.9	0.65	0.75	0.75	0.6	0.85	2

上表是设计规范参数，程序有默认值，可通过设计首选项或覆盖项修改。

Axial Force and Biaxial Moment Design For P_u , M_{u2} , M_{u3}

Design P_u kip	Design M_{u2} kip-ft	Design M_{u3} kip-ft	Minimum M2 kip-ft	Minimum M3 kip-ft	Rebar Area in ²	Rebar % %
-733.586	-1492.1357	-993.533	97.2001	97.2001	44.169	4.06

上表是正截面设计信息。其中设计弯矩是按本文 2.2 节调整后的弯矩，即 $Design M_u = \delta_{ns}(M_{ns} + \delta_s M_s)$ 。Minimum M 即最小弯矩值，对应 ACI 6.6.4.5.4

Factored & Minimum Biaxial Moments

	NonSway M_{ns} kip-ft	Sway M_s kip-ft	Factored M_u kip-ft	Minimum M_{min} kip-ft	Minimum Eccentricity in
Major Bending(M_{u3})	-33.1845	-960.3485	-993.533	97.2001	1.59
Minor Bending(M_{u2})	18.4973	-1186.7601	-1168.2628	97.2001	1.59

上表是设计弯矩的详细信息。

Axial Force and Biaxial Moment Factors

	C_m Factor Unitless	δ_{ns} Factor Unitless	δ_s Factor Unitless	K Factor Unitless	Effective Length in
Major Bend(M3)	0.209302	1	1	1	108
Minor Bend(M2)	0.223355	1	1	1	108

上表是正截面设计过程的中间参数， C_m 对应 ACI 6.6.4.5.3，K 为计算长度系数。这些参数可通过覆盖项修改。

3.2 抗剪细节

抗剪细节的前几张表与抗弯细节一样，也是构件基本信息、截面尺寸信息、材料信息、设计规范参数，不再赘述。以下

对其它几张表进行说明。

Shear Design for V_{u2} , V_{u3}

	Rebar A_v /s in ² /ft	Design V_u kip	Design P_u kip	Design M_u kip-ft	ΦV_c kip	ΦV_s kip	ΦV_n kip
Major Shear(V2)	2.4465	223.349	-733.586	927.164	0	223.349	223.349
Minor Shear(V3)	3.0195	275.661	-733.586	1205.2575	0	275.661	275.661

上表是抗剪设计信息，包括箍筋结果、设计内力、抗剪承载力。

Capacity Shear (Part 1 of 2)

	Shear V_p kip	Long.Rebar $A_{s(Bot)}$ %	Long.Rebar $A_{s(Top)}$ %	Cap.Moment M_{posBot} kip-ft
Major Shear(V2)	230.196	3.98	4.06	2776.1128
Minor Shear(V3)	287.835	3.98	4.06	2776.1128

Capacity Shear (Part 2 of 2)

Cap.Moment M_{negTop} kip-ft	Cap.Moment M_{negBot} kip-ft	Cap.Moment M_{posTop} kip-ft
2842.361	2776.1128	2842.361
2842.361	2776.1128	2842.361

上表总结了柱设计剪力取值的有关数据。包括设计剪力、柱顶和柱底的纵筋数量、柱两端最大可能弯矩（本例的框架类型为特殊抗弯框架）。

Design Basis

Shr Reduc Factor Unitless	Strength f_{ys} lb/in ²	Strength f_{cs} lb/in ²	Area A_g in ²
1	60000	4000	1089

上表为设计基本信息，包含材料强度、构件截面面积。

Concrete Shear Capacity

	Design V_u kip	Conc.Area A_{cu} in ²	Tensn.Rein A_{st} in ²
Major Shear(V2)	223.349	1004.23	22.0845
Minor Shear(V3)	275.661	1004.23	22.0845

上表为混凝土部分受剪承载力的相关数据。包括抗剪截面面积、单方向抗弯纵筋面积。

Shear Rebar Design

	Stress v lb/in ²	Conc.Cpcty v_c lb/in ²	Uppr.Limit v_{max} lb/in ²	Φv_c lb/in ²	Φv_{max} lb/in ²	RebarArea A_v /s in ² /ft
Major Shear(V2)	222.41	0	505.96	0	0	2.4465
Minor Shear(V3)	274.5	0	505.96	0	303.58	3.0195

上表为抗剪设计的相关数据，包括用应力方式表达的设计剪力、混凝土受剪承载力、剪力值上限，和计算得到的箍筋结果。

4 小结

本文对基于 ACI318-14 规范进行混凝土框架柱设计的 ETABS 实现和输出进行了说明。可以看出，PMM 曲面是柱正截面设计的基础，而规范的细节要求将影响 PMM 曲面的形状。此外，对于不同抗震要求的框架类型，其“强柱弱梁”或抗剪承载力的要求是不同的，这将显著影响设计结果。工程师熟悉程序的技术条件后，有利于更好地理解程序结果来指导设计。