

ETABS 欧标混凝土框架设计要点详解（二）——框架柱设计

筑信达 郑翔

本文将基于 EN 1992-1-1 和 EN 1998-1 规范（以下简称 EC2、EC8）讨论钢筋混凝土柱设计在 ETABS 中的实现细节。本文重点介绍程序如何实现规范的相关要求，解释设计细节中表格数据的含义，不涉及软件操作说明。相关的操作请查看联机帮助或程序自带的例题。

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）在每根柱的两端及中间，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。

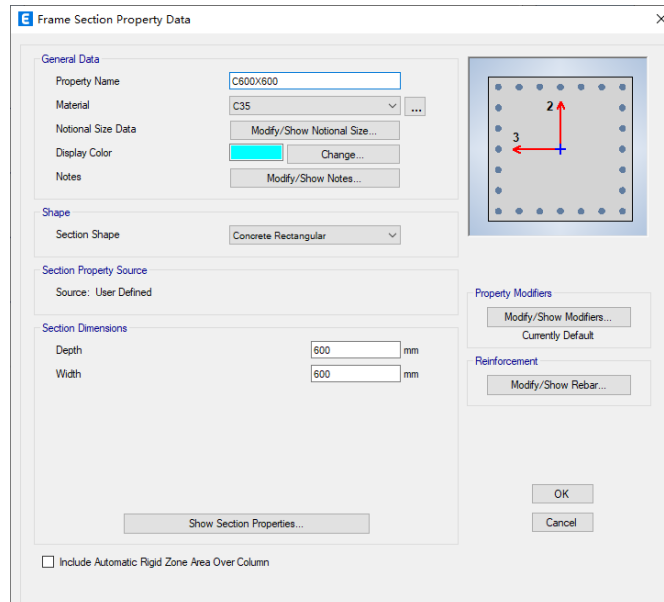


图 1 定义柱截面对话框

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自动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 2 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。

得到柱计算长度后，程序据其计算绕强轴和弱轴的长细比 λ （EC2 5.8.3.2(1)），自动判断长细比是否满足长细比限值要求。用户可通过设计细节查看长细比较核表格：



Slenderness check (governing permutation)

	λ Unitless	λ limit Unitless	Condition	Governing permutation
Major Bend(M3)	19.052559	147.58635	N/A	N/A
Minor Bend(M2)	19.052559	148.379234	N/A	N/A

如上表所示：当长细比 λ 小于等于限值 λ limit，说明是短柱（short），无需考虑 P- δ 效应（EC2 5.8.3.1(1)）。当长细比 λ 大于限值 λ limit，说明是细长柱（slender），需考虑 P- δ 效应，可采用名义刚度法或名义曲率法由程序自动计算 P- δ 效应。其中长细比限值 λ limit 具体计算参见 EC2 5.8.3.1(1)。

2. 欧标柱正截面设计要点

2.1 考虑二阶 P- Δ 效应

对因框架侧移产生的 P- Δ 效应，可通过 ETABS 软件预设 P- Δ 选项考虑，也可通过欧标 EC2 附录 H 的方法计算。

ETABS 通过预设 P- Δ 选项来考虑 P- Δ 效应，如图 3 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。对于欧标，一般建议荷载模式取 1.35*恒载+1.5*活载，这是偏于保守的。

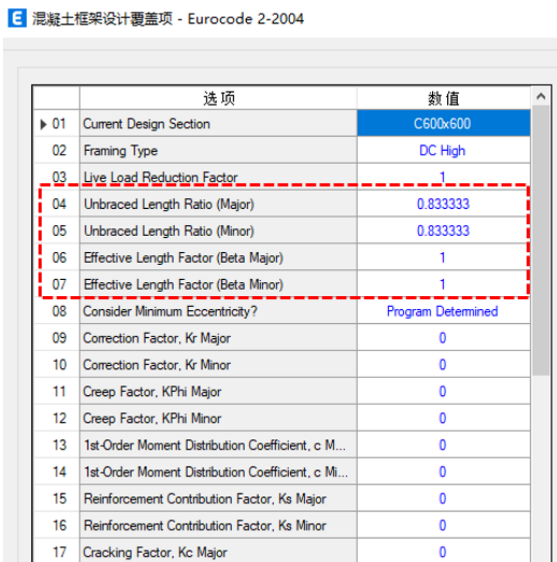


图 2 混凝土框架柱设计覆盖项



图 3 预设 P-Delta 选项对话框

2.2 考虑二阶 P- δ 效应

对于单根柱挠曲产生的 P- δ 效应，可通过名义刚度法（EC2 5.8.7）或名义曲率法（EC2 5.8.8）计算。用户可通过混凝土框架设计首选项中第 5 项“Second Order Method”选项，选择在混凝土构件设计阶段采用名义刚度法（图 4）或名义曲率法考虑构件 P- δ 效应（图 5）。

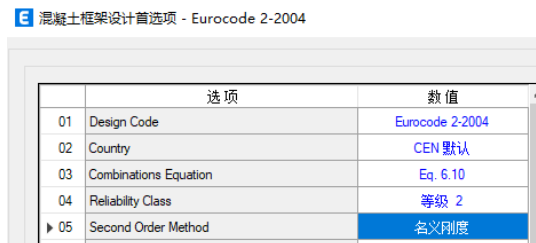


图 4 名义刚度法选项

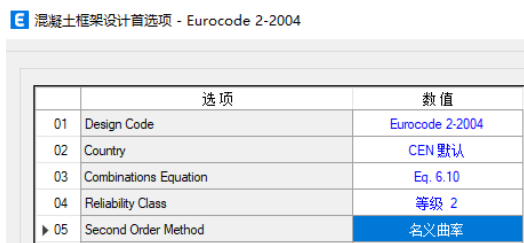


图 5 名义曲率法选项

由 1.2 节柱长度可知，当长细比 λ 小于等于限值 λ limit，程序判断是短柱（short），无需考虑 P- δ 效应，此时就算选择了名义刚度法或名义曲率法，程序不会考虑 P- δ 效应，程序设计细节相关计算表格项数据均为空值。当长细比 λ 大于限值 λ limit，说明是细长柱（slender），需考虑 P- δ 效应，可采用名义刚度法或名义曲率法由程序自动计算 P- δ 效应，程序设计细



节相关计算表格项数据均有相应值。

Slenderness Check	N/A	Slender	Short	Slender	Slender
$M_x = M_y$ or M_{050} kN-m	N/A	926.856	-1771.856	630	630
K_c Unitless	N/A	0.169306	N/A	0.169306	0.169306
Buckling Force kN	N/A	17613.8953	N/A	17613.8953	17613.8953
Moment Mag. Factor (MMF) Unitless	N/A	3.513016	1	3.513016	3.513016
2nd-Order Moment M_{2nd} kN-m	N/A	2329.2041	0	1583.2002	1583.2002
$M_{050} + MMF$ kN-m	N/A	3256.0601	N/A	2213.2002	2213.2002

图 6 名义刚度法输出项（短柱/细长柱）

Slenderness Check	N/A	Slender	Short	Slender	Slender
$M_x = M_y$ or M_{050} kN-m	N/A	926.856	-1771.856	630	630
K_c Unitless	N/A	0.698194	N/A	0.698194	0.698194
K_d Unitless	N/A	1.320316	N/A	1.320316	1.320316
2nd-Order Moment M_{2nd} kN-m	N/A	1810.302	0	1810.302	1810.302
$M_{050} + M_{2nd}$ kN-m	N/A	2737.158	N/A	2440.302	2440.302

图 7 名义曲率法选项（短柱/细长柱）

图 6、图 7 分别是构件设计细节中名义刚度法和名义曲率法对应的输出项内容，红框框出的内容分别为程序判定为细长柱、短柱时的输出项，供用户查阅校核。常规的框架结构柱，由于高度不高，以短柱居多；少数截面尺寸较小的跃层柱才可能存在细长柱；并且框架结构柱的控制测站往往在柱端部，该位置也不存在 P-δ 效应。所以需要考虑 P-δ 效应的情况很少。

2.3 考虑几何缺陷 (Imperfection Moment)

欧标 EC2 5.2 节规定，框架柱设计要考虑几何缺陷 e_i 产生的附加弯矩 M_{imp} 。其中：

$$e_i = \theta_i l_0 / 2 \quad (\text{EC2 Eq.5.2});$$

$$\theta_i = \theta_0 \alpha_h \alpha_m \quad (\text{EC2 Eq.5.1});$$

$$M_{imp} = e_i N_{Ed}$$

式中： α_m 是构件数量折减系数， $\alpha_m = \sqrt{0.5(1+1/m)}$ ，程序对于单独构件取 1.0； α_h 是构件长度折减系数， $\alpha_h = 2/\sqrt{l}$ ； $2/3 \leq \alpha_h \leq 1$ ； θ_0 推荐值为 1/200。

ETABS 程序的设计细节在一阶弯矩表格中，能输出对应 2 轴、3 轴的几何缺陷导致的附加弯矩 M_{imp} 。

First-Order Moments (governing permutation)

	End I Moment kN-m	End J Moment kN-m	Section Moment kN-m	Imperfection Moment kN-m	M_{02} Moment kN-m	M_{01} Moment kN-m
Major Bend(M3)	19.6712	-23.2877	-23.2877	4.5792	-23.2877	19.6712
Minor Bend(M2)	464.606	-531.3489	-531.3489	4.5792	-535.928	460.0268

上表是一阶弯矩信息。其中 End I Moment 指柱 I 端弯矩、End J Moment 指柱 J 端弯矩、Section Moment 指该测站处荷载组合下的截面弯矩，并不是最终设计采用的弯矩。Imperfection Moment 指考虑几何缺陷对应的弯矩值 $M_{imp2} = e_{i2} N_{Ed}$ 、 $M_{imp3} = e_{i3} N_{Ed}$ ，其中 e_{i2} 、 e_{i3} 参见 EC2 Eq5.1、Eq5.2。

程序会分别在 2 轴正方向、2 轴负方向、3 轴正方向、3 轴负方向叠加对应的几何缺陷附加弯矩，然后计算相应的 PMM 应力比。

Design Details for All Permutations Considered - D/C PMM Ratio

Imperfection Direction	空	Positive M3	Negative M3	Positive M2	Negative M2
(M3 _{des1} , M2 _{des1}) PMM Ratio	0.882028	0.877417	0.88646	0.873302	0.890751
(M3 _{des1} , M2 _{des1}) PMM Governs	无	无	无	无	Yes

如上表所示，Positive M3、Negative M3、Positive M2、Negative M2 即对应 M_{imp} 叠加在 3 轴正方向、3 轴负方向、2 轴正方向、2 轴负方向弯矩之后的 PMM 应力比。

2.4 最小偏心 (minimum eccentricity)

柱各测站的设计弯矩在两个方向上应分别满足最小偏心矩的要求 (EC2 6.1 (4))，程序默认自动执行，用户也可人为取消 (即图 2 第 8 项 Consider Minimum Eccentricity?选择“否”)。

欧标 EC2 6.1(4)节规定，框架柱承受压力时，需考虑最小偏心 $e_{min} = h / 30 \geq 20mm$ 。



ETABS 程序输出的设计细节中，正截面设计信息表格中，含有对应的最小偏心导致的弯矩值。

Axial Force and Biaxial Moment Design for N_{Ed} , M_{Ed2} , M_{Ed3} (governing permutation)

Design N_{Ed} kN	Design M_{Ed2} kN-m	Design M_{Ed3} kN-m	Minimum M2 kN-m	Minimum M3 kN-m	Rebar Area mm ²	Rebar %	D/C 比 Unitless
555.0488	-535.928	-23.2877	11.101	11.101	5401	1.5	0.891

上表是正截面设计信息。其中 N_{Ed} 是轴力设计值， M_{Ed2} 、 M_{Ed3} 是绕 2 轴、3 轴的设计弯矩，Minimum M2、Minimum M3 是考虑对应方向最小偏心的弯矩值， $M_{min2} = e_{min2} \cdot N_{Ed}$ 、 $M_{min3} = e_{min3} \cdot N_{Ed}$ 。设计弯矩 M_{Ed2} 、 M_{Ed3} 不得小于对应的 Minimum M2、Minimum M3。

Design Details for All Permutations Considered - Minor Bending M2

Imperfection Direction	None	Positive M3	Negative M3	Positive M2	Negative M2
M_{ana} kN-m	-70	-70	-70	-70	-70
M_{imp} kN-m	0.0	0.0	0.0	290.472	-290.472
$M_{ai} = M_{ana} + M_{imp}$ kN-m	-70	-70	-70	220.472	-360.472
M_{min} kN-m	N/A	273	273	273	273
$M3_{des1} = M_{ai}$ or M_{min} kN-m	N/A	-273	-273	273	-360.472

以上表为例，红色框中的数值表示，考虑了 2 轴正方向的缺陷对应的弯矩值 $M_{imp}=290.472\text{kN}\cdot\text{m}$ ，分析弯矩 $M_{ana}=-70\text{kN}\cdot\text{m}$ ，叠加了缺陷弯矩后的分析弯矩值 $M_{ai}=220.472\text{kN}\cdot\text{m}$ 。但是最小偏心的弯矩值 $M_{min}=273\text{kN}\cdot\text{m}$ ，因此最终采用的设计弯矩取两者的较大值 $273\text{kN}\cdot\text{m}$ 。

2.5 强柱弱梁验算

对中延性抗弯框架（DCM MRF）和高延性抗弯框架（DCH MRF），程序分别对应柱主方向和次方向进行强柱弱梁验算：

$$\frac{\sum 1.3M_b}{\sum M_c} \leq 1.0 \quad (\text{EC8 4.4.2.3 (4), 5.2.3.3 (2)})$$

其中， $\sum M_c$ ：与节点相连的所有柱的抗弯承载力设计值之和，上柱和下柱抗弯承载力计算时均需考虑轴力设计值对承载力的影响； $\sum M_b$ ：与节点相连的所有梁的抗弯承载力设计值之和。

如图 8 所示，程序输出梁柱的抗弯承载力比（1.3）Beam/Column Capacity Ratio，每根柱子显示其主轴、次轴方向的相应结果，比率小于 1.0 即满足要求，“N/A”代表数据不可得，通常是因为该方向没有梁与之相交，或者该柱为顶层柱。在柱构件的设计细节中可查看强柱弱梁验算数据，除了最终的梁柱抗弯承载力比，还包括节点处梁、柱的尺寸和配筋，以及各自的抗弯承载力等数据。限于篇幅，本文仅列出图 9 为例，其余表格可自行查阅 ETABS 的设计细节。

(1.3) Beam/Column Capacity Ratio

Major Ratio	Minor Ratio
0.5	0.899

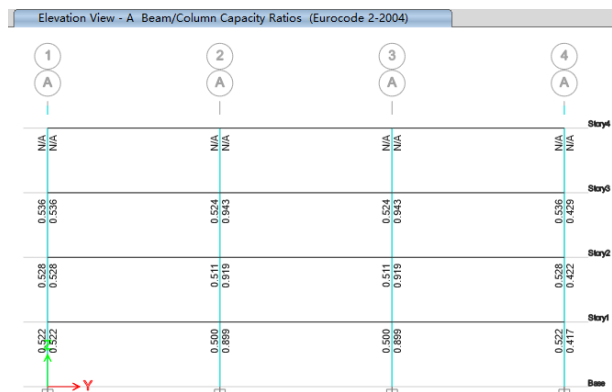


图 8 强柱弱梁输出表格

图 9 强柱弱梁验算结果

2.6 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 10 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 Eurocode 2 规范要求包括：（1）忽略混凝土的抗拉能力；（2）混凝土极限压应变对于 $f_{ck} \leq 50MPa$, $\varepsilon = 0.035$;对于 $50MPa < f_{ck} \leq 90MPa$, $\varepsilon = 0.0026 + 0.0035 \times [(90 - f_{ck})/100]^4$ (EC2 Table3.1); （3）钢筋屈服后应力取为屈服强度 $\varepsilon_s E_s \leq f_{yd}$ (EC2 3.2.7); （4）计算混凝土受压区等效矩形应力区 (EC2 3.1.7); （5）考虑材料相关系数 γ_c 、 γ_s 、 α_{cc} 、 α_{ct} 、 α_{lcc} 、 α_{lct} 的影响 (EC2 3.1.6) 等等。

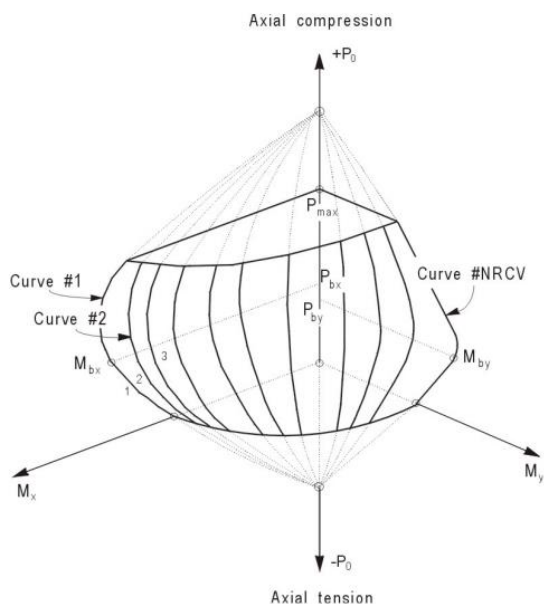


图 10 PMM 相关面

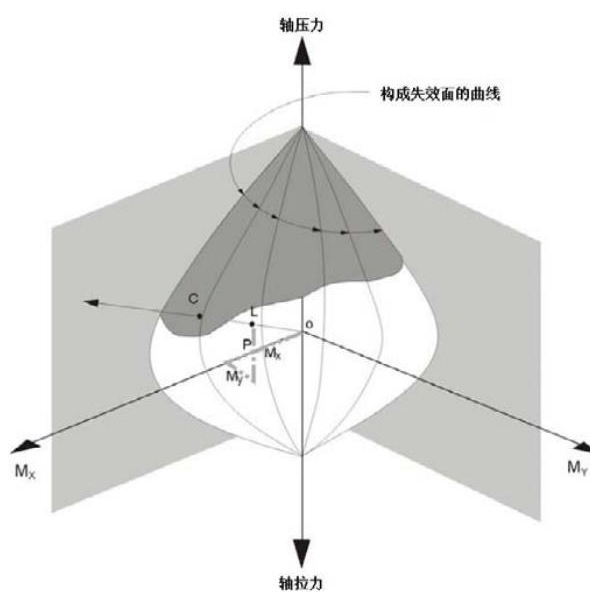


图 11 计算柱的承载力比率的几何示意图

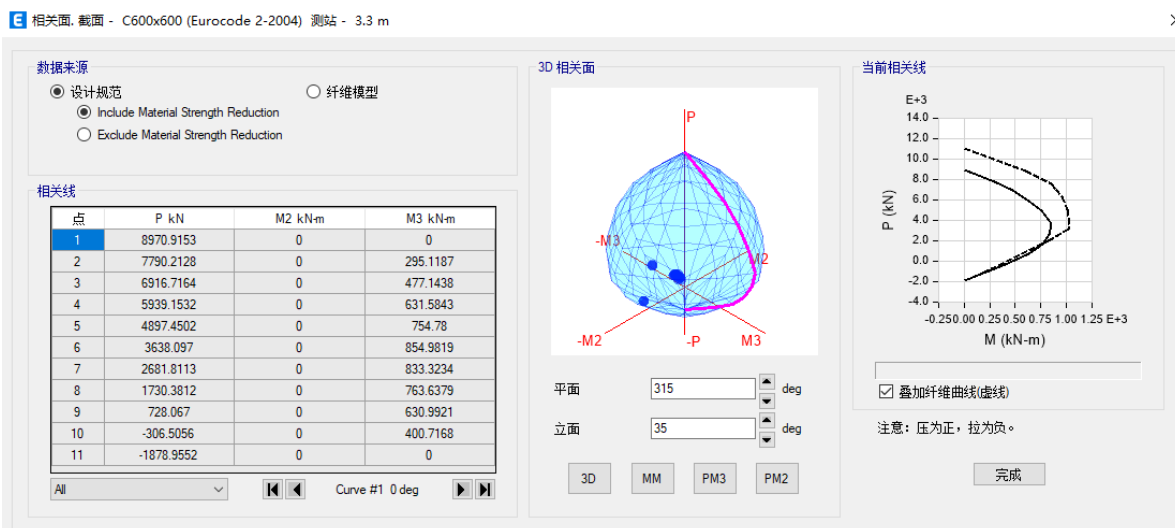


图 12 ETABS 输出的相关面

如图 11 所示，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, 代表承载力处于临界状态; 若 OL > OC, 则 D/C > 1, 代表承载力不足。程序将基于柱各个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 12 所示，这里显示了每条 PM 曲线的相关数



据，这些数据可以按考虑材料强度折减、忽略材料强度折减分别计算，也可由纤维模型算得。例如图 12 右侧，实线为考虑材料强度折减（即考虑 γ_c 、 γ_s ）算得的 PM 曲线，虚线为用纤维模型计算的 PM 曲线，可以看到材料强度折减系数对 PMM 曲面的影响。框架柱进行承载力验算时，使用的是考虑材料强度折减的 PMM 相关面。当框架柱需按 EC8 进行强剪弱弯、强柱弱梁验算时，柱采用的是考虑轴力设计值影响的抗弯承载力，该数值即对应考虑材料强度折减的 PM 曲线上相应轴力设计值处的弯矩。

用户若查看柱的设计细节，会发现输出细节最后有如下表格：

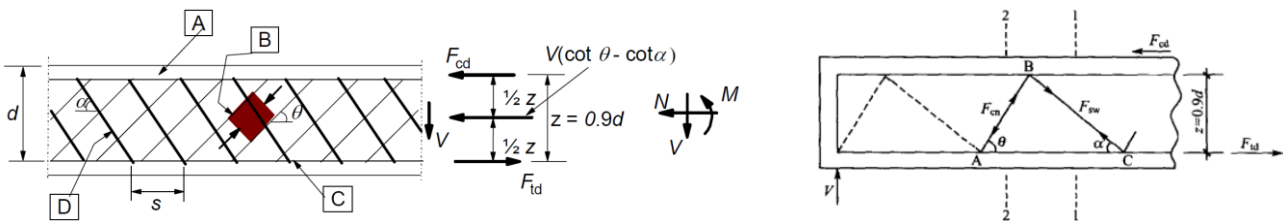
Design Details for All Permutations Considered - D/C PMM Ratio

Imperfection Direction	None	Positive M3	Negative M3	Positive M2	Negative M2
(M3 _{des1} , M2 _{des1}) PMM Ratio	0.889017	0.887576	0.890371	0.879629	0.898405
(M3 _{des1} , M2 _{des1}) PMM Governs	No	No	No	No	Yes

上表中，第一行指的是 Positive M3、Negative M3、Positive M2、Negative M2 分别指将几何缺陷对应的弯矩值 M_{imp} 与 M3 的正方向、M3 的负方向、M2 的正方向、M2 的负方向叠加，得到的 PMM 应力比。第二行指的是程序计算得到的控制工况是哪一种，上表中是几何缺陷施加在 M2 的负方向时，柱得到的应力比最大，为控制工况，显示 Yes。

3. 欧标柱斜截面设计要点

对于无腹筋的钢筋混凝土构件，欧标考虑了轴力对抗剪截面承载力（无筋承载力）的影响，国标没有相关规定。对于有腹筋的钢筋混凝土构件的抗剪截面承载力（有筋承载力），国标采用混凝土受剪与腹筋受剪承载力之和的形式，欧标则采用了桁架模型（图 13）。桁架由与 AC 角度为 α 的拉杆 BC 和角度为 θ 的混凝土压杆 AB，以及纵向受拉钢筋和受压钢筋组成（图 13）。用户若想了解更详细的内容，可参考本文参考资料[1]，限于篇幅，在此不深入展开。本节主要结合 EC2、EC8 规范，介绍 ETABS 程序如何进行框架柱抗剪设计。



A——受压弦杆；B——撑杆；C——受拉弦杆；D——抗剪钢筋

图 13 欧标有腹筋构件的桁架模型（EC2 图 6.5）

(1) 确定施加的剪力设计值 V_{Ed} ：

对低延性框架而言，该值来自荷载组合下的计算结果。对于中延性抗弯框架和高延性抗弯框架，还应满足表 1 的要求。

表 1 抗震框架柱的设计剪力要求

高延性抗弯框架/中延性抗弯框架	低延性抗弯框架
根据框架节点处形成塑性铰时的抗弯能力 计算得到的剪力（EC8 5.4.2.3；EC8 5.5.2.2）	荷载组合下的计算结果

注意，根据框架节点处形成塑性铰时的抗弯能力是通过抗弯实配钢筋结果计算而得。当柱配筋按“校核”时，实配钢筋为柱定义的初始配筋；当柱配筋按“设计”时，实配钢筋为柱最终的设计配筋，和柱定义的初始配筋不一定相同。抗弯能力计算时采用的是混凝土和钢筋的设计值，即 f_{cd} 和 f_{yd} 。

(2) 确定混凝土的抗剪承载力 $V_{Rd,c}$ ：

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \quad (\text{EC2 Eq. 6.2a})$$

其最小值为：



$$V_{Rd,c} = (v_{\min} + k_l \sigma_{cp}) b_w d \quad (\text{EC2 Eq. 6.2b})$$

其中： ρ_l 为纵向钢筋的配筋率， $\rho_l = A_s / b_w d \leq 0.02$ 。

(3) 确定截面的最大抗剪设计值 $V_{Rd,max}$ ：

为防止混凝土受压层压溃，剪力设计值 V_{Ed} 不应大于最大适应设计剪力 $V_{Rd,max}$ 。若剪力设计值超过此限值，则会设计失败。最大适应剪力设计值定义如下：

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta) \quad (\text{EC2 Eq. 6.9})$$

其中： $21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ ；当荷载组合包含地震作用时， $\theta = 45^\circ$ ，程序默认取 $\theta = 45^\circ$ 。

(4) 确定单位长度所需的抗剪箍筋面积 $\frac{A_{sw}}{s}$ ：

当 $V_{Rd,c} < V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$ 时，单位长度所需的抗剪箍筋面积 A_{sw} / s 按下式计算：

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{z f_{ywd} \cot \theta} \quad (\text{EC2 Eq. 6.8})$$

其中： θ 取值同上。

关于 ETABS 框架柱抗剪设计输出细节，用户可查阅设计细节中关于抗剪设计的表格。以下表为例：

Shear Design for V_{Ed2} , V_{Ed3}

	Shear V_{Ed} kN	Shear V_{Rdc} kN	Shear V_{Rds} kN	Shear V_{Rdmax} kN	$\tan(\theta)$ Unitless	Rebar A_{sw} / s mm ² /m
Major, V_{Ed2}	378.2952	338.6532	378.2952	1545.3558	1	2229.59
Minor, V_{Ed3}	301.1118	258.4282	301.1118	1545.3558	1	1774.69

上表中，Shear V_{Ed} 是该组合的设计剪力值； θ 是受压层角度、程序默认取 $\theta = 45^\circ$ ；Shear V_{Rdc} 是混凝土的抗剪承载力；Shear V_{Rds} 是计算抗剪箍筋时的剪力值，对于地震组合，该数值是框架节点处形成塑性铰时的抗弯能力计算得到的剪力，因此可能会比 Shear V_{Ed} 大；Shear $V_{Rd,max}$ 是截面的最大抗剪设计值，Rebar A_{sw}/s 是单位长度所需的抗剪箍筋面积。



注意: ETABS 不会校核箍筋最小间距、体积配箍率等要求, 这部分工作由工程师自行校核。

4. 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 14 所示的对话框。对话框左上方是细节显示内容的选项卡, 以下对框架柱的设计细节进行说明。

4.1 设计细节

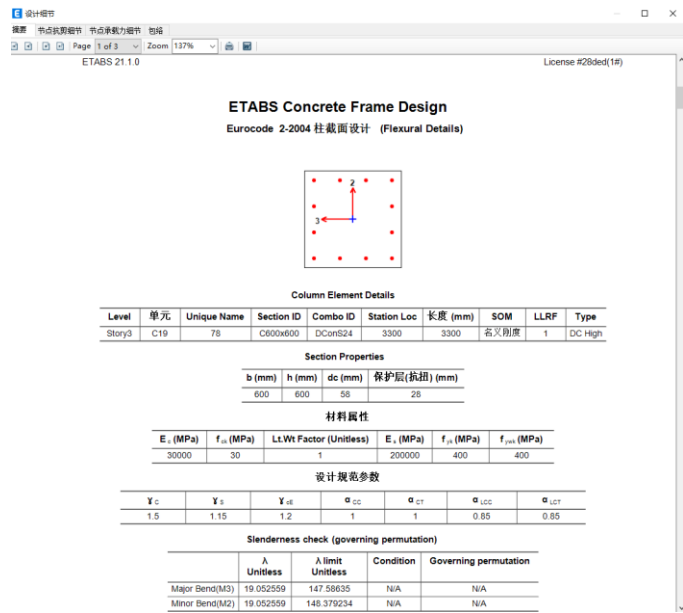


图 14 ETABS 输出的设计细节

Column Element Details

Level	单元	Unique Name	Section ID	Combo ID	Station Loc	长度 (mm)	SOM	LLRF	Type
Story3	C19	78	C600x600	DCons24	3300	3300	名义刚度	1	DC High

该表是柱单元的基本信息, 前七项来自模型定义, SOM (Second Order Method) 指二阶 P-δ 效应计算方法采用名义刚度法, 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 (mm)	h (mm)	dc (mm)	保护层(抗扭) (mm)
600	600	58	28

该表是截面尺寸信息, 来自截面定义。dc 是指截面边缘到纵筋中心的距离, Cover (Torsion)指抗扭计算的箍筋净保护层厚度。

材料属性

E _c (MPa)	f _{ck} (MPa)	Lt.Wt Factor (Unitless)	E _s (MPa)	f _{yk} (MPa)	f _{ywk} (MPa)
30000	30	1	200000	400	400

该表是材料信息, 来自材料定义。其中 Lt.Wt Factor 指轻质混凝土系数, 对于普通混凝土取 1.0。

设计规范参数

γ _c	γ _s	γ _{ce}	α _{cc}	α _{ct}	α _{LCC}	α _{LCT}
1.5	1.15	1.2	1	1	0.85	0.85

上表是设计规范参数, 程序有默认取值, 可通过设计首选项或覆盖项修改。这些参数会直接影响设计结果。其中: γ_c 指混凝土强度分项系数, 欧标建议持久和短暂工况取 1.5、对于偶然工况取 1.2、程序默认值为 1.5; γ_s 指钢筋材料强度分项系数, 欧标建议持久和短暂工况取 1.15、对于偶然工况取 1.0、程序默认值为 1.15; γ_{ce} 指混凝土弹性模量分项系数, 程序默认值为 1.2, 名义刚度法计算弯矩放大系数时, 会用到该数值计算弹性模量设计值, 参见 EC2 式 (5.27); α_{cc} 指考虑混凝土抗压强度长期效应不利影响的系数, 程序默认值为 1.0; α_{ct} 指考虑混凝土抗拉强度长期效应不利影响的系数, 程序默认值为 1.0; α_{LCC} 指考虑轻质混凝土抗压强度长期效应不利影响的系数, 程序默认值为 0.85; α_{LCT} 指考虑轻质混凝土抗拉强度长期效应不利影响的系数, 推荐值为 0.85。



Slenderness check (governing permutation)

	λ Unitless	λ limit Unitless	Condition	Governing permutation
Major Bend(M3)	19.052559	147.58635	N/A	N/A
Minor Bend(M2)	19.052559	148.379234	N/A	N/A

上表是长细比较核结果。当长细比 λ 小于等于限值 λ limit, 说明是短柱 (short), 无需考虑 P- δ 效应。当长细比 λ 大于限值 λ limit, 说明是细长柱 (slender), 需考虑 P- δ 效应。可采用名义刚度法或名义曲率法由程序自动计算 P- δ 效应。

Axial Force and Biaxial Moment Design for N_{Ed} , M_{Ed2} , M_{Ed3} (governing permutation)

Design N_{Ed} kN	Design M_{Ed2} kN-m	Design M_{Ed3} kN-m	Minimum M2 kN-m	Minimum M3 kN-m	Rebar Area mm ²	Rebar %	D/C 比 Unitless
555.0488	-535.928	-23.2877	11.101	11.101	5401	1.5	0.891

上表是正截面设计信息。其中 N_{Ed} 是轴力设计值, M_{Ed2} 、 M_{Ed3} 是绕 2 轴、3 轴的设计弯矩, Minimum M2、Minimum M3 是考虑对应方向最小偏心的弯矩值、 $M_{min2} = e_{min2} \square N_{Ed}$ 、 $M_{min3} = e_{min3} \square N_{Ed}$, 其中 e_{min2} 、 e_{min3} 参见 EC2 6.1。

设计弯矩 M_{Ed2} 、 M_{Ed3} 不得小于对应的 Minimum M2、Minimum M3。

First-Order Moments (governing permutation)

	End I Moment kN-m	End J Moment kN-m	Section Moment kN-m	Imperfection Moment kN-m	M_{02} Moment kN-m	M_{01} Moment kN-m
Major Bend(M3)	19.6712	-23.2877	-23.2877	4.5792	-23.2877	19.6712
Minor Bend(M2)	464.606	-531.3489	-531.3489	4.5792	-535.928	460.0268

上表是一阶弯矩信息。其中 End I Moment 指柱 I 端弯矩、End J Moment 指柱 J 端弯矩、Section Moment 指该测站处荷载组合下的截面弯矩, 并不是最终设计采用的弯矩。Imperfection Moment 指考虑几何缺陷对应的弯矩值 $M_{imp2} = e_{i2} \square N_{Ed}$ 、 $M_{imp3} = e_{i3} \square N_{Ed}$, 其中 e_{i2} 、 e_{i3} 参见 EC2 Eq5.1、Eq5.2。

M_{02} 、 M_{01} 是指叠加了几何缺陷对应弯矩值 M_{imp} 后的柱端弯矩, 但是要注意: 1) 几何缺陷对应的弯矩只能叠加在 2,3 轴中的某一方向, 例如本例中 M_{imp} 是叠加在 M2 方向; 2) M_{02} 的绝对值需大于 M_{01} 。

轴压比

Conc Capacity ($\alpha_{cc} * A * f_{cd}$) kN	Compressive Ratio $N_{Ed} / (\alpha_{cc} * A * f_{cd})$	Comp Ratio Limit	Seismic Load?	Ratio ok?
7200	0.159	0.55	Yes	Yes

上表是柱轴压比信息。其中轴压比限值 0.55 对应 DCH 柱 (高延性柱) 的轴压比, 参见 EC8 5.5.3.2.1(3)P。当柱为 DCM (中等延性柱) 时, 其轴压比限值为 0.65, 参见 EC8 5.4.3.2.1(3)P。

Shear Design for V_{Ed2} , V_{Ed3}

	Shear V_{Ed} kN	Shear V_{Rdc} kN	Shear V_{Rds} kN	Shear V_{Rdmax} kN	$\tan(\theta)$ Unitless	Rebar A_{sw} / s mm ² /m
Major, V_{Ed2}	378.2952	338.6532	378.2952	1545.3558	1	2229.59
Minor, V_{Ed3}	301.1118	258.4282	301.1118	1545.3558	1	1774.69

上表是柱剪切设计信息, Shear V_{Ed} 是该组合的设计剪力值; θ 是受压层角度、程序默认取 $\theta = 45^\circ$; Shear V_{Rdc} 是混凝土的抗剪承载力; Shear V_{Rds} 是计算抗剪箍筋时的剪力值, 对于地震组合, 该数值是框架节点处形成塑性铰时的抗弯能力计算得到的剪力, 因此可能会比 Shear V_{Ed} 大; Shear V_{Rdmax} 是截面的最大抗剪设计值, Rebar A_{sw} / s 是单位长度所需的抗剪箍筋面积。



Joint Shear Check/Design

	Joint Shear A_{sh} cm ²	Shear $V_{Ed, Top}$ kN	Shear V_{jhd} kN	Shear $V_{Rd Conc}$ kN	节点 Area cm ²	Shear Ratio Unitless
Major Shear, V_2	47.9	211.2607	1464.273	2071.5311	2623.3	0.707
Minor Shear, V_3	57.5	230.3412	1588.0192	2071.5311	2623.3	0.767

上表是节点设计信息 Joint Shear A_{sh} 是所需节点区约束水平箍筋的总面积，Shear V_{Ed} 是该组合的柱剪力设计值 V_c ，Shear V_{jhd} 是该组合的最终节点区的水平剪力，Shear V_{RdConc} 是该组合的节点区设计抗剪强度，Joint Area 是抗剪节点面积，Shear Ratio Unitless 是节点区抗剪承载力比，是 V_{jhd} 与 Shear V_{RdConc} 的比值。

Design Details for All Permutations Considered - Major Bending M3

Imperfection Direction	空	Positive M3	Negative M3	Positive M2	Negative M2
Analysis Moment M_{ana} kN-m	-23.2877	-23.2877	-23.2877	-23.2877	-23.2877
Imperfection Moment M_{imp} kN-m	0.0	4.5792	-4.5792	0.0	0.0
$M_{ai} = M_{ana} + M_{imp}$ kN-m	-23.2877	-18.7086	-27.8669	-23.2877	-23.2877
Minimum Moment M_{min} kN-m	N/A	11.101	11.101	11.101	11.101
$M3_{des1} = M_{ai}$ Or M_{min} kN-m	N/A	-18.7086	-27.8669	-23.2877	-23.2877
Neg. Moment Strength M_{Rd-} kN-m	-592.3918	-592.3918	-592.3918	-592.3918	-592.3918
Pos. Moment Strength M_{Rd+} kN-m	592.3918	592.3918	592.3918	592.3918	592.3918

上表是柱设计弯矩 M3 信息，Positive M3、Negative M3、Positive M2、Negative M2 分别指将几何缺陷对应的弯矩值 M_{imp} 与 M3 的正方向、M3 的负方向、M2 的正方向、M2 的负方向叠加。上表是 M3 的计算表格，因此第三行 M_{ai} 分别指不考虑几何缺陷的弯矩值 M3、考虑几何缺陷在 M3 正方向的弯矩值 M3、考虑几何缺陷在 M3 负方向的弯矩值 M3、考虑几何缺陷在 M2 正方向的弯矩值 M3、考虑几何缺陷在 M2 负方向的弯矩值 M3。Minimum Moment M_{min} 指考虑对应方向最小偏心的弯矩值、 $M_{min3} = e_{min3} \square N_{Ed}$ ，其中 e_{min3} 参见 EC2 6.1。M3_{des1} 指设计弯矩取 M_{ai} 和 M_{min} 两者的较大值。 M_{Rd} 指根据截面实配钢筋、考虑轴压力设计值的柱截面弯矩设计值。因为是对称配筋，因此 M_{Rd+} 和 M_{Rd-} 数值一样。

Design Details for All Permutations Considered - Minor Bending M2

Imperfection Direction	空	Positive M3	Negative M3	Positive M2	Negative M2
M_{ana} kN-m	-531.3489	-531.3489	-531.3489	-531.3489	-531.3489
M_{imp} kN-m	0.0	0.0	0.0	4.5792	-4.5792
$M_{ai} = M_{ana} + M_{imp}$ kN-m	-531.3489	-531.3489	-531.3489	-526.7697	-535.928
M_{min} kN-m	N/A	11.101	11.101	11.101	11.101
$M2_{des1} = M_{ai}$ Or M_{min} kN-m	N/A	-531.3489	-531.3489	-526.7697	-535.928
M_{Rd-} kN-m	-592.3918	-592.3918	-592.3918	-592.3918	-592.3918
M_{Rd+} kN-m	592.3918	592.3918	592.3918	592.3918	592.3918

上表是柱设计弯矩 M2 信息，第三行 M_{ai} 分别指不考虑几何缺陷的弯矩值 M2、考虑几何缺陷在 M3 正方向的弯矩值 M2、考虑几何缺陷在 M3 负方向的弯矩值 M2、考虑几何缺陷在 M2 正方向的弯矩值 M2、考虑几何缺陷在 M2 负方向的弯矩值 M2。Minimum Moment M_{min} 指考虑对应方向最小偏心的弯矩值、 $M_{min2} = e_{min2} \square N_{Ed}$ ，其中 e_{min2} 参见 EC2 6.1。M2_{des1} 指设计弯矩取 M_{ai} 和 M_{min} 两者的较大值。



Design Details for All Permutations Considered - D/C PMM Ratio

Imperfection Direction	空	Positive M3	Negative M3	Positive M2	Negative M2
(M3 _{des1} , M2 _{des1}) PMM Ratio	0.882028	0.877417	0.88646	0.873302	0.890751
(M3 _{des1} , M2 _{des1}) PMM Governs	无	无	无	无	Yes

上表是柱 PMM 设计信息，第一行指的是 Positive M3、Negative M3、Positive M2、Negative M2 分别指将几何缺陷对应的弯矩值 M_{imp} 与 M3 的正方向、M3 的负方向、M2 的正方向、M2 的负方向叠加，得到的 PMM 应力比。第二行指的是程序计算得到的控制工况是哪一种，上表中是几何缺陷施加在 M2 的负方向时，柱得到的应力比最大，为控制工况。

5 小结

本文对基于 Eurocode 2 和 Eurocode 8 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。

参考资料

- [1] 贡金鑫、魏巍巍、胡家顺. 中美欧混凝土结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [2] 贡金鑫、车轶、李荣庆. 混凝土结构设计(按欧洲规范)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [3] Eurocode 2: Design of concrete structures (Part 1-1: General rules and rules for buildings) . EN 1992-1-1 [S]. 2004.
- [4] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance (Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings) . EN 1998-1 [S]. 2004.
- [5] Computers & Structures Inc. ETABS v21 联机帮助文档 Concrete Frame Design Manual(Eurocode 2-2004 with 8-2004).