

# ETABS 美标混凝土框架设计要点详解 (二) —— 框架梁、节点设计

筑信达 李立

本文将基于 ACI 318-14 规范 (以下简称 ACI) 讨论钢筋混凝土梁、节点设计在 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. 梁正截面设计

### 1.1 计算抗弯纵筋

矩形截面和 T 形截面的正截面设计示意图如图 1 所示。程序根据 ACI 22.2.2.4 的规定, 计算混凝土受压区等效矩形应力区。默认受拉钢筋最小应变为 0.005, 相比规范要求的 0.004 (ACI 9.3.3), 程序做了一些处理, 目的是让强度折减系数为定值 0.9 (参见 ACI R21.2.2b)。

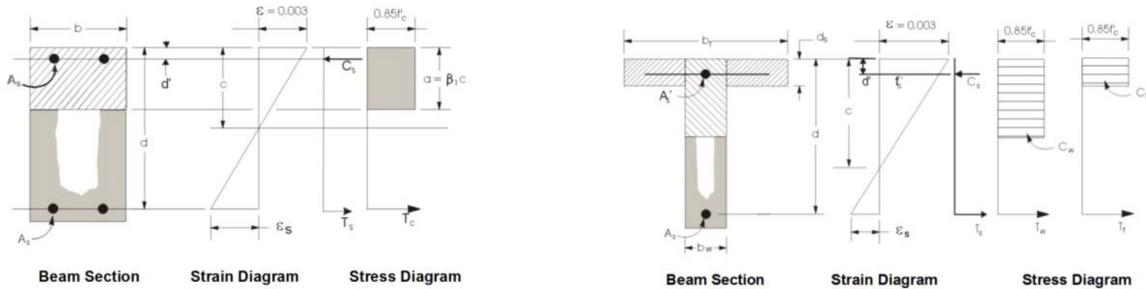


图 1 矩形梁、T 形梁正截面设计示意图

依据 ACI 的规定, 程序自动判断设计结果是否满足最小、最大配筋要求, 判断标准见表 1、表 2。表 1 适用于所有框架梁, 表 2 是针对抗震框架梁的配筋要求。

表 1 框架梁的配筋限值

最小配筋	最大配筋
受拉钢筋下限取以下两者小值: $A_s \geq \max \left\{ \frac{3\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d, \frac{200}{f_y} b_w d \right\} \quad (\text{ACI } 9.6.1.2)$ $A_s \geq \frac{4}{3} A_{s(\text{required})} \quad (\text{ACI } 9.6.1.3)$ 对于 T 形梁的负弯矩段, 用 $b'_w$ 替换上式中 $b_w$ , $b'_w = \min(b_f, 2b_w)$	受拉、受压钢筋上限: $A_s \leq \begin{cases} 0.04bd & \text{矩形梁} \\ 0.04b_w d & \text{T形梁} \end{cases}$ $A'_s \leq \begin{cases} 0.04bd & \text{矩形梁} \\ 0.04b_w d & \text{T形梁} \end{cases}$

表 2 抗震框架梁的配筋限值

特殊抗弯框架	中等抗弯框架
<ul style="list-style-type: none"> <li>必须是双筋梁, 上铁和下铁分别不小于:</li> </ul> $A_{s(\text{min})} \geq \max \left\{ \frac{3\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d, \frac{200}{f_y} b_w d \right\}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>抗弯钢筋上限为:</li> </ul> $A_s \leq 0.025 b_w d.$	<ul style="list-style-type: none"> <li>梁端正弯矩钢筋不小于负弯矩钢筋的 1/3 (ACI 18.4.2.2)</li> <li>任意位置的正/负弯矩配筋均不可小于端部正/负弯矩配筋较大值的 1/5 (ACI 18.4.2.2)</li> </ul>



<ul style="list-style-type: none"> <li>梁端正弯矩钢筋不小于负弯矩钢筋的 1/2 (ACI 18.6.3.2)</li> <li>任意位置的正/负弯矩配筋均不可小于端部正/负弯矩配筋较大值的 1/4 (ACI 18.6.3.2)</li> </ul>	
--	--

## 1.2 抗弯结果输出

完成设计后，程序会自动显示梁的两端及跨中的配筋结果。如果关心细节数据，可在设计细节中查看每个设计组合下，各个测站的设计弯矩及配筋结果。以下两张表，是某特殊抗弯框架中的一根梁的端部在一有震荷载组合下抗弯细节信息。

**Flexural Reinforcement for Moment,  $M_{u3}$**

	Required Rebar in <sup>2</sup>	+Moment Rebar in <sup>2</sup>	-Moment Rebar in <sup>2</sup>	Minimum Rebar in <sup>2</sup>
Top (+2 Axis)	9.2727	5.265	9.2727	3.015
Bottom (-2 Axis)	9.0052	9.0052	6.6009	3.015

上表中，Moment Rebar 是计算所需配筋，Minimum Rebar 是构造要求，Required Rebar 是前两者的大值。

**Design Moments,  $M_{u3}$**

Design +Moment kip-ft	Design -Moment kip-ft	Factored +Moment kip-ft	Factored -Moment kip-ft	Special +Moment kip-ft	Special -Moment kip-ft
186.3607	-372.7215	335.3974	-372.7215	186.3607	-372.7215

上表中，Factored Moment 来自相应荷载组合下设计弯矩，Special Moment 是满足特殊抗弯框架要求(表 2 中 ACI 18.6.3.2)的设计弯矩，Design Moment 是最终用于测站位置截面设计的弯矩设计值。

## 2. 梁斜截面设计

### 2.1 计算抗剪箍筋

首先确定剪力设计值。对一般框架而言，该值来自荷载组合下的计算结果。对于特殊抗弯框架和中等抗弯框架，还应满足表 3 的要求。

表 3 抗震框架梁的设计剪力要求

特殊抗弯框架	中等抗弯框架
<ul style="list-style-type: none"> <li>根据梁端最大可能抗弯能力计算的剪力与重力荷载下梁剪力的合力 (ACI 18.6.5.1)</li> </ul>	以下两种情况的较小值 (ACI 18.4.2.3): <ul style="list-style-type: none"> <li>根据梁端名义抗弯能力计算的剪力值与重力荷载下简支梁剪力的合力</li> <li>荷载组合中将地震作用放大 2 倍后得到的剪力值</li> </ul>

注意，上表中“最大可能强度”即钢筋强度按  $1.25f_y$  取值，强度折减系数取为 1；“名义强度”即钢筋强度按  $f_y$  取值，强度折减系数取为 1。此外，梁的抗弯能力是通过抗弯配筋结果计算而得，若用户在定义梁截面时，指定了延性梁的配筋面积，程序将使用用户指定的配筋面积替换自动抗弯设计得到的配筋，来计算梁的设计剪力。





接下来，计算混凝土的抗剪承载力，程序按 ACI 22.5.5.1 公式进行计算，即  $V_c = 2\lambda\sqrt{f'_c}b_wd$ 。注意，在距梁端两倍梁高范围内，如果地震作用引起的剪力超过最大剪力需求的一半，且地震组合下的轴力  $P_u < A_g f'_c / 20$  时，忽略混凝土对抗剪承载力的贡献 (ACI 18.6.5.2, 18.6.4.1)，即  $V_c = 0$ 。

然后，程序计算抗剪配筋，流程如下：

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

$$\frac{A_v}{s} = 0, \quad (\text{ACI 9.6.3.1})$$

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

$$\frac{A_v}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{ys} d}, \quad (\text{ACI 22.5.1.1, 22.5.10.1, 20.5.10.5.3})$$

$$\frac{A_v}{s} \geq \max\left(\frac{0.75\sqrt{f'_c}}{f_{ys}} b_w, \frac{50}{f_{ys}} b_w\right) \quad (\text{ACI 9.6.3.3, Table 9.6.3.3})$$

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

截面不满足要求。 (ACI 22.5.1.2)

上式中， $V_u$  即设计剪力， $V_{max}$  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，这部分工作由工程师自行校核。

## 2.2 计算抗扭钢筋

扭矩设计值来自荷载组合。注意程序不考虑由协调扭转 (即允许扭转开裂内力重分布) 而产生的扭矩折减 (ACI 22.7.3.3)，若用户想模拟类似协调扭转的效果，可以在模型中设置扭转自由度的释放，或自行折减扭转刚度。

根据规范要求，程序计算扭矩阈值  $T_{th}$  (ACI 22.7.4.1) 和开裂扭矩  $T_{cr}$  (ACI 22.7.5.1)，然后做以下判断：

若设计扭矩  $T_u < \phi T_{th}$ ，扭矩可忽略 (ACI 22.7.1.1, 9.6.4.1)；

若  $\phi T_{th} \leq T_u \leq \phi T_{cr}$ ，应满足最小配筋要求 (ACI 9.6.4.1)；

若  $T_u > \phi T_{cr}$ ，根据规范计算所需纵筋和箍筋，如下：

$$A_t = \frac{T_u p_h \tan \theta}{\phi 2 A_0 f_y \tan \theta} \quad (\text{ACI 22.7.6.1})$$

$$\frac{A_t}{s} = \frac{T_u \tan \theta}{\phi 2 A_0 f_{ys}} \quad (\text{ACI 22.7.6.1})$$

式中， $30^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ ，程序默认取  $45^\circ$ 。同时，程序会验算受扭纵筋、箍筋的最小值要求 (ACI 9.6.4.1, 9.6.4.2)。注意，若箍筋不满足剪扭箍筋最小值要求，程序会自动增大抗剪箍筋，此时抗剪箍筋不必单独满足  $A_{svmin}$  要求 (ACI 9.6.3.3)。与前面抗剪配筋类似，程序完成的抗扭配筋设计仅基于强度计算，钢筋间距等构造要求需用户自行校核。

此外，剪扭共同作用验算公式如下：

$$\sqrt{\left(\frac{V_u}{b_w d}\right)^2 + \left(\frac{T_u p_h}{1.7 A_{oh}^2}\right)^2} \leq \phi \left(\frac{V_c}{b_w d} + 8\sqrt{f'_c}\right)$$

若不满足要求，程序将给出警告，用户需调整截面尺寸。



## 2.3 剪扭结果输出

通过菜单命令可以在视图中显示抗剪和抗扭配筋结果。同样，也可在设计细节中查看每个设计组合下，各个测站的剪扭设计细节信息，下文列出相关的表格，逐一介绍。

Rbar $A_{vs}$ mm <sup>2</sup> /m	Rbar $A_t/S$ mm <sup>2</sup> /m	Rbar $A_t$ mm <sup>2</sup>	Design $V_{u2}$ kN	Design $T_u$ kN-m	Design $M_{u3}$ kN-m	Design $P_u$ kN
700.25	0	0	190.3121	7.2404	-138.3797	0

上表是剪扭配筋面积和相应的设计内力。前两项分别是抗剪和抗扭箍筋的面积（注意是单位长度的面积），第三项是抗扭纵筋面积。

Factored $V_{u2}$ kN	Factored $M_{u3}$ kN-m	Design $V_{u2}$ kN	Capacity $V_p$ kN	Gravity $V_g$ kN
144.683	-221.0764	190.3121	56.5378	133.7743

上表是剪力设计值来源的相关数据。“Factored”代表来自荷载组合结果。“Capacity”代表由梁端抗弯能力计算的剪力，例如对于特殊抗弯框架，即梁端最大可能抗弯能力计算的剪力。“Gravity”代表重力工况下梁的剪力。

	Long.Rebar $A_s$ (Bottom) mm <sup>2</sup>	Long.Rebar $A_s$ (Top) mm <sup>2</sup>	Capacity Moment $M_{pos}$ kN-m	Capacity Moment $M_{neg}$ kN-m
Left	590	1306	146.0585	292.9642
Right	589	1315	145.7787	294.9361

上表是梁端抗弯能力的计算信息。包括梁两端纵筋面积，以及按此计算的最大抗弯承载力，例如对于特殊抗弯框架，即最大可能抗弯承载力。

Stress $v$ MPa	Conc.Capacity $v_c$ MPa	Uppr.Limit $v_{max}$ MPa	Conc.Capacity $\Phi v_c$ MPa	Uppr.Limit $\Phi v_{max}$ MPa	RebarArea $A_v/s$ mm <sup>2</sup> /m	Shear $\Phi V_c$ kN	Shear $\Phi V_s$ kN	Shear $\Phi V_n$ kN
1.52	0.91	4.55	0.68	3.41	700.25	85.2749	105.0371	190.3121

上表是抗剪箍筋的计算信息。包括设计剪力、混凝土部分的抗剪承载力、用于控制截面尺寸的最大剪力等。注意前面几项数据使用了剪应力单位。



### Torsion Capacity

Torsion	Threshold	Critical	Conc.Area	Conc.Area	Conc.Area	Perimeter	Perimeter
$T_u$	$\Phi T_{th}$	$\Phi T_{cr}$	$A_{cp}$	$A_{oh}$	$A_o$	$P_{cp}$	$P_h$
kN-m	kN-m	kN-m	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>	mm	mm
7.2404	6.1872	24.7489	2407	742.8	631.4	3320	1244.4

上表是扭矩设计的相关信息。包括设计扭矩、扭矩阈值、开裂扭矩以及扭矩设计相关的截面属性。

## 3. 节点验算

程序会自动识别所有下方有混凝土柱的节点来进行节点验算，节点的材料属性默认与节点下方柱的材料相同。此外，还必须满足以下条件：

1. 框架类型是特殊抗弯框架；
2. 节点之上如果有柱，该柱是钢筋混凝土柱；
3. 节点处所有与柱相连的梁是钢筋混凝土梁；
4. 与节点相连的所有构件都有设计结果；
5. 荷载组合中含有地震工况。

### 3.1 节点剪力验算

节点区的有效面积一般为柱的宽度乘以深度（ACI 18.8.4.3），如果梁宽特别小，节点区有效宽度应不大于图 2 中的  $b+h$  以及  $b+2x$ 。程序通过将梁端的弯矩等效为拉力和压力，再结合柱的剪力，通过力的平衡来求得节点区的剪力（详细解释请参见 ETABS 自带的设计说明手册）。注意，这里的柱剪力对于特殊抗弯框架，是基于最大可能抗弯强度（来自梁的设计配筋或指定配筋）计算而得。最终，剪应力要满足 ACI 18.8.4.1 的要求，如下。

$$v = \begin{cases} 20\phi\lambda\sqrt{f'_c} & \text{for joints confined on all four sides,} \\ 15\phi\lambda\sqrt{f'_c} & \text{for joints confined on three faces or} \\ & \text{on two opposite faces,} \\ 12\phi\lambda\sqrt{f'_c} & \text{for all other joints,} \end{cases} \quad (\text{ACI 18.8.4.1, Table 18.8.4.1})$$

$$\phi = 0.85$$

式中， $\Phi$  是强度折减系数，默认取 0.85， $\lambda$  是轻质混凝土抗剪强度折减系数，默认取 1，在定义混凝土材料时可修改。

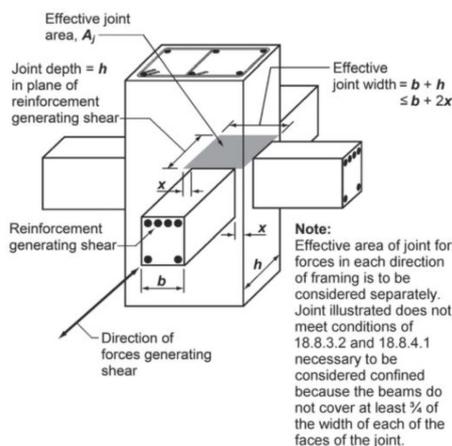


图 2 节点区有效面积（ACI Fig. R18.8.4）

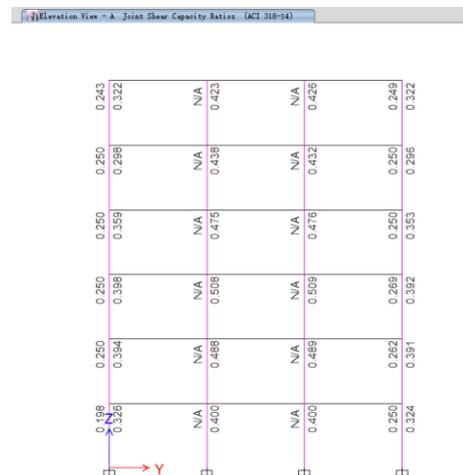


图 3 节点剪力验算结果显示



图 3 是 ETABS 显示的节点抗剪验算的剪力比率，每个节点显示其主轴、次轴方向的两个结果，比率小于 1 即满足要求，“N/A”代表数据不可得，通常因为该方向没有梁与之相交。在柱构件的设计细节中可查看节点抗剪细节，限于篇幅，以下仅列举部分主要数据。

Joint Shear Design			
	Joint Shear Ratio	Shear $V_{u,Top}$ kip	Shear $\Phi V_c$ kip
Major Shear, $V_{u2}$	0.597	419.564	702.519
Minor Shear, $V_{u3}$	0.726	509.919	702.519

上表即节点抗剪验算结果，包括剪力比率、节点设计剪力、节点抗剪承载力。剪力比率=设计剪力/抗剪承载力。

Joint Shear Capacity					
	Joint Width in	Column Depth in	Joint Area in <sup>2</sup>	Allow.Shear $\Phi v_c$ lb/in <sup>2</sup>	Capacity $\Phi V_c$ kip
Major	33	33	1089	645.1	702.519
Minor	33	33	1089	645.1	702.519

上表是节点抗剪承载力的计算数据，包括节点区尺寸、有效面积、规范要求的允许剪应力、相应的抗剪承载力。

### 3.2 强柱弱梁验算

对于特殊抗弯框架，在节点处的所有梁、柱的抗弯承载力要满足 ACI 的要求，即  $\sum M_{nc} \geq \frac{6}{5} \sum M_{nb}$  (ACI 18.7.3.6)。这里，梁、柱的抗弯承载力均按名义强度计算。如图 4 所示，程序输出梁柱抗弯承载比  $(\frac{6\sum M_{nb}}{5\sum M_{nc}})$ ，每个节点显示其主轴、次轴方向的两个结果，比率小于 1 即满足要求，“N/A”代表数据不可得，通常因为该方向没有梁与之相交。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，本文不再列举相关表格。

### 4 小结

综上所述，框架梁的设计重点是抗弯、抗剪（扭），程序根据框架类型（一般抗弯框架、中等抗弯框架、特殊抗弯框架）分别执行相应的计算，不同类型的区别主要体现在：最大（最小）配筋率、梁端的抗弯配筋要求、设计剪力取值等。节点验算则是只针对特殊抗弯框架的计算内容。此外，本文对 ETABS 输出的设计细节信息进行了解释，据此用户可更深入地了解程序的计算过程和结果。

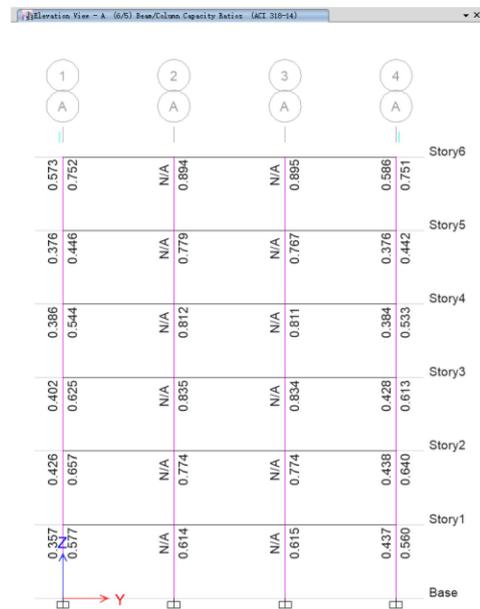


图 4 强柱弱梁验算结果显示