

ETABS 欧标混凝土框架设计要点详解（一）——框架梁、节点设计

筑信达 郑翔

本文将基于 EN 1992-1-1 规范（以下简称 EC2）和 EN 1998-1（以下简称 EC8）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。由于欧标涉及的公式参数非常繁杂、因此本文对公式参数不一一解释，各参数的取值和含义请参考具体规范条文。另外，本文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

在抗弯钢筋设计过程中，程序同时计算抗拉和抗压钢筋。当梁的设计弯矩大于单筋梁截面最大承受弯矩时考虑受压钢筋，工程师可通过增加梁的有效高度、宽度、混凝土等级等办法来避免使用受压钢筋。

设计过程基于简化的矩形应力块，如图 1（EC2 3.1.7（3））所示。当施加的弯矩超过了抗弯承载力时，根据附加的弯矩由受压钢筋和附加受拉钢筋承担的原则进行受压钢筋计算。

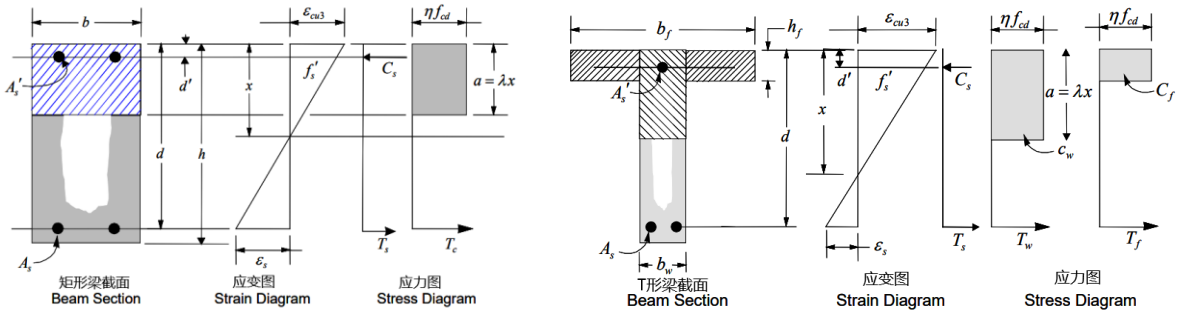


图 1 矩形梁、T 形梁正截面设计示意图

依据 EC2 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
受拉钢筋最小值 $A_{s,min}$ 取以下两值的较大值： $A_{s,min} = 0.26(f_{ctm} / f_{yk}) b_t d \quad (\text{EC2 Eq. 9.1N})$ $A_{s,min} = 0.0013 b_t d$ 其中： b_t —受拉区的宽度，取 T 型梁的腹板宽度 f_{ctm} —混凝土轴拉强度，	受拉钢筋最大值 $A_{s,max}$ 取： $A_{s,max} = 0.04 A_c \quad (\text{EC2 9.2.1.1 (3)})$ 其中： A_c —总截面面积

表 2 抗震框架梁的配筋限值

中延性抗弯框架梁/高延性抗弯框架梁
(1) 抗弯受拉钢筋的最小配筋率 $A_{s,min}$ 取： $\rho_{min} = 0.5(f_{ctm} / f_{yk}) \quad (\text{EC8 5.5.3.1.3(5), 5.4.3.1.2(5)})$
(2) 具有塑性铰的梁截面抗弯受拉钢筋的最大配筋率按如下公式计算： $\rho_{max} = \rho' + \frac{0.0018 f_{cd}}{\mu_{\phi} \varepsilon_{sy,d} f_{yd}} \quad (\text{EC8 5.5.3.1.3(3), 5.4.3.1.2(4)})$



当 $T_1 \geq T_c$ 时, $\mu_\phi = 2q_0 - 1$ (EC8 5.2.3.4(3));

当 $T_1 < T_c$ 时, $\mu_\phi = 1 + (2q_0 - 1)T_c / T_1$ (EC8 5.2.3.4(3));

程序未对此限值进行检查, 工程师需要自行在可能出较的部位进行检查。

1.2 设计结果输出

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。以下表格, 是某高延性抗弯框架中的一根梁的端部在某地震荷载组合下抗弯细节信息。

Design Moment and Flexural Reinforcement for Moment, M_{Ed3}

	Design Moment kN-m	Design N_{Ed} kN	-Moment Rebar mm²	+Moment Rebar mm²	Minimum Rebar mm²	Required Rebar mm²
Top (+2 Axis)	-397.8136	0	981.218	0	943.729	981.218
Bottom (-2 Axis)	198.9068	0	0	492.756	943.729	943.729

上表中, Design Moment 是该组合的设计弯矩值, Design N_{Ed} 是该组合的设计轴力值, 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。

当梁存在轴力时, 程序按照拉弯/压弯构件进行配筋设计。

2. 梁斜截面设计

2.1 抗剪箍筋计算假定

梁抗剪箍筋的计算包含以下假定:

1. 抗剪承载力计算是基于测站处的梁宽来进行计算的;
2. 假定所有的抗剪箍筋与纵向钢筋是垂直的, 未考虑弯起纵筋。

2.1 抗剪箍筋计算步骤

(1) 确定施加的剪力设计值 V_{Ed} :

对低延性抗弯框架而言, 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 3 的要求。

表 3 抗震框架梁的设计剪力要求

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与重力荷载下梁剪力的合力 (EC8 5.5.2.1); 其中: 框架节点处形成塑性铰时的抗弯能力计算得到的剪力需乘以 $\gamma_{Rd} = 1.2$	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与重力荷载下梁剪力的合力 (EC8 5.4.2.2); 其中: 框架节点处形成塑性铰时的抗弯能力计算得到的剪力需乘以 $\gamma_{Rd} = 1.0$	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, 若用户在定义梁截面时, 指定了延性梁的配筋面积 (图 2), 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。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} 。



框架截面的配筋数据
✕

设计类型

柱 (P-M2-M3)

梁 (M3)

钢筋材料

纵筋: R500

箍筋 (绑扎): R500

纵筋中心的保护层厚度

顶部钢筋: 20 mm

底部钢筋: 20 mm

延性梁的钢筋覆盖项

I端顶部钢筋: 2500 mm²

J端顶部钢筋: 2000 mm²

I端底部钢筋: 2500 mm²

J端底部钢筋: 2000 mm²

确定 取消

图 2 延性梁的钢筋覆盖项

(2) 确定混凝土的抗剪承载力 $V_{Rd,c}$:

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

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} 不应大于最大抗剪设计值 $V_{Rd,max}$ 。若剪力设计值超过此限值, 则会设计失败。最大抗剪设计值定义如下:

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

其中: θ 为受压层的角度, $21.8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$; 当荷载组合不包含地震作用时, 程序默认按照 $\theta = 21.8^\circ$ 计算; 当荷载组合包含地震作用时, 程序按 $\theta = 45^\circ$ 计算。

(4) 确定单位长度所需的抗剪箍筋面积 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。

抗剪箍筋的计算配筋率必须大于最小配筋率:

$$\rho_{w,\min} = (0.08 \sqrt{f_{ck}}) / f_{yk} \quad (\text{EC2 Eq. 9.5N})$$

(5) 确定抗剪所需的纵向钢筋面积

抗剪所需的纵向钢筋面积是由于钢筋的附加 ΔF_{ld} 产生的

$$\Delta F_{ld} = 0.5 V_{Ed} \cot \theta \quad (\text{EC2 Eq. 6.18})$$

在任意截面, 由于设计弯矩导致的附加剪力不允许超过如下限值:

$$\left(\frac{M_{Ed}}{z} \right) + \Delta F_{ld} \leq \left(\frac{M_{Ed,max}}{z} \right) \quad (\text{EC2 Eq. 6.18})$$

式中: $M_{Ed,max}$ 对应梁上最大弯矩, $z = 0.9d$



抗剪所需的纵向钢筋面积：

$$A_{sl} = \frac{\Delta F_{td}}{f_{ywd}}$$

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 抗剪设计结果输出

以下两张表格，是某高延性抗弯框架中的一根梁的端部在某地震荷载组合下抗剪细节信息。

Shear Force and Reinforcement for Shear, V_{Ed2}

Shear V_{Ed} kN	θ deg	$\tan(\theta)$ Unitless	Shear V_{Rdc} kN	Shear V_{Rds} kN	Shear $V_{Rd,max}$ kN	Rebar A_{sw}/s mm ² /m
152.0757	45	1	147.346	309.6461	1592.892	807.47

上表中，Shear V_{Ed} 是该组合的设计剪力值； θ 是受压层角度、当荷载组合包含地震作用时， $\theta = 45^\circ$ ；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与重力荷载下梁剪力的合力，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。

Additional Logitudinal Reinforcement for Shear

Moment M_{Ed} kN-m	Shear V_{Ed} kN	$M_{Ed,max}$ kN-m	z mm	F_{td} kN	$F_{td,limit}$ kN	$F_{td,design}$ kN	A_{slTop} mm ²
-86.7303	309.6461	117.3692	882	93.0993	133.0716	34.7379	79.897

上表中，Moment M_{Ed} 是该组合在该测站处的设计弯矩值；Shear V_{Ed} 是该组合在该测站处的设计剪力值； $M_{Ed,max}$ 是梁全长范围内该组合的设计弯矩最大值； $z=0.9d$ ； F_{td} 是对应根据公式 $\Delta F_{td} = 0.5V_{Ed} \cot \theta$ 得到的 ΔF_{td} ； $F_{td,limit}$ 是 $M_{Ed,max}$ 对应的钢筋最大拉力， $F_{td,limit} = M_{Ed,max} / z$ ； $F_{td,design}$ 是最终采用的 ΔF_{td} 取 F_{td} 和 $(M_{Ed,max} / z) - (M_{Ed} / z)$ 两者的较小值； A_{slTop} 是抗剪所需的纵向钢筋面积，根据公式 $A_{sl} = F_{td,design} / f_{ywd}$ 计算。

2.3 计算抗扭钢筋

沿着梁跨度方向，程序在各测站处对每一个设计组合设计其抗扭钢筋。以下为根据梁的扭矩进行纵向抗扭钢筋及横向抗扭钢筋的主要步骤：

(1) 确定调整后的扭矩值

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，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释放，或自行折减扭转刚度。

(2) 确定抗扭截面属性

对抗扭设计，需要计算相应的抗扭截面属性 A_k 、 t_{ef} 、 u 、 u_k ，这些属性的具体含义见 EC2 6.3.2 条或 ETABS 关于欧标的帮助文档。

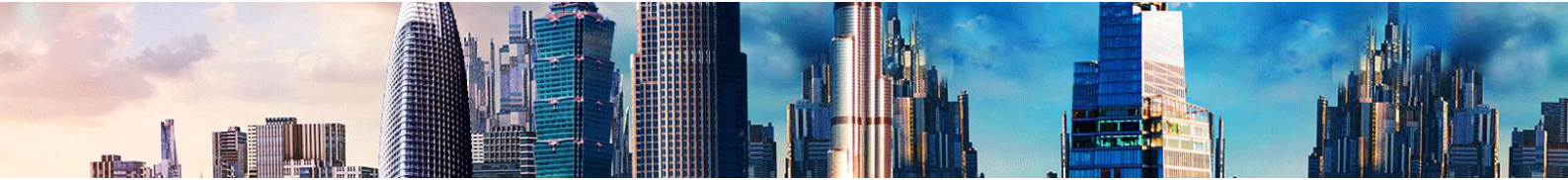
(3) 确定开裂扭矩

若满足以下条件，截面扭矩可忽略，只需按构造配置抗剪箍筋即可：

$$T_{Ed} / T_{Rd,c} + V_{Ed} / V_{Rd,c} \leq 1.0 \quad (\text{EC2 Eq. 6.31})$$

其中， $T_{Rd,c}$ 为开裂扭矩， $T_{Rd,c} = f_{ctd} t_{ef} 2A_k$

(4) 确定所需的抗扭钢筋面积。



若满足了上文定义的 EC2 Eq. 6.31, 可忽略扭矩 (EC2 6.3.2(5))。此时, 程序不需要配置抗扭钢筋。若不满足以上等式, 则需配置抗扭纵筋和抗扭箍筋。

当需配置抗扭箍筋时, 首先根据扭矩计算剪力 V_t :

$$V_t = 2(h - t_{ef})[(T_{Ed} - T_{con}) / 2A_k]$$

其中, $T_{con} = (1 - V_{Ed} / V_{Rd,c}) T_{Rd,c}$ 。

再计算所需的抗扭箍筋面积:

$$\frac{A_t}{s} = \frac{V_t}{z f_{ywd} \cot \theta}$$

最后, 计算所需抗扭纵筋面积:

$$A_{sl} = \frac{T_{Ed}}{2A_k} \cot \theta \frac{u_k}{f_{yd}} \quad (\text{EC2 Eq. 6.28})$$

其中, θ 为受压层的角度, 同梁抗剪设计时的取值。程序对此值的允许取值范围为 21.8° 和 45° 之间, 程序的默认值为 45° 。

程序同时校核了剪扭组合值的上限值, 其校核如下:

$$\frac{T_{Ed}}{T_{Rd,max}} + \frac{V_{Ed}}{V_{Rd,max}} \leq 1.0 \quad (\text{EC2 Eq. 6.29})$$

其中, 扭矩抗力设计值 $T_{Rd,max}$ 由下式计算:

$$T_{Rd,max} = 2v\alpha_{cw}f_{cd}A_k t_{ef} \sin \theta \cos \theta \quad (\text{EC2 Eq. 6.30})$$

当等式 (EC2 Eq. 6.29) 大于 1.0 时, 程序会提示设计失败, 此时, 需要增大构件截面尺寸。

程序输出的梁抗扭纵筋和抗扭箍筋面积仅是根据强度计算得到, 未考虑箍筋及纵筋的最小配筋率及钢筋间距要求, 这部分工作由工程师自行校核。

2.4 抗扭设计结果输出

以下表格, 是某高延性抗弯框架中的一根梁的端部在某地震荷载组合下抗扭细节信息。

扭矩和抗扭配筋 T_{Ed}

Torsion T_{Ed} kN-m	T_{cr} kN-m	Area A_k cm ²	Perimeter, u_k mm	Rebar A_t/s mm ² /m	Rebar A_{sl} mm ²
24.5029	3.6233	1633.1	2138.5	147.46	368.972

上表中, Torsion T_{Ed} 是该组合的设计扭矩值; T_{cr} 是对应的 T_{con} ; Rebar A_t/s 是单位长度所需的抗扭箍筋面积; Rebar A_{sl} 是所需抗扭纵筋面积。

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. 框架类型为中延性抗弯框架 (DCM MRF) 或高延性抗弯框架 (DCH MRF);
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

程序根据 EC8 5.5.3.3 (2) 分别计算柱主次方向上的节点面积。程序通过将梁端的弯矩等效为拉力 T 和压力 C，再结合柱的剪力 V_c ，通过力的平衡来求得节点区的剪力（可参考图 2，详细解释请参见 ETABS 自带的设计说明手册）。其中梁端的弯矩是对应梁的抗弯承载力（需考虑钢筋硬化导致的超强系数 $\gamma_{Rd}=1.2$ ）。

最终节点区的水平剪力为：

$$V_{jhd} = T_L + T_R - V_C$$

节点区的水平剪力不得大于设计抗剪强度：

$$V_{jhd} \leq \begin{cases} \eta f_{cd} \sqrt{1 - \frac{V_d}{\eta}} b_j h_{jc} & (\text{内部节点}) \\ 0.8 \eta f_{cd} \sqrt{1 - \frac{V_d}{\eta}} b_j h_{jc} & (\text{外部节点}) \end{cases} \quad (\text{EC8 Eq. 5.33})$$

其中：内部节点指内柱对应的梁柱节点；外部节点指边柱和角柱对应的梁柱节点。

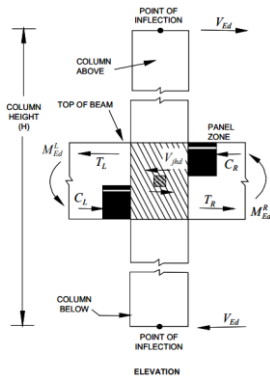


图 3 梁柱节点分析立面图

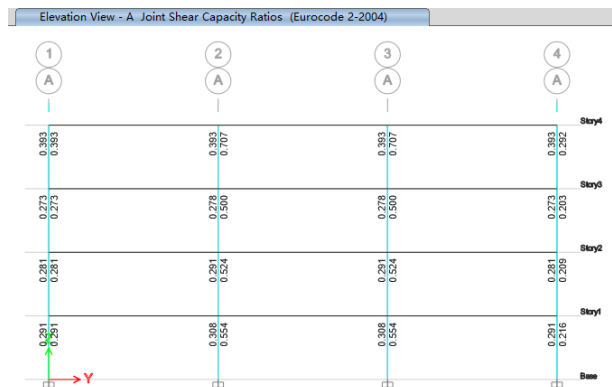


图 4 节点区抗剪承载力比

图 4 是 ETABS 显示的节点区抗剪承载力比，每个节点显示其主轴、次轴方向的两个结果，比值小于 1.0 即满足要求，若为“N/A”代表数据不可得，通常是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 Check/Design

	Joint Shear A_{sh} cm ²	Shear V_{Ed} , Top kN	Shear V_{jhd} kN	Shear V_{Rd} Conc kN	Joint Area cm ²	Shear Ratio Unitless
Major Shear, V_2	8	626.087	1330.4348	2185.9382	2871.1	0.609
Minor Shear, V_3	8	626.087	1330.4348	2185.9382	2871.1	0.609

上表中，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 $V_{Rd}Conc$ 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 $V_{Rd}Conc$ 的比值。



3.2 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 6 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 5 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 5 强柱弱梁输出表格

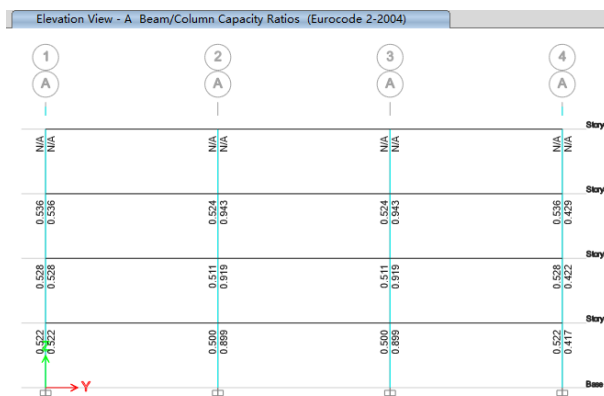


图 6 强柱弱梁验算结果

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（低延性抗弯框架、中延性抗弯框架、高延性抗弯框架）分别执行相应的计算，不同类型的区别主要体现在：对于中/高延性抗弯框架梁，其最大（最小）配筋率要求更严格、其设计剪力取值需根据梁端实配钢筋对应的抗弯能力反算。节点验算则包含两部分内容：高延性抗弯框架需验算节点区水平剪力及节点区约束水平箍筋；中/高延性抗弯框架需验算强柱弱梁。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。

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 v21.0.0 联机帮助文档 Concrete Frame Design Manual(Eurocode 2-2004 with 8-2004).