

基于 SAFE 的欧标冲切设计概述及与国标的异同

筑信达 郑翔

国内工程师在进行海外项目设计时，运用最频繁的外标是美标和欧标。关于美标的冲切计算已经在往期的《筑信达技术通讯》介绍过，但基于欧标冲切计算的相关内容较少。因此，本文将结合 SAFE 软件介绍欧标 EN 1992-1-1 对非预应力构件冲切设计的相关规定，并分析与美标、国标的异同。最后，介绍 SAFE 进行欧标冲切计算时的设置和结果解读。

1. 冲切计算流程

根据 EN 1992-1-1 第 6.4.3 条，冲切设计需要分别验算柱边位置和基本控制周长 u_1 位置；当需配置抗冲切钢筋时，还需要另外验算不需配置抗冲切钢筋的周长 $u_{out,ef}$ 位置。

(1) 抗冲切验算时，无论是有筋冲切还是无筋冲切，在柱边或加载区域的最大冲切剪应力 v_{Ed} 应满足下式要求：

$$v_{Ed} < v_{Rd,max}$$

式中： v_{Ed} 为柱边最大冲切剪应力（参考本文 1.1 和 1.4 节）；

$v_{Rd,max}$ 为控制截面的最大抗冲切承载力设计值，由执行欧标国家的国家附录确定，建议值取 $0.5v_{fcd}$ （EC2 式 6.53 注释）；

$$v = 0.6 \times (1 - f_{ck}/250) \text{ (EC2 式 6.6N) ;}$$

f_{cd} 为混凝土抗压强度设计值；

(2) 当 $v_{Ed} > v_{Rd,max}$ 时，冲切验算失败，截面尺寸需增大；

(3) 当 $v_{Ed} < v_{Rd,c}$ 时，无需配置抗冲切钢筋；

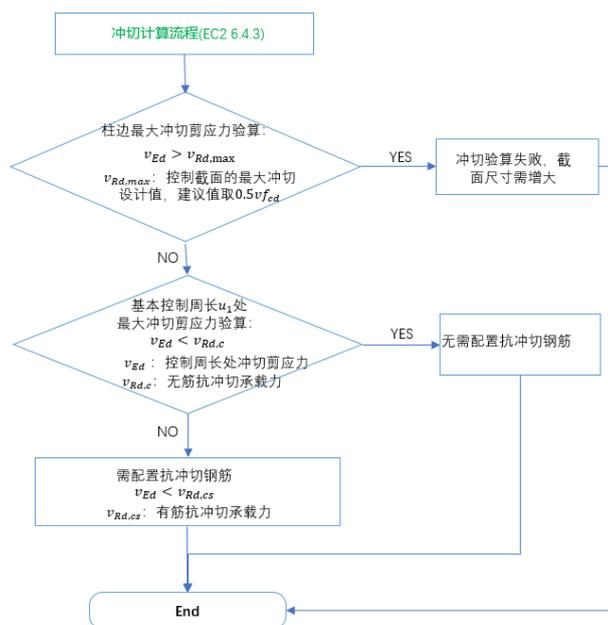
式中： $v_{Rd,c}$ 为无筋抗冲切承载力（参考本文 1.2 节）；

(4) 当 $v_{Ed} \geq v_{Rd,c}$ 时，需配置抗冲切钢筋，此时承载力需满足 $v_{Ed} < v_{Rd,cs}$ ；

式中： $v_{Rd,cs}$ 为有筋抗冲切承载力（参考本文 1.3 节）；

注意：(1) 和 (2) 的 v_{Ed} 是指在柱边或加载区域的最大冲切剪应力；(3) 和 (4) 的 v_{Ed} 是指在基本控制周长处的最大冲切剪应力。

以上冲切计算的基本流程可总结为下图：



1.1 最大冲切剪应力 v_{Ed}

根据 EN 1992-1-1 第 6.4.3 条第 (3) 款:

当相对于控制周长支承反力存在偏心时, 无筋或有筋冲切的最大冲切剪应力均按下式计算:

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_i d} \quad (\text{EC2 式 6.38})$$

式中: β —弯矩影响系数 (无弯矩时 $\beta = 1$); 系数 β 与冲切力平面形状和作用位置有关, 是考虑不平衡弯矩对最大冲切剪应力的不利影响 (参考本文第 3 节)

V_{Ed} —冲切力

v_{Ed} —控制周长处冲切剪应力

u_i —控制周长 (根据不同验算位置取不同值, 不一定为 u_1)

d —板截面有效高度

1.2 无筋抗冲切承载力 $v_{Rd,c}$

根据 EN 1992-1-1 第 6.4.4 条第 (1) 款, 无筋抗冲切承载力 $v_{Rd,c}$ 按下式计算:

$$v_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] \geq \left[v_{\min} + k_1 \sigma_{cp} \right] \quad (\text{EC2 式 6.47})$$

其中:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0, \quad \rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \rho_{lz}} \leq 0.02, \quad \sigma_{cp} = (\sigma_{cy} + \sigma_{cz}) / 2, \quad v_{\min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

式中: f_{ck} —抗压强度特征值 (MPa);

d —板的有效高度 (mm);

ρ_{ly} 、 ρ_{lz} — y 和 z 方向的纵向受拉钢筋配筋率。在 SAFE 中当设计板带 Layer A 和 Layer B 彼此正交时, 取两者平

均值; 当设计板带不是彼此正交时, 取为 0, 此时 $v_{Rd,c} = v_{\min} + k_1 \sigma_{cp}$ 。

σ_{cy} 、 σ_{cz} — y 和 z 方向上临界截面的混凝土正应力 (MPa, 受压为正), 偏保守时可取 0;

$$C_{Rd,c} = 0.18 / \gamma_c$$

$$k_1 = 0.1$$

1.3 有筋抗冲切承载力 $v_{Rd,cs}$

当板或基础配置抗冲切钢筋后, 其破坏机理与无抗冲切钢筋的情况有所不同。一般情况下, 板冲切破坏时, 抗冲切钢筋不会屈服, 其作用是使板能够承受更大的变形, 减小了临界截面混凝土的压应变, 从而抗冲切承载力提高。由于板的变形增大, 混凝土本身起的抗冲切作用减小, 提高的抗冲切承载力由抗冲切钢筋补偿。所以, 考虑混凝土的抗冲切作用时, 需进行一定的折减。

根据 EN 1992-1-1 第 6.4.5 条第 (1) 款, 有筋抗冲切承载力 $v_{Rd,cs}$ 按下式计算:

$$v_{Rd,cs} = 0.75 v_{Rd,c} + 1.5 \frac{d A_{sw} f_{ywd,ef}}{s_r u_1 d} \sin \alpha \quad (\text{EC2 式 6.52})$$

式中: $v_{Rd,c}$ —无筋抗冲切承载力;

A_{sw} —冲切控制周长处, 抗冲切钢筋的总面积;

s_r —抗冲切钢筋的径向间距;

$f_{ywd,ef}$ —抗冲切钢筋的有效设计强度

$$f_{ywd,ef} = 250 + 0.25d \leq f_{ywd} (\text{MPa});$$

d —板的有效高度;

α —抗冲切钢筋与板平面的夹角;

1.4 有筋冲切时, 柱边最大冲切剪应力验算

根据 EN 1992-1-1 第 6.4.5 条第 (3) 款, 有筋冲切时需验算柱边最大冲切剪应力。

柱边的最大冲切剪应力按下式验算：

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd,max} \quad (\text{EC2 式 6.53})$$

式中： V_{Ed} —冲切力（按柱边确定）

v_{Ed} —柱边控制周长处冲切剪应力

$v_{Rd,max}$ 是控制截面的最大抗冲切设计值，由执行欧标国家的国家附录确定，建议取值 $0.5v_{fcd}$ （EC2 式 6.53 注释）； $v = 0.6 \times (1 - f_{ck}/250)$ （式 6.6N）；

β —弯矩影响系数（参考 EC2 6.4.3(3), (4)和(5)）

u_0 —柱边控制周长；对内柱， u_0 =柱本身周长；对边柱， $u_0 = c_2 + 3d \leq c_2 + 2c_1$ ；对角柱， $u_0 = 3d \leq c_1 + c_2$ ； c_1, c_2 —柱尺寸

d —板截面有效高度

SAFE 软件在验算有筋冲切时，若柱边的最大冲切剪应力 $v_{Ed} > v_{Rd,max}$ ，程序会提示“Failed, reinforcing not helpful because punching stress exceeds code limits”，即冲切剪应力超出规范限值，抗冲切钢筋无效。

1.5 欧标、美标、国标冲切计算流程对比

冲切流程方面，欧标和美标、国标类似。其中欧标和美标均是验算冲切剪应力，国标是验算的冲切力。国标在验算公式上略有差异，但是思路类似。具体到细节上，欧标、美标、国标还是存在不小差异。

欧标的基本控制周长是根据距柱边 $2d$ 处的周长确定的，而美标、国标是根据距柱边 $d/2$ 处的周长确定的，并且冲切周长的形状也不一样（详见本文第 2 节）。

欧标验算最大冲切应力的位置是柱边；美标、国标取的依然是距柱边 $d/2$ 处。

美标、国标的冲切分析对比可参考往期技术通讯：[基于 SAFE 的美标冲切设计概述及与国标的异同](#)。

表 1 总结了三本规范冲切计算的大致流程。

表 1 冲切计算流程对比

	欧标	美标	国标
(1) 无需配置抗冲切钢筋	$v_{Ed} < v_{Rd,c}$ EN 1992-1-1 第 6.4.3 条	$\Phi v_c \geq v_u$ ACI 4.6.1 条	$F_l \leq 0.7\beta_h f_t \eta u_m h_0$ 混规 6.5.1 条
(2) 配置抗冲切钢筋	$v_{Ed} \geq v_{Rd,c}$ $v_{Ed} < v_{Rd,cs}$ EN 1992-1-1 第 6.4.3 条	$\Phi(v_n + v_s) \geq v_u$ ACI 4.6.1 条	$F_l \leq 0.5f_t \eta u_m h_0 + 0.8f_{yv} A_{svu} + 0.8f_y A_{sbu} \sin \alpha$ 混规 6.5.3 条
(3) 最大冲切应力	$v_{Ed} < v_{Rd,max}$ EN 1992-1-1 第 6.4.3 条	$\Phi v_{max} \geq v_u$ ACI 22.6.4.1 条	$F_l \leq 1.2f_t \eta u_m h_0$ 混规 6.5.3 条

2. 冲切控制截面

根据 EN 1992-1-1 6.4.1 条规定，冲切验算的失效模型如图 1、2 所示。其中：A 为基本控制截面，冲切锥体角度按 26.6° 控制；B 为基本控制区域面积；C 为基本控制周长 u_1 ；D 为加载区域面积（一般与柱截面面积一致）； r_{cont} 为外围控制周长。

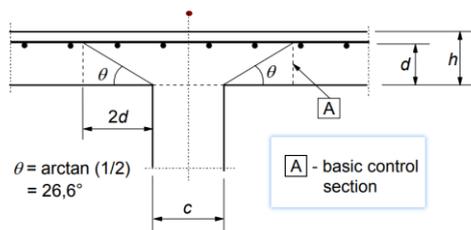


图 1 冲切验算模型立面图（欧标）

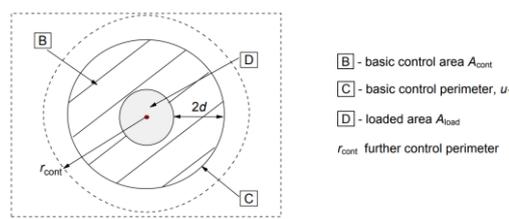


图 2 冲切验算模型平面图（欧标）

根据 EN 1992-1-1 6.4.2 条规定，基本控制周长 u_1 一般取距加载区域 $2d$ 处的周长，一般按长度最小确定周长（图 3）。
 冲切截面的有效高度 d 是取两个钢筋正交方向的有效高度的平均值。

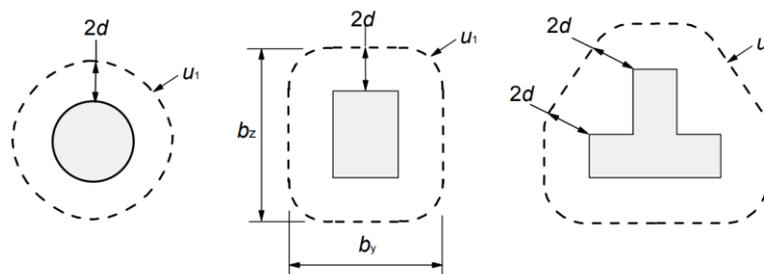


图 3 典型截面的冲切控制周长（欧标）

当板开有孔洞且孔洞至局部荷载作用面积边缘的距离不大于 $6d$ 时，受冲切承载力计算中取用的控制周长 u_1 ，应扣除局部荷载作用面积中心至开孔外边画出的两条切线之间所包含的长度（图 4）。当图中 $l_1 > l_2$ 时，孔洞边长 l_2 用 $\sqrt{l_1 l_2}$ 代替。

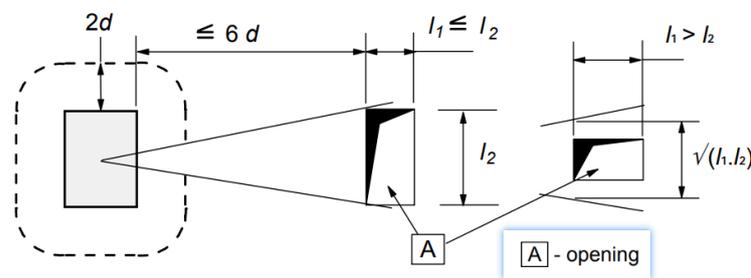


图 4 邻近孔洞时的冲切控制周长（欧标）

当加载区接近边缘或角部时，如果按照图 5 取值的周长（不包括无支承的边）小于图 3 的值，则控制周长按图 5 取值。

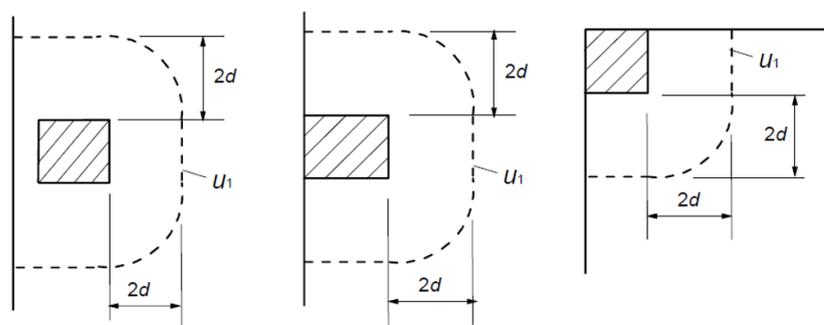


图 5 边柱、角柱的冲切控制周长（欧标）

欧标在冲切控制周长的定义上和美标、国标差异较大。如图 6 所示，美标、国标冲切验算的临界截面位于距离支承面 $d/2$ 处，其中 d 指冲切截面有效高度，取两个钢筋正交方向的有效高度的平均值。相当于，美标、国标的冲切锥体角度按 45° 控制，欧标的冲切锥体角度按 26.6° 控制。并且美标、国标的冲切周长无倒角，欧标的冲切周长存在倒角。因此，美标、国标的冲切控制周长小于欧标。

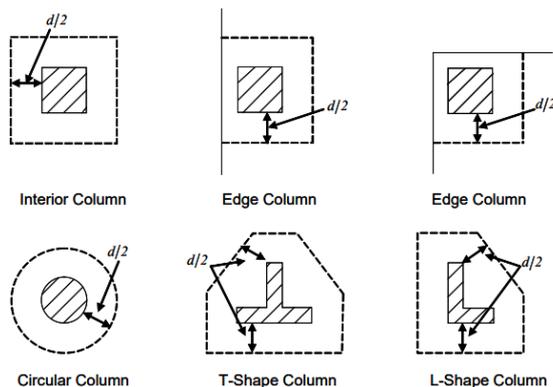


图 6 美标、国标的冲切控制周长

3.不平衡弯矩的影响

计算无筋或有筋冲切的最大冲切剪应力时，欧标是通过弯矩影响系数 β 考虑不平衡弯矩的不利影响。其中，系数 β 与冲切力平面形状和作用位置有关。以内柱为例，按下式计算：

$$\beta = 1 + k_1 \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \frac{u_1}{W_1} \quad (\text{EC2 式 6.39})$$

式中： k_1 —与柱尺寸 c_1 、 c_2 的比值有关的系数（EC2 表 6.1），

M_{Ed} —绕相应中心轴，基本控制周长范围内板传递给柱的不平衡弯矩

W_1 —考虑剪应力分布的基于控制周长 u_1 的函数，按下式计算：

$$W_1 = \int_0^{u_1} |e| dl$$

u_1 —基本控制周长（参考本文第 2 节）

dl —周长的增量

e — dl 段到中心轴的距离，绕该轴作用的弯矩为 M_{Ed}

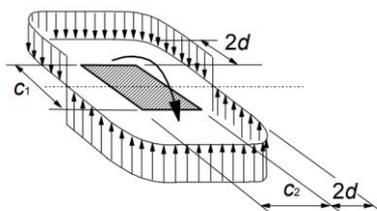


图 7 内柱处不平衡弯矩产生的剪应力

SAFE 软件并不会直接输出弯矩影响系数 β ，而是只输出 k_1 ， M_{Ed} ， W_1 ， u_1 以及算得的 v_{Ed} 。程序默认按照双向受弯公式计算：

$$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{u_i d} \left[1 + k_{1,2} \frac{M_{Ed,2}}{V_{Ed}} \frac{u_1}{W_{1,2}} + k_{1,3} \frac{M_{Ed,3}}{V_{Ed}} \frac{u_1}{W_{1,3}} \right]$$

从以上分析可知，欧标考虑不平衡弯矩的方式与国标美标存在较大差异。

美标、国标是直接根据不平衡弯矩和冲切力计算冲切临界截面处最大组合剪应力。其中美标是采用应力形式，国标是采用力的形式，但这两者的物理意义是一致的，具体分析可参考往期技术通讯：[基于 SAFE 的美标冲切设计概述及与国标的异同](#)。

欧标是先根据不平衡弯矩和冲切力计算弯矩影响系数 β ，再通过 β 乘以平均剪应力进而得到最大组合剪应力。并且欧标与计算弯矩影响系数 β 相关的各项参数也异于美标、国标，尤其是参数 W_1 ，量纲是 m^2 ，既不是截面模量也不是惯性矩，其

中 M_{Ed}/W_1 可以理解为不平衡弯矩在控制周长范围的剪力分布。欧标的不平衡弯矩是根据距柱边 $2d$ 处的周长确定的，而美标、国标的不平衡弯矩是根据距柱边 $d/2$ 处的周长确定的，并且冲切周长的形状也不一样，最终不平衡弯矩的数值差异明显。

表 2 总结了三本规范最大冲切剪应力的计算公式：

表 2 最大冲切剪应力计算公式

	欧标	美标	国标
最大冲切剪应力	$v_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{ud} \left[1 + k \frac{M_{Ed,2} u_1}{V_{Ed} W_{1,2}} + k \frac{M_{Ed,3} u_1}{V_{Ed} W_{1,3}} \right]$ $W_1 = \int_0^{u_i} e dl$ EN 1992-1-1 第 6.4.3 条	$v_{u,max} = v_{ug} + \frac{\gamma_v M_{sc} c_{AB}}{J_c} + \frac{\gamma_v M_{sc} c_{CD}}{J_c}$ $J_c = \frac{d(c_1+d)^3}{6} + \frac{(c_1+d)d^3}{6} + \frac{d(c_2+d)(c_1+d)^2}{2}$ ACI 8.4.4.2.3	$F_{l,eq} = F_l + \tau_{umb,max} \mu_m h_0$ $\tau_{umb,max} = \frac{\alpha_{0x} M_{umb,x} a_x}{I_{cx}} + \frac{\alpha_{0y} M_{umb,y} a_y}{I_{cy}}$ $I_c = \frac{h_0 a_t^3}{6} + 2h_0 a_m \left(\frac{a_t}{2} \right)^2$ 混规 附录 F

4. 抗冲切钢筋配置范围

根据 EN 1992-1-1 第 6.4.5 条第 4 款，不需要配置抗冲切钢筋的控制周长 u_{out} 或 $u_{out,ef}$ 可由下式计算：

$$u_{out,ef} = \frac{\beta V_{Ed}}{v_{Rd,c} d} \quad (\text{EC2 式 6.54})$$

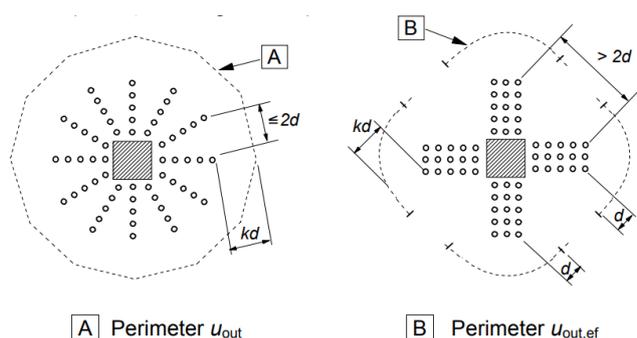


图 8 有抗冲切钢筋的内柱控制周长

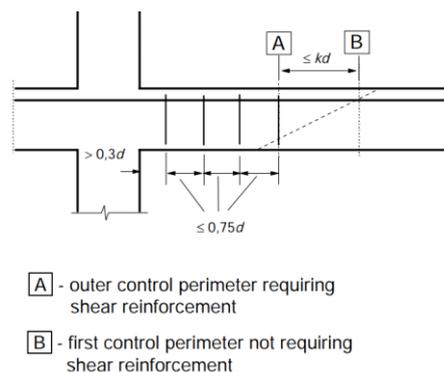


图 9 抗冲切钢筋布置图

根据 EN 1992-1-1 第 9.4.3 条，当要求布置抗冲切钢筋时，最外围的抗冲切钢筋布置在 u_{out} 或 $u_{out,ef}$ 且不超过 kd 的范围内（图 8）。图 8 中的虚线 A 指控制周长 u_{out} ，虚线 B 指有效控制周长 $u_{out,ef}$ 。 k 值由执行欧洲规范国家的国家附录确定，建议值为 $k=1.5$ ，至少应布置两个箍筋，间距不超过 $0.75d$ （图 9）。图 9 中的 A 是指最外侧抗冲切钢筋位置，B 是指不需要配置抗冲切钢筋的控制周长位置。

在抗冲切钢筋配置范围的计算方面，美标、国标的计算思路和欧标是一致的，都是以配置抗冲切钢筋的冲切破坏锥体外扩一定范围确定最不利周长、并采用无筋抗冲切承载力进行验算（表 3）。欧标的不需要配置抗冲切钢筋的控制周长 $u_{out,ef}$ 可以是非封闭曲线，而美标的第二临界面的冲切形状是封闭的多边形，国标在第二临界面的冲切形状上没有具体规定。

表 3 抗冲切钢筋配置范围

	欧标	美标	国标
抗冲切钢筋配置范围	根据 EN 1992-1-1 第 6.4.5 条第 4 款，不需要配置抗冲切钢筋的控制周长 u_{out} 或 $u_{out,ef}$ 可由下式计算： $u_{out,ef} = \frac{\beta V_{Ed}}{v_{Rd,c} d}$	根据 ACI 22.6.4.2 条，配置了抗冲切箍筋后，除需取距离柱边 $d/2$ 的第一临界截面验算冲切以外，还需要考虑第二临界截面，其位于最外侧抗冲切箍筋以外 $d/2$ 处，其冲切形状为多边形。第二临界截面按无筋冲切验算。	《混规》GB50010-2010 的 6.5.4 条规定，配置抗冲切钢筋的冲切破坏锥体以外的截面，尚应按本规范第 6.5.1 条（即国标无筋冲切公式）的规定进行受冲切承载力计算，此时， u_m 应取配置抗冲切钢筋的冲切破坏锥体以外 $0.5h_0$ 处的最不利周长。

5.SAFE 冲切设计

以某无梁楼盖的冲切校核为例：若用户建模过程正确，无需修改冲切设计覆盖项，程序能自动判断构件是内柱、边柱还是角柱；能自动计算冲切周长及冲切截面有效高度。若经过计算后，冲切不满足，则可选中冲切承载力不足的节点，通过【设计>冲切校核覆盖】，输入抗冲切钢筋样式、钢筋强度、钢筋直径及钢筋间距，之后再次运行设计，程序会按有筋冲切再次进行设计并输出更新后的设计结果。各覆盖项的含义见 5.1 节。

5.1 覆盖项设置

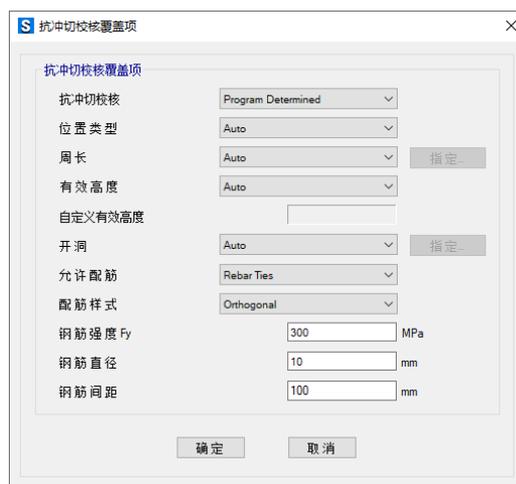


图 10 SAFE 抗冲切校核覆盖项

SAFE软件中，可根据选择的各国规范，进行相应的冲切设计。在冲切设计中，最重要的就是冲切设计覆盖项，现介绍各项的意义：

表 4 冲切设计覆盖项

NO.	项	可选值	默认值及说明
1	冲切校核	程序默认/否	“程序确定”则程序默认对模型进行冲切校核；选择“否”，则对选中的构件不进行冲切设计。
2	位置类型	自动/内部/边1/边2/边3/边4/角1/角2/角3/角4	“自动”则程序自动判断构件是内柱、边柱还是角柱；也可人为指定，影响冲切周长及柱类型。
3	周长	自动/指定冲切周长/指定受荷尺寸	“自动”则程序自动确定冲切周长；也可人为指定冲切周长。
4	有效高度	自动/指定	“自动”则程序自动确定有效高度；也可人为指定有效高度。
5	开洞	自动/指定	“自动”则程序自动根据开洞位置确定冲切周长；也可人为指定开洞数据。
6	容许钢筋	否/箍筋/剪力架	“否”则程序按无筋冲切计算；“箍筋”则无筋冲切不满足时，按抗冲切箍筋计算；“剪力架”则无筋冲切不满足时，按抗冲切栓钉计算。
7	钢筋强度	用户输入	抗冲切钢筋的设计强度 F_y 。
8	钢筋直径	用户输入	抗冲切钢筋的直径。
9	钢筋间距	用户输入	抗冲切钢筋的间距 s

5.2 欧标设计结果及解读

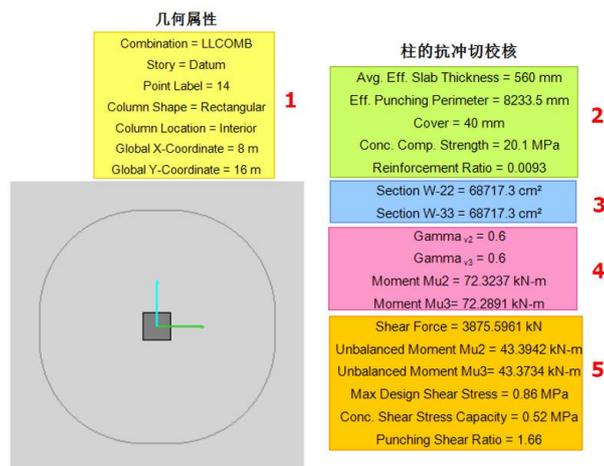


图 11 冲切详细设计细节

SAFE 会在设计细节中输出详细的设计信息，如图 11 所示。以下按序号说明各部分内容的含义：

1. 冲切位置处基本信息，包括：

默认最不利荷载组合、柱截面中心点标签、截面形状、位置信息、柱截面中心点坐标。

2. 计算冲切周长的相关参数，包括：

冲切截面有效高度、冲切周长、混凝土保护层厚度、以及混凝土抗压强度、配筋率（板带配筋率）。

3. W-22、W-33 为绕 2 轴、3 轴考虑剪应力分布的基于控制周长 u_1 的函数。

4. Γ_{v} 为规范规定的 k 值，与柱尺寸 c_1 、 c_2 的比值有关的系数，其值是与不平衡弯矩相关的函数。

Moment Mu 为不平衡弯矩，绕临界截面周长重心轴作用，近似等于柱顶弯矩与剪力引起的弯矩之和。

5. Shear Force 为剪力，近似等于柱底反力扣除柱自重、冲切周长内的荷载(包含冲切范围内材料的自重)。

Unbalance Moment MU: 代表转化为剪力的不平衡弯矩值，等于 Γ_{v} 与 Moment MU 的乘积。

Max Design Shear Stress 为临界截面处的设计剪应力 v_{Ed} ，程序分别在柱截面四个点处计算剪应力，取最大值。

Conc. Shear Stress Capacity 为混凝土项承载力 $v_{Rd,c}$

Punching Shear Ratio: 冲切系数，为设计剪应力与混凝土项承载力的比值，反映抗冲切承载能力。该值小于 1 时代表冲切验算满足要求，大于 1 代表抗剪承载力不满足要求，需要配置抗冲切钢筋。

抗冲切配筋设计

Rebar Yield Strength = 300 MPa
Rebar Diameter = 16 mm
Number of Rebar Sets = 7
Number of Single Leg Stirrups per Set = 17
Typical Rebar Spacing = 100 mm

图 12 冲切钢筋输出细节

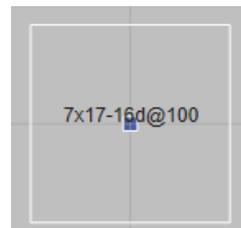


图 13 冲切钢筋示意图

图 12、13 是 SAFE 冲切配筋信息的表达。

图 12 中，从上到下的含义为：抗冲切钢筋强度 f_y 、箍筋直径、箍筋间距范围内与冲切锥体斜截面相交的全部箍筋根数、所需箍筋总排数，两排箍筋之间的距离。

综合图 12、13 的信息可知，抗冲切箍筋的屈服强度 f_y 为 300MPa，箍筋直径为 16mm，箍筋间距范围内与冲切锥体斜截面相交的全部箍筋根数为 7 根，所需箍筋总排数为 17 排。对于内柱，可在四个方向均布置抗冲切箍筋，与冲切锥体斜截面相交的全部箍筋 7 根可分配在 4 个方向，则每个方向为 2 根箍筋，故图 14 中的 1-1 截图为双臂箍。之后在每个方向均布置 17 排箍筋，且两排箍筋之间的距离为 100mm，则最终的箍筋布置方案如图 14。

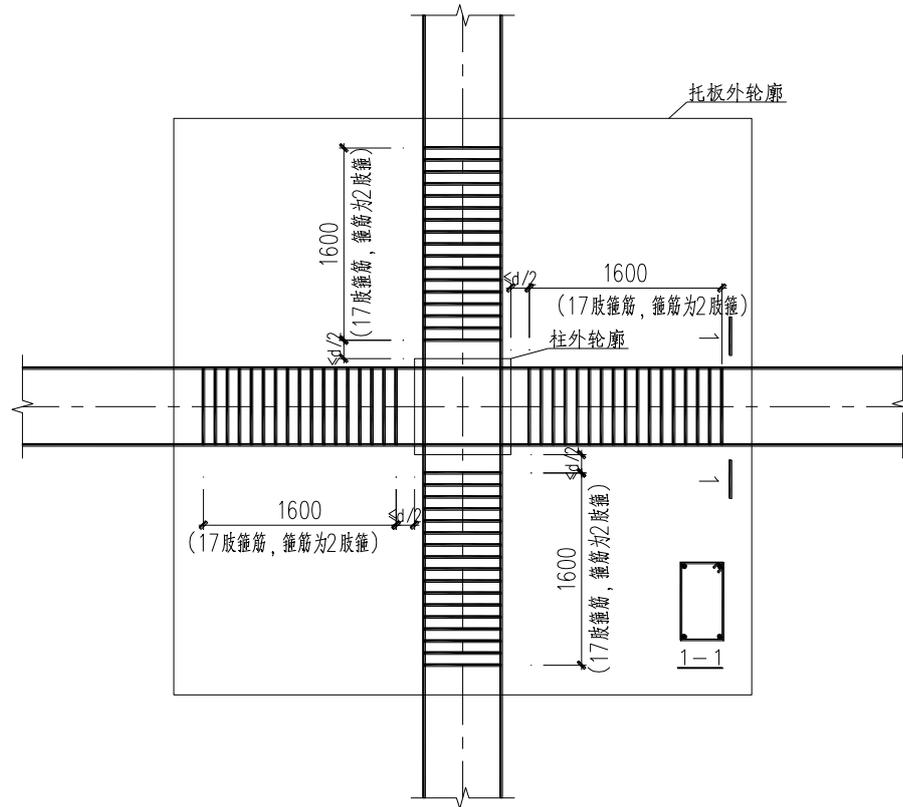


图 14 冲切钢筋布置平面示意图

以上 SAFE 关于板冲切验算及设计的功能均已在 ETABS 中实现。

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] 混凝土结构设计规范: GB50010-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [5] Building Code Requirements for Structural Concrete. ACI 318M-14 [S]. 2014.
- [6] Computers & Structures Inc. SAFE v20.3.0 联机帮助文档 Reinforced Concrete Slab Design Manual For SAFE