

ETABS 美标剪力墙、连梁设计

筑信达 李立 吴文博

本文将基于 ACI 318-14 规范（以下简称 ACI）讨论钢筋混凝土剪力墙、连梁设计在 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，解释相关设计参数、结果表达的含义，希望帮助用户了解 ETABS 实现了规范的哪些要求，能自主修改设计参数，并读懂程序输出的设计结果细节。

1. ETABS 剪力墙设计的通用准则

ETABS 有一套适用于剪力墙设计的通用准则，能够将壳应力转换为构件内力，并能灵活设置墙肢形状，这是实现剪力墙设计的前提。以下介绍这些通用准则，它们适用于所有国家的设计规范。

1.1 墙肢\连梁标签

剪力墙和连梁在 ETABS 中是用壳单元模拟，壳单元的应力结果不能直接用于构件的配筋设计。因而，ETABS 使用“标签”来界定墙肢、连梁构件，统计其内力并用于配筋。所以，同一楼层中不同的墙肢、连梁要指定不同的标签名称。但不同楼层之间的标签名称可以重复，因为程序可以通过楼层来区分而不会混淆。

如果在墙的两端绘制了柱，可以对端柱指定与墙肢相同的标签，这时程序将墙肢和端柱作为整体来统计内力并进行设计。如图 1 所示，程序通过识别标签，自动计入墙两端柱后形成 SD 截面。

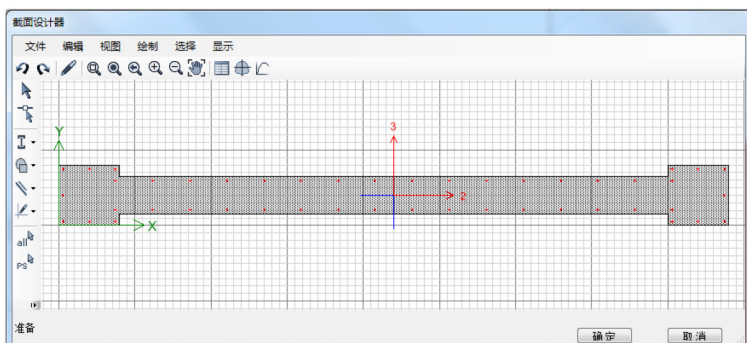


图 1 通用墙肢 SD 截面



图 2 定义通用墙肢截面

1.2 设计测站

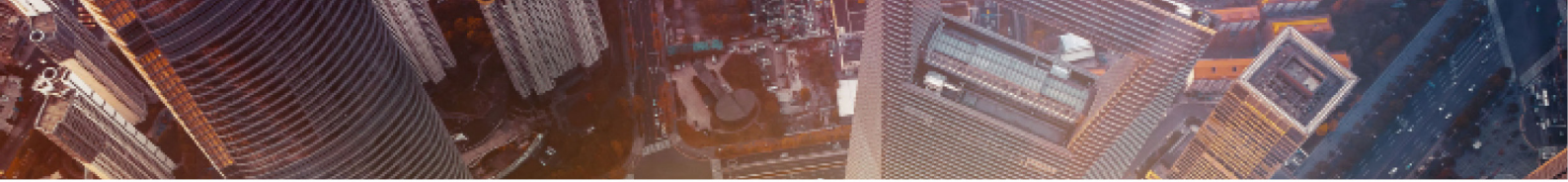
设计测站即设计截面所在的位置。ETABS 取墙肢的顶部和底部和连梁的左端和右端分别统计内力、设计配筋并输出结果。如果想得到墙肢或连梁中部的的设计结果，只能将其打断。注意，如果将连梁打断成两段或更多，会影响其抗震斜向配筋的计算。此时，斜筋的角度与每段的长度相关，而不是整个连梁的跨度，将低估斜筋所需的面积。

1.3 通用墙肢截面

通用墙肢截面是通过截面设计器来定义的墙肢截面，即 SD 截面。这类截面可以来自现有的墙肢（即图 1 的情况），也可以由用户自定义。通过命令【设计>剪力墙设计>定义通用的墙肢截面】打开如图 2 所示的对话框，即可对指定墙肢的几何形状和配筋进行编辑。程序可对编辑后的墙肢截面进行配筋设计或校核。

2. 墙肢设计

对于压弯设计，ETABS 提供三种墙肢设计方法选项，简化法（Simplified C&T Section）、均匀配筋法（Uniform Reinforcing Pier Section）和通用配筋法（General Reinforcing）。后两种方法除了用于设计，还可以用于校核。从原理上，均匀配筋法和通用配筋法是一样的，都是基于 P-M-M 相关面来设计或校核墙肢。差异在于两者的钢筋分布方式不同，均匀配筋法所使用的钢筋直径和间距在截面内是相同的，通用配筋法只针对通用墙肢截面，其截面形状和配筋方式都由用户指定。以下介绍简化法和均匀配筋法的原理。



2.1 简化法

简化法的原理是将墙肢的轴力、弯矩等效为两端暗柱的轴力，然后对暗柱进行配筋计算。该方法适用于一字型墙肢的设计。如图 3 所示，首先将墙肢内力 P_u 、 M_u 等效为 P_{left} 和 P_{right} （图中下标 top、bot 代表墙肢顶部、底部），然后程序初始设定暗柱的边长等于墙厚度，即 $B=t_p$ ，若其配筋结果超过最大配筋率，程序按步长 $t_p/2$ 放大 B 进行迭代，直至满足设计要求，程序输出暗柱尺寸和配筋面积（当 $B=L_p/2$ 仍不能满足设计要求时，程序将输出超筋警告）。注意，在计算过程中，暗柱内的所有纵筋假定位于其中心位置；最大配筋率可以通过首选项、覆盖项设定或修改。

用户也可以通过覆盖项指定暗柱的边长（宽度和高度），这时程序只计算配筋，不会对暗柱边长进行迭代计算。图 4 列举了简化法可以处理的三类暗柱形式，(a) 两端暗柱尺寸由程序自动判断，此时暗柱沿墙肢方向的边长可变，宽度与墙厚一致；(b) 两端暗柱的边长都由用户指定；(c) 一端暗柱由用户定义，另一端由程序自动判断。后两种情况，用户自定义的暗柱边长在设计过程中是不变的。

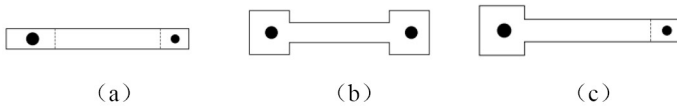


图 4 用于简化法的三类边缘约束区

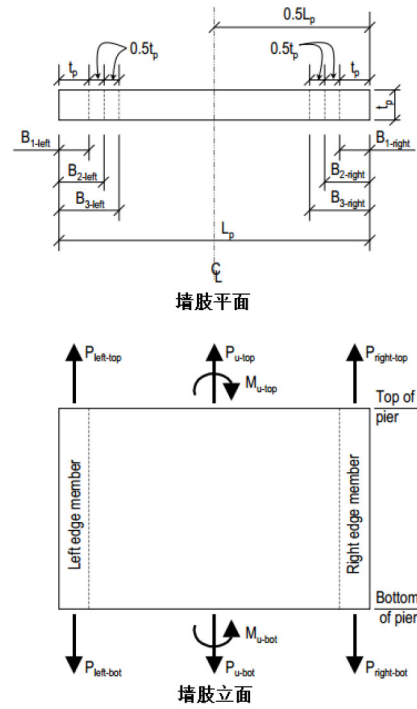


图 3 简化法设计原理

2.2 均匀配筋法

均匀配筋法是利用 P-M-M 相关曲面来校核或设计墙肢截面。这时，墙肢的纵向钢筋是均匀分布的，当已知截面尺寸、钢筋尺寸间距、材料强度时，程序将自动计算其 P-M-M 曲面，并考虑规范的相关要求。如图 5，是典型的一字型墙肢 P-M₃ 相关曲线。纵轴是轴力 P（拉为正，压为负），横轴是弯矩 M₃。

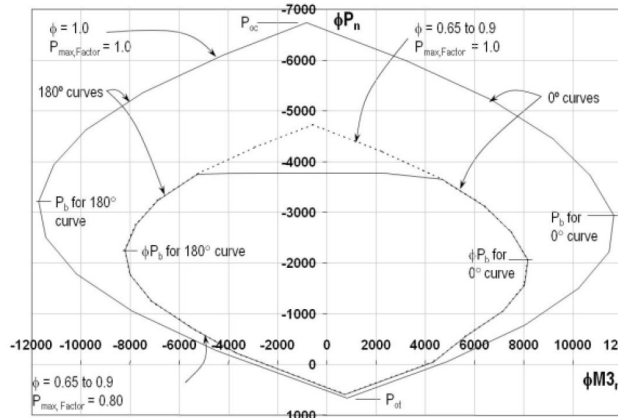
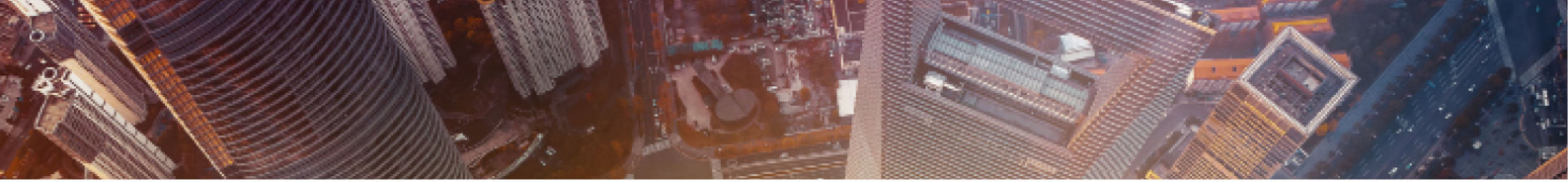


图 5 墙肢 P-M₃ 曲线示例

依据 ACI 的规定 (ACI 21.2.1, 21.2.2)，程序考虑强度折减系数的影响。当截面受拉控制时， $\phi=0.9$ （默认值）；当截面受压控制时， $\phi=0.65$ （默认值）；当截面受力状态介于两者之间时， ϕ 值线性插值计算。程序结合规范的要求根据截面应变来判断受拉或受压控制。若混凝土受压应变达到极限压应变 0.003，当最外侧受拉钢筋的应变小于其屈服应变 ($\epsilon_y = f_y/E$) 时，截面受压控制；当最外侧受拉钢筋的应变超过 0.005 时，截面受拉控制；当最外侧受拉钢筋的应变介于 ϵ_y 和 0.005 之间即过渡状态。图 5 中，外部较大的曲线没有考虑强度折减系数的影响（即 $\phi=1$ ），内部较小的曲线考虑了强度折减系数的影响。



对比内外两条曲线可明显看出， ϕ 值随截面拉压状态的变化，对截面承载力的影响程度不同。

此外，ACI 规定轴压承载力时考虑了折减系数 $P_{\max.Factor} = 0.8$ (ACI 22.4.2.1)。图 5 中，内部实线曲线是按规范要求考虑 $P_{\max.Factor}$ 的影响，所以在该曲线的顶部出现“平台”。

如果是校核墙肢配筋，程序通过判断构件内力是否在相关面以内，来校核当前配筋方案是否满足承载力要求，并输出墙肢的需求/能力比率。如果是设计墙肢配筋，程序会在初始钢筋布置的基础上，变化钢筋面积，再通过相关面校核来确定最终需要的配筋。

2.3 墙肢抗剪设计

墙肢抗剪设计的基本思路是，首先计算混凝土部分承受的剪力 (ACI 11.5.4.6)，再计算需要配置的抗剪钢筋，并同时满足最大受剪截面要求 (ACI 11.5.4.3)，以及纵、横向分布钢筋的最小配筋率要求 (ACI 11.6)。对于有震组合，还要依据抗震结构的要求，调整最大受剪截面限值 (ACI 18.10.4)、最小配筋率等计算 (ACI 18.10.2)。最后，程序输出抗剪水平分布钢筋结果 A_v/s ，这是基于强度计算所得，分布钢筋的间距等构造要求需要工程师自行核算。

2.4 计算边缘构件 (Boundary Element)

对于有抗震要求的墙肢，应检查是否需要配置特殊边缘构件 (special boundary element)。ACI 318 提供了两种方式来判定需要配置特殊边缘构件：1) 墙肢截面受压区高度超过规范限值 (ACI 18.10.6.2)；2) 墙肢最外侧混凝土纤维的压应力超过 $0.2f'_c$ (ACI 18.10.6.3)。前一种方式适用于以压弯变形为主的、沿高度连续的抗震墙，见图 6 (a)，后一种方式理论上适用于任何形式的抗震墙，但一般把它应用于开洞不规则的墙体，见图 6 (b)。ETABS 实现了这两种判定方式，自动判断并计算边缘构件的范围。

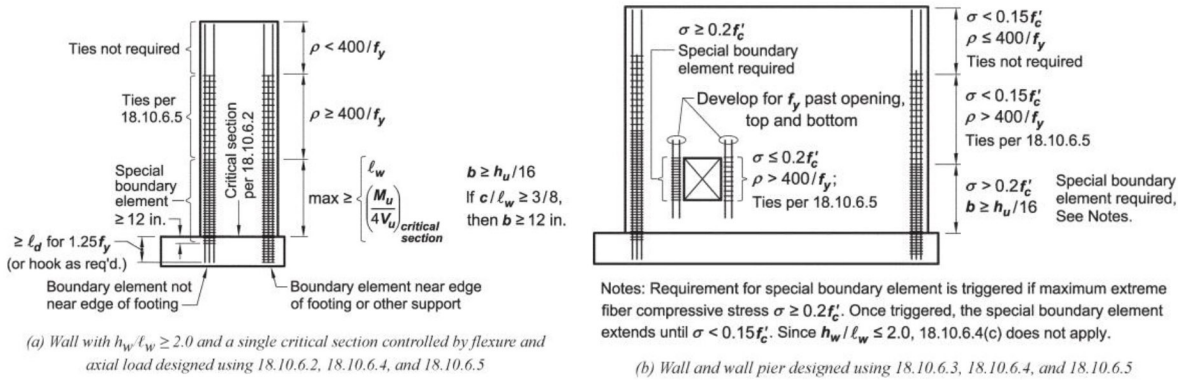
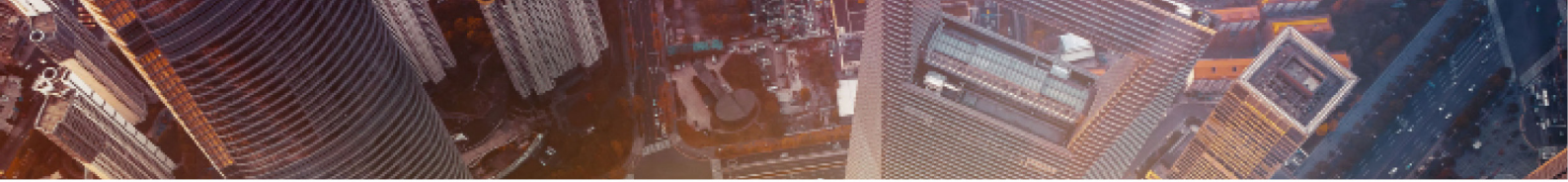


图 6 抗震墙边缘构件分布示意图 (ACI Fig. R18.10.6.4.2)

边缘构件的长度依据 ACI 18.10.6.4 (a) 计算，即 $\max(c/2, c - 0.1L_w)$ 。下表是 ETABS 输出的墙肢边缘构件校核信息，各项含义见随后的列表。以表格中第一行数据为例，墙肢最外侧混凝土纤维压应力为 11.69MPa，超过了规范限值 5.52MPa，同时，墙肢受压区高度为 2250mm 也超过了规范限值 1733.3mm，此时计算得到约束边缘构件区长度为 1470mm。

Boundary Element Check (边缘构件检查)

Station Location	ID	Edge Length (mm)	Governing Combo	P_u kN	M_u kN-m	Stress Comp MPa	Stress Limit MPa	C Depth mm	C Limit mm
Top-Left	Leg 1	1470	DWal7	27361.5787	18.3851	11.69	5.52	2250	1733.3
Top-Right	Leg 1	1470	DWal7	27361.5787	18.3851	11.7	5.52	2250	1733.3
Bottom-Left	Leg 1	1620	DWal7	28055.7263	703.2225	11.76	5.52	2400	1733.3
Bottom-Right	Leg 1	1620	DWal7	28055.7263	703.2225	12.22	5.52	2400	1733.3



项目	解释
Edge Length	特殊边缘构件的长度 当 $\text{Stress Comp} > 0.2f'_c$ 或 $\text{C Depth} > \text{C Limit}$, 需要配置特殊边缘构件, 这里输出其长度值。 当 $0.15f'_c \leq \text{Stress Comp} \leq 0.2f'_c$, 不需要配置特殊边缘构件, 但这里仍输出长度值, 因为按 ACI 18.10.6.3 的规定, 边缘构件应延伸至 $\text{Stress Comp} < 0.15f'_c$ 的区域。 当 $\text{Stress Comp} < 0.15f'_c$, 这里输出 “Not Required” (不需要)
Stress Comp	外侧边缘纤维应力
Stress Limit	应力限值, 即 $0.2f'_c$
C Depth	墙肢截面受压区高度
C Limit	按 ACI 18.10.6.2 计算的限值

3 连梁设计

3.1 连梁抗弯设计

抗弯设计时, 程序根据连梁上最不利的正、负弯矩来计算其底部和顶部的纵筋。计算底部钢筋时, 连梁可按矩形或 T 形截面进行设计, T 形截面的翼缘宽度和高度在设计覆盖项中设置。顶部钢筋仅可按矩形截面设计。下图即连梁抗弯纵筋的设计结果, 连梁顶部和底部分别输出两端 (Left、Right) 的配筋面积 (Reinf Area)、控制组合 (Combo) 及内力 (Moment)。

Spandrel Flexural Design—Top Reinforcement (连梁顶部纵筋)

Station Location	Reinf Area mm ²	Reinf Percentage	Reinf Combo	Moment, M _u kN-m
Left	1350	0.3	DWal8	-622.9946
Right	1350	0.3	DWal7	-633.1549

Spandrel Flexural Design—Bottom Reinforcement (连梁底部纵筋)

Station Location	Reinf Area mm ²	Reinf Percentage	Reinf Combo	Moment, M _u kN-m
Left	1350	0.3	DWal11	515.1336
Right	1146	0.25	DWal12	423.8276

3.2 连梁抗剪设计

抗剪设计时, 程序首先确定混凝土部分的抗剪承载力 (ACI 22.5.5.1), 并且可以考虑轴力对该承载力的影响 (ACI 22.5.6.1, 22.5.7.1)。也可以通过覆盖项将混凝土部分的抗剪承载力人为设为 0, 从而忽略混凝土部分的贡献。接下来, 程序计算所需抗剪钢筋 (ACI 22.5.10.3, 11.5.4.8), 同时要满足最小配筋率要求。对于有震组合, 程序还将计算抗剪斜筋。以下为连梁抗剪设计结果。

Spandrel Shear Design (连梁抗剪箍筋)

Station Location	A _{vert} mm ² /m	A _{horiz} mm ² /m	ShearCombo	V _u kN	φV _c kN	φV _s kN	φV _n kN
Left	2076.16	750	DWal7	922.4063	226.7158	695.6904	922.4063
Right	2125.52	750	DWal7	938.9476	226.7158	712.2317	938.9476

上表中, A_{vert} 为竖向箍筋, A_{horiz} 为水平配筋 (构造), V_c 和 V_s 分别为混凝土和抗剪箍筋的抗剪承载力。

Spandrel Shear Design—Diagonal Reinforcement (连梁对称斜筋)

Station Location	A _{diag} mm ²	Shear Combo	V _u kN	V _{uLimit} kN	L/H Ratio	Seismic Design	Diag Reinf Mandatory
Left	1855	DWAl7	922.4063	706.4217	0.8	Yes	Yes
Right	1888	DWAl7	938.9476	706.4217	0.8	Yes	Yes

上表中，A_{diag} 为对角斜筋面积；V_{uLimit} 和 L/H（跨高比）是用于判断是否需要对角斜筋的条件，即 ACI 18.10.7.2 中的 $4\lambda\sqrt{f'_c}A_{cw}$ 和 I_n/h 。按规范要求，当 $V_u \geq V_{uLimit}$ 及 $L/H \leq 2$ 时，应该配置对角斜筋。当 $2 < L/H \leq 4$ 时，对角斜筋非必须，但程序此时仍会计算输出其面积，供工程师参考。当 $L/H > 4$ 时，不配置对角斜筋。

4 设计首选项与覆盖项

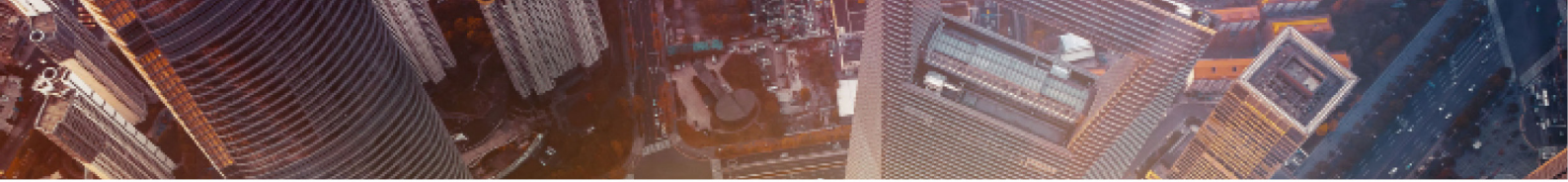
以上介绍了 ETABS 实现美标墙肢、连梁设计的方法或思路，其中多次提到通过首选项或覆盖项来设置、修改设计参数。ETABS 通过首选项和覆盖项来实现交互式设计。以下各表对美标剪力墙设计的首选项、覆盖项进行详细的解释。

剪力墙设计首选项

项目	可能值	默认值	含义
Design Code	程序中已有的规范	-	选择设计规范
Multi-Response Case Design	Envelopes Step-by-Step Last Step Envelopes-All Step-by-Step-All	Envelopes-All	在设计中如何考虑多值工况（例如时程、静力非线性或多步静力工况）。这里可以选择使用包络值、每步结果、最后一步结果等。
Rebar Material	任一已定义的钢筋材料	-	抗弯设计时的钢筋材料
Rebar Shear Material	任一已定义的钢筋材料	-	抗剪设计时的钢筋材料
Design System Rho	>0	1	抗震体系的冗余系数
Design System Sds	>0	0.5	用于抗震设计组合时考虑竖向地震效应,影响设计组合
Importance Factor	>0	1	重要性系数（地震）
System Cd	>0	5.5	变形放大系数 Cd
Phi (Tension Controlled)	>0	0.9	抗弯设计时的强度折减系数（拉力控制）
Phi (Compression Controlled)	>0	0.65	抗弯设计时的强度折减系数（压力控制）
Phi (Shear and/or Torsion)	>0	0.75	抗剪设计时的强度折减系数（非抗震）
Phi (Shear Seismic)	>0	0.6	抗剪设计时的强度折减系数（抗震）
Pmax Factor	>0	0.8	ACI 规定轴压承载力时考虑的折减系数
Number of Curves	≥ 4	24	绘制相关曲面时所需要的相关曲线数量（4 的倍数）
Number of Points	≥ 11	11	绘制相关曲线时所需点的数量（奇数）
Edge Design PT-Max	>0	0.06	边缘构件受拉钢筋的最大配筋率
Edge Design PC-Max	>0	0.04	边缘构件受压钢筋的最大配筋率
Section Design IP-Max	\geq Section Design IP-Min	0.02	墙肢使用 SD 截面时的最大配筋率
Section Design IP-Min	>0	0.0025	墙肢使用 SD 截面时的最小配筋率
Utilization Factor Limit	>0	1	应力比限值

墙肢设计覆盖项

项目	可能值	默认值	含义
Design this Pier	Yes or No	Yes	执行墙肢设计



LL Reduction Factor	>0	1	活荷载折减系数，只对 reducible live load 有效。输入 0 代表由程序计算。
Design is seismic	Yes or No	Yes	是否考虑抗震设计相关的规范要求。
Pier Section Type	Simplified T and C Uniform Reinforcing General Reinforcing	Uniform Reinforcing	墙肢设计类型，即墙肢设计时所使用的方法
以下是选择 Simplified T and C 时对应的墙肢设计覆盖项			
Thick Bottom/Top	>0	程序计算	墙肢底部/顶部的厚度
Length Bottom/Top	>0	程序计算	墙肢底部/顶部的长度
DB1 Left/Right Bottom/Top	≥0	0	墙肢底部/顶部的左端/右端 自定义边缘构件的长度
DB2 Left/Right Bottom/Top	≥0	0	墙肢底部/顶部的左端/右端 自定义边缘构件的宽度
Material	任一已定义的混凝土材料	截面定义时使用的材料	墙肢设计使用的混凝土材料
Edge Design PT-Max	>0	0.06	边缘构件受拉钢筋的最大配筋率
Edge Design PC-Max	>0	0.04	边缘构件受压钢筋的最大配筋率
以下是选择 Uniform Reinforcing 时对应的墙肢设计覆盖项			
End/Corner Bar Name	任一已有的钢筋型号	#5	端部、角部的钢筋尺寸
Edge Bar Name	任一已有的钢筋型号	#5	沿边均匀分布的钢筋尺寸
Edge Bar Spacing	>0	12"	沿边均匀分布的钢筋间距
Clear Cover	>0	1.5'	边钢筋、端部/角部钢筋的净保护层厚度
Check/Design Reinforcing	Check or Design	Design	选择设计或校核墙肢截面
Check Compression Block Depth for BZ?	Yes or No	No	是否通过墙肢受压区高度来判断是否设置边缘构件？选择 Yes 执行 ACI 18.10.6.2；选择 No 执行 18.10.6.3

连梁设计覆盖项

项目	可能值	默认值	含义
Design this Spandrel	Yes or No	Yes	执行连梁设计
LL Reduction Factor	>0	1	活荷载折减系数，只对 reducible live load 有效。输入 0 代表由程序计算。
Design is seismic	Yes or No	Yes	是否考虑抗震设计相关的规范要求。
Length	>0	程序计算	连梁跨度
Thick Left/Right	>0	程序计算	连梁截面宽度，默认来自对象尺寸，左端和右端可以分别修改。
Depth Left/Right	>0	程序计算	连梁截面高度，默认来自对象尺寸，左端和右端可以分别修改。
Cover Bottom Left/Right	>0	程序计算	连梁底部到底部纵筋质心的距离
Cover Top Left/Right	>0	程序计算	连梁顶部到顶部纵筋质心的距离
Slab Width Left/Right	≥0	0	连梁按 T 形截面设计时的楼板宽度
Slab Depth Left/Right	≥0	0	连梁按 T 形截面设计时的楼板厚度
Material	任一已定义的混凝土材料	截面定义时使用的材料	连梁设计使用的混凝土材料
Consider Vc?	Yes or No	Yes	选择是否考虑混凝土部分提供的抗剪承载力 Vc