

美标 ASCE7-10 地震荷载在 ETABS 中的实现

筑信达 李立

ASCE 7 是美国土木工程师学会颁布的设计标准，其全称为 Minimum Design Loads for Building and Other Structures（建筑及其它结构最小设计荷载）。ASCE 7 是针对各种结构形式的总规范，规定了设防目标、场地特征、设计地震作用、地震响应计算方法、结构体系与概念设计等普遍适用的内容。本文将结合其最近的版本 ASCE 7-10，阐述在 ETABS 如何实现地震荷载的定义与分析。

1 计算方法

ASCE 7-10 第 12 章对建筑结构的抗震设计提出了一系列要求，其中对地震作用的计算明确了“等效侧向力法 (Equivalent Lateral Force Procedure)”、“振型分解反应谱法 (Modal Response Spectrum Analysis)”两种方法。第 12.6 节针对不同抗震设计类别和结构类型给出了不同地震作用计算方法的适用性，除了前面提到的两个方法，还有时程分析法（详细规定见 ASCE 7-10 第 16 章），本文只阐述前两种方法的程序应用。

2 基本结构参数

为了便于后续规范要求或计算方法的介绍，先对必要的结构参数进行说明。

建筑安全等级 (Risk Category of Buildings)，ASCE 7-10 表 1.5-1。划分为 I、II、III、IV 级，安全要求依次递增，IV 级安全性能最高。常见建筑以 II 级居多。

安全等级相关的荷载重要性系数 (Importance Factors by Risk Category of Buildings)，ASCE 7-10 表 1.5-2。表中针对地震作用的安全系数为 I_e 。安全等级越高， I_e 值越大，直接影响地震作用的计算。

抗震设计类别 (Seismic Design Category)，ASCE 7-10 第 11.6 节。主要依据建筑安全等级和地理位置，将结构划分为 A、B、C、D、E、F 类。A 类相当于不抗震，然后依次抗震设计要求增加。

响应修正系数 R (Response Modification Coefficient)，ASCE 7-10 表 12.2-1。考虑结构的弹塑性发展，将其按完全弹性设计得到的响应进行折减。通过表 12.2-1 可以看到不同的结构体系延性不同，延性越大相应的 R 值越大。在计算结构响应时，R 位于分母，所以延性要求越高，其响应折减也越大。

变形放大系数 C_d (Deflection Amplification Factor)，ASCE 7-10 表 12.2-1。考虑结构的弹塑性发展，弹塑性变形较弹性变形的放大系数。

以上参数 (I_e 、R、 C_d) 出现在下文公式中时，不再单独说明。

3 设计反应谱

根据 ASCE7-10 第 11.4 节，设计反应谱曲线如图 1 所示。该曲线由上升段、平台段和两个曲线下降段组成，主要控制参数有设计谱加速度 S_{D1} 、 S_{DS} 和长周期转换周期 T_L ，其它关键参数的计算公式已列于图 1 中。从图 1 可看出，已知 S_{D1} 、 S_{DS} 和 T_L 就确定了设计反应谱曲线。图 2 给出了求取 S_{D1} 、 S_{DS} 和 T_L 的流程，并且，流程中每一步都与右边 ETABS 反应谱函数定义的输入参数一一对应，相同的颜色代表相同的含义。

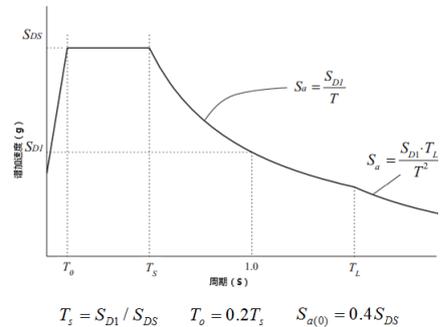


图 1 ASCE7-10 设计反应谱

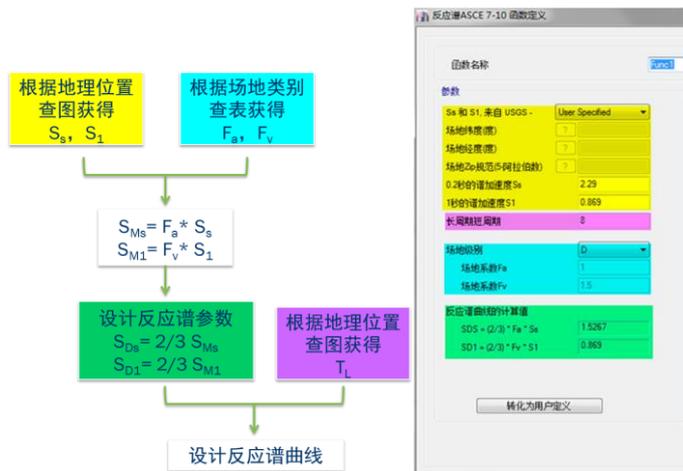


图2 ASEC 7-10 设计反应谱确定流程与 ETABS 输入参数对照图

图2中， S_s 、 S_1 由0.2s、1s的 MCE_R （Maximum Considered Earthquake，大震）加速度谱值确定，可查询ASCE7-10图22-1~6按地理位置获取。在ETABS中可直接输入 S_s 、 S_1 数值，或输入经纬度、邮编代码由程序自动获取（黄色区域）。另一方面，美标的场地类别分为A~F，不同类别对应不同的场地系数（ASEC7-10表11.4-1、2），ETABS中输入场地类别自动获取场地系数（蓝色区域）。据此，可以得到考虑场地系数的 MCE_R 加速度谱值 S_{MS} 、 S_{M1} ，从而得到设计加速度谱参数 S_{DS} 、 S_{D1} （绿色区域）。从图中的计算公式不难发现，美标的设计地震作用大小约为大震作用的三分之二。此外，长周期转换周期 T_L 查询ASEC7-10图22-12~16获取，在ETABS中直接输入数值（紫色区域）。

此外，ASCE7-10第12.7.2节规定了有效抗震重量，即我们熟悉的重力荷载代表值。与我国规范不同的是，美标的有效抗震重量明确包含恒载，却没有包含一般楼面活荷载（只提及仓储类的活荷载）。所以，有些美标ETABS模型的质量源定义只包含恒荷载，如图3所示。当然，用户可以根据实际情况按规范的要求自行添加其它荷载，例如仓储活荷载、雪荷载、种植屋面荷载等等。

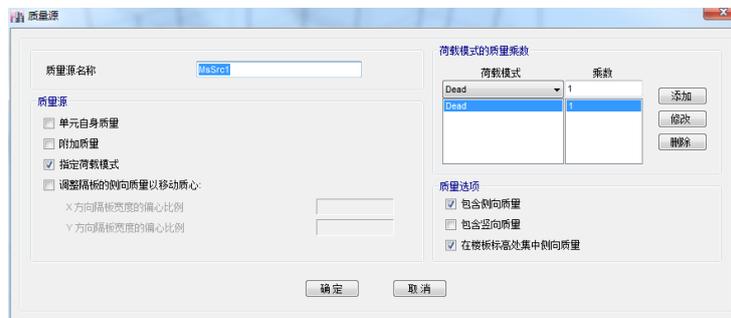


图3 ETABS 质量源定义

4 等效侧向力方法及实现

ASCE 7-10 第12.8节对等效侧向力法有全面的规定。和我国的底部剪力法类似，等效侧向力法也是用静力方法来模拟地震作用。基底剪力及剪力沿楼层的分布按以下公式确定（公式编号引自规范，公式的参数注解请详规范）：

$$V = C_s W \quad (12.8-1)$$

$$C_s = \frac{S_{DS}}{(R/I_e)} \quad (12.8-2)$$

$$F_x = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} V \quad (12.8-11, 12)$$



C_s (地震反应系数) 相当于按设计反应谱取值且考虑结构系数 R 、 I_e 的影响 (参见 ASCE 7-10 公式 12.8-2、3、4), 另外美标对 C_s 提出了下限要求 (参见 ASCE 7-10 公式 12.8-5), 类似于我国剪重比的要求, ETABS 会自动判断。

关于剪力沿楼层的分布, 公式 12.8-12 中系数 k 的取值与结构基本周期相关。ASEC7-10 给出了结构基本周期的近似计算公式 (参见 12.8.2.1 节), 同时规定了结构基本周期的上限 (参见 12.8.2 节)。对此, ETABS 提供了三个周期计算的选项: 1) 按规范的近似公式计算; 2) 取程序模态工况中的周期结果, 即地震作用方向上结构振型质量参与系数最大的模态周期值; 3) 用户自定义。对于选项 1) 和 2) 程序会自动验算周期上限值的要求。

图 3 是定义等效侧向力地震工况的对话框, 通过命令“定义>荷载模式”, 选择“地震荷载”类型, 并选择“ASCE7-10”, 可打开该对话框。图中黄色区域用于定义: 结构基本周期来源、地震作用的楼层范围和结构系数 (R 、 I_e 等)。蓝色区域用于定义设计反应谱, 与本文第 3 节关于定义反应谱函数的输入规定是一样的。注意, ETABS 命令“定义>函数>反应谱函数”只用于振型分解反应谱法, 使用等效侧向力法时, 是在工况定义中完成对反应谱曲线的定义。紫色区域是定义地震作用方向以及是否考虑偶然偏心。**特别注意, 这里的一个地震工况 (等效侧向力法) 可以包含最多六种子工况, 即 X、Y 两个方向再加各自的正负偏心, 这样可以大大减少所需定义地震工况的数量。**例如, 定义某个地震工况时勾选所有六种情况 (如图 4), 该工况将自动生成六个子工况参与所有荷载组合, 图 5 所示的框架柱内力结果表格, 组合“DCon13-1~DCon13-6”代表 DCon13 这个组合考虑六种情况后生成的六个子组合, 其中“-1、-2”分别代表 X、Y 向;“-3、-4”分别代表 X 向+偏心、Y 向+偏心;“-5、-6”分别代表 X 向-偏心、Y 向-偏心。有时为了便于判断哪个方向起控制作用, 可以定义两个地震工况, 一个包含 X 向的所有情况, 另一个包含 Y 向的所有情况。总之, 用户可结合实际情况灵活地应用。

另外, 一个地震工况 (等效侧向力法) 参与自动荷载组合时, 程序会自动考虑正、负两个方向分别对应两个组合, 如图 6 所示。

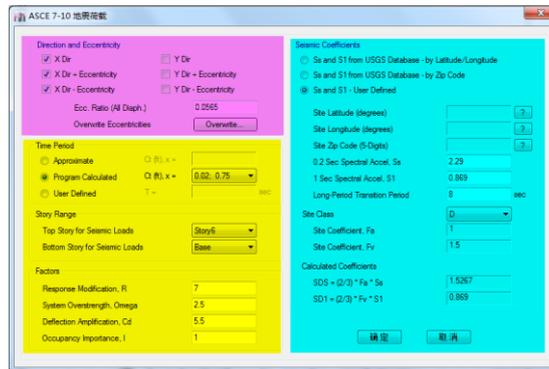


图 3 等效侧向力法地震工况定义

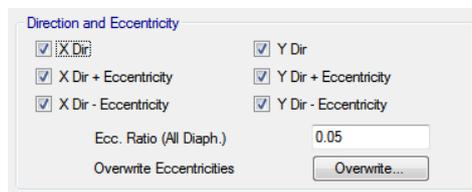


图 4 方向与偏心

Story	Column	Load Combo	Station m	P kN	V2 kN	V3 kN	T kN-m	M2 kN-m	M3 kN-m
Story4	C4	DCon13-1	0	-111.266	-26.4482	14.5073	-0.0446	25.0659	-51.6945
Story4	C4	DCon13-2	0	-151.6731	-45.6369	57.5636	4.769E-05	88.9326	-74.8363
Story4	C4	DCon13-3	0	-113.0261	-25.5558	17.6971	-0.4293	29.7704	-50.4277
Story4	C4	DCon13-4	0	-148.1528	-47.4216	51.184	0.7693	79.5234	-77.3699
Story4	C4	DCon13-5	0	-109.5058	-27.3406	11.3175	0.34	20.3613	-52.9614
Story4	C4	DCon13-6	0	-155.1934	-43.8522	63.9432	-0.7692	98.3417	-72.3026

图 5 构件内力输出表



Load Name	Scale Factor	Load Name	Scale Factor
Dead	0.8	Dead	0.8
Quake	1	Quake	-1

图 6 自动荷载组合示例

计算地震作用下的层间位移角时，ASCE 7-10 明确规定不考虑 C_s 的下限要求，也不考虑结构基本周期的上限值要求（参见 12.8.6 节）。可以理解为，计算变形时，不考虑最小地震剪力或周期的调整，采用地震作用下实际的弹性变形。对此，ETABS 有专门的荷载模式类型“地震荷载（位移角）”，即对于地震工况，需要定义两种类型，一种为“地震荷载”用于计算地震作用，另一种为“地震荷载（位移角）”用于计算地震作用下的变形，如图 7 所示。



图 7 关于地震工况的荷载模式类型

5 振型分解反应谱法的几点说明

振型分解反应谱法（以下简称反应谱法）是比等效侧向力法更为通用的地震作用计算方法。无论对于中国规范、美国规范或其它国家规范，ETABS 的操作步骤都是一样的：1) 定义反应谱曲线；2) 定义模态工况；3) 定义反应谱工况。这里不再介绍以上操作的具体步骤，但针对美标相关的几项规定进行以下讨论。

比例系数。ASCE 7-10 规定反应谱法计算的基底剪力 V_t 不得小于等效侧向力法计算基底剪力 V 的 85% (第 12.9.4.1 节)，中国规范没有类似的要求。所以当采用美标进行设计时，无论是否使用等效侧向力法，都需要定义等效侧向力工况。按规范要求，将两种方法计算得到的基底剪力进行对比，若 V_t 小于 $0.85V$ ， V_t 要调整到 $0.85V$ ，同时，如果 C_s 由公式 12.8-6 控制时，层间位移角也相应放大 $0.85C_sW/V_t$ (第 12.9.4.2 节)，其它情况层间位移角可不考虑相应放大。在 ETABS 中通过修改反应谱工况的比例系数进行调整。注意，可以分别定义两种反应谱工况，一种用于计算地震作用力，一种用于计算层间位移角。计算层间位移角的工况还可以在比例系数中考虑系数 (C_d/I_e) 将弹性位移结果直接转化为弹塑性位移结果。综上，比例系数除了考虑重力加速度，还可考虑关于力或变形的调整。

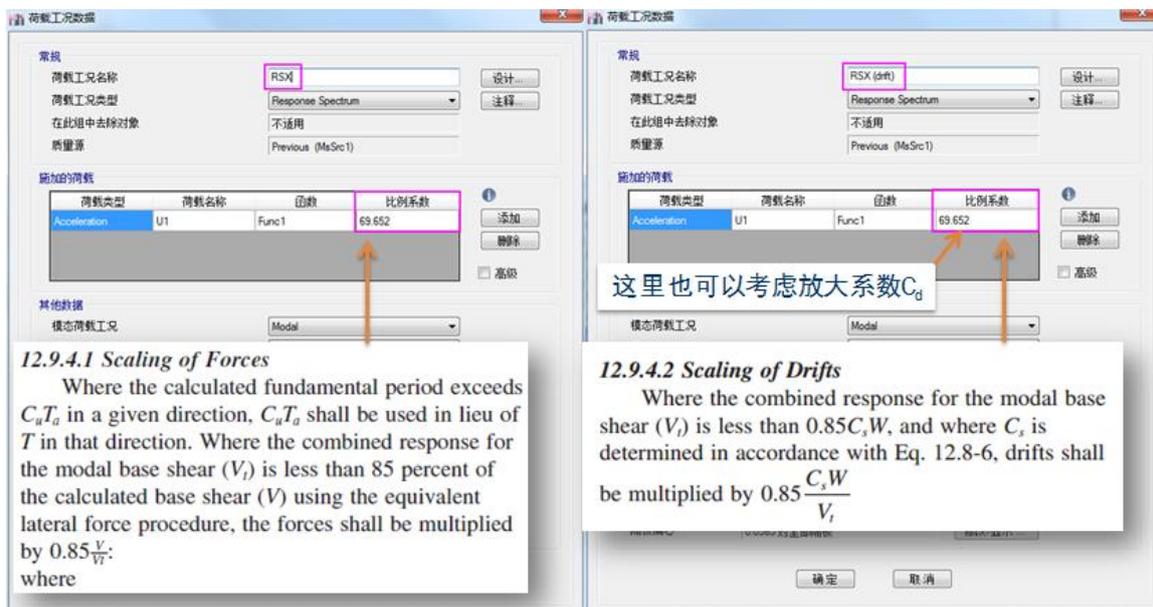


图 8 反应谱工况定义中比例系数的用途



双向地震作用。ASCE 7-10 是根据结构的抗震设计类别来划分是否考虑双向地震作用。对于 B 类结构可不考虑双向地震作用，C~F 类结构在某些情况下会考虑双向地震作用（详见第 12.5 节）。对于方向组合的方法，美标使用 30%的组合原则（100 percent of the forces for one direction plus 30 percent of the forces for the perpendicular direction）。相应地，在 ETABS 的对话框中，方向组合类型应选择为“绝对值”，且在“绝对的方向组合系数”中填入 0.3，即符合规范要求。注意，这里不需要调整比例系数，与中国规范双向地震作用工况的定义不同，如图 9 所示。此外，双向地震作用不需要考虑 $0.85C_w$ 要求。

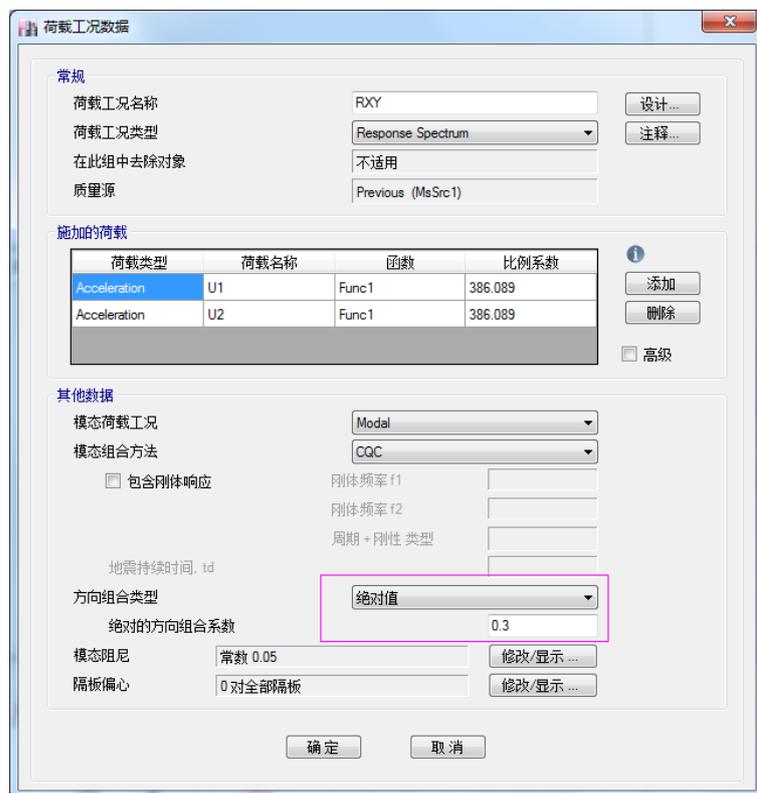


图 9 双向地震作用工况定义

反应谱工况参与的荷载组合。由于振型分解反应谱法的计算结果都是正值，已丢失矢量方向的信息。当其与其它工况内力组合时，反应谱工况的结果要自动考虑正、负两个值分别参与组合的情况。对于 P-M2-M3 相关的柱构件，要考虑不同符号的 P、M2、M3 形成的八种组合方式，此时包含反应谱工况的一个荷载组合就会出现八个子组合，如图 10 所示。这是 ETABS 处理反应谱分析结果的一种通用方式，对所有国家规范都是如此。

Story	Column	Load Combo	P kN	M2 kN-m	M3 kN-m
Story4	C4	DCon16-1	-57.2634	46.6512	90.0011
Story4	C4	DCon16-2	-57.2634	1.6147	90.0011
Story4	C4	DCon16-3	-57.2634	46.6512	-241.7226
Story4	C4	DCon16-4	-57.2634	1.6147	-241.7226
Story4	C4	DCon16-5	-186.046	46.6512	90.0011
Story4	C4	DCon16-6	-186.046	1.6147	90.0011
Story4	C4	DCon16-7	-186.046	46.6512	-241.7226
Story4	C4	DCon16-8	-186.046	1.6147	-241.7226

图 10 含有反应谱工况的某个荷载组合下的柱内力表



6 其它重要问题

6.1 冗余度系数与超强系数

冗余度系数 ρ (Redundancy Factor), ASCE 7-10 第 12.3.4 节。水平地震的作用应乘以冗余度系数, $E_h = \rho Q_E$ (12.4-3)。 ρ 的取值为 1 或 1.3, 例如, 对于 B 类和 C 类结构, 或计算位移角或 P-Delta 效应时, 取 1.0; 对于 D、E 或 F 类结构的多数情况, 取 1.3; 等等, 详细要求见 12.3.4 节。对 ETABS 而言, ρ 值在设计首选项中指定, 如图 11 第 8 项, 在这里输入 1 或 1.3, 程序将自动在荷载组合时, 对水平地震工况的效应乘以该系数。

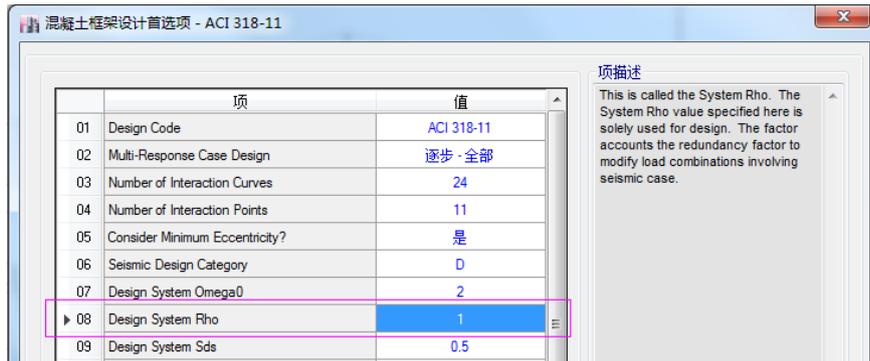


图 11 设计首选项中的冗余度系数

超强系数 Ω_0 (Overstrength Factor), ASCE 7-10 表 12.2-1 和第 12.4.3 节。考虑结构的设计承载力与完全屈服时极限承载力之间的能力储备。它与结构的冗余度、层间位移角限值、材料的超强等因素有关。有些情况下, 水平地震的作用效应需乘以超强系数, $E_{mh} = \Omega_0 Q_E$ (12.4-7), 此时对其参与的荷载组合有专门规定 (第 12.4.3.2 节)。 Ω_0 同样在设计首选项中进行定义, 如图 11 第 7 项。

注意, 冗余度系数和超强系数两者不同时考虑。

6.2 查看层间位移角

根据 ASCE7-10 第 12.8.6 节, 对于规则结构, 层间位移角可取楼层质心位置处的变形, 但是对于 C、D、E 或 F 类结构, 如果存在扭转不规则 (表 12.3-1 1a 或 1b) 时应取变形最大处的层间位移角。相应地, 在 ETABS 中, 如果想查看楼层质心位置处的层间位移角, 可查询位移结果表格——Diaphragm Center of Mass Displacements; 如果想查看楼层中最大的层间位移角, 可查询位移结果表格——Story Drifts, 如图 12 所示。

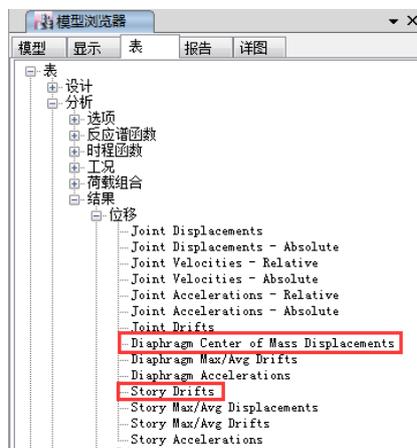


图 12 层间位移角表格

注意, 前面已讨论过, 计算地震作用和计算地震作用下的变形常常要分别定义为两种工况, 所以查看层间位移角时, 首先要选对工况。



6.3 偶然偏心的调整

根据 ASCE7-10 第 12.8.4.3 节，对于 C、D、E 或 F 类结构，同时存在扭转不规则（表 12.3-1 1a 或 1b）时，应对每一层的偶然偏心扭矩（Mta）乘以放大系数 A_x ， $1 \leq A_x \leq 3$ ， A_x 计算公式见 12.8-14。在 ETABS 中，直接放大偶然偏心率即可。无论定义等效侧向力地震工况，还是定义反应谱工况，都有偶然偏心率的输入框。例如，假设计算得到 $A_x=1.1$ ，原本输入偶然偏心率 0.05，此时应修改为 0.055，即实现这条规定。

同时，ASCE7-10 第 12.9.5 节还规定了，若在分析模型中将质心偏移 5%，就无需再考虑 A_x 的放大。在 ETABS 中，通过质量源的定义能实现偏移质心（如图 13 所示），再定义相应的模态工况，基于该模态结果计算的反应谱工况，即在动力分析模型中能实际反映偶然偏心引起的放大效应，无需再考虑 A_x 的放大。这一系列操作需要注意地方较多，限于篇幅这里不展开讨论，请参考 CSI 的 ETABS 教学视频 [26 偶然偏心](#)。

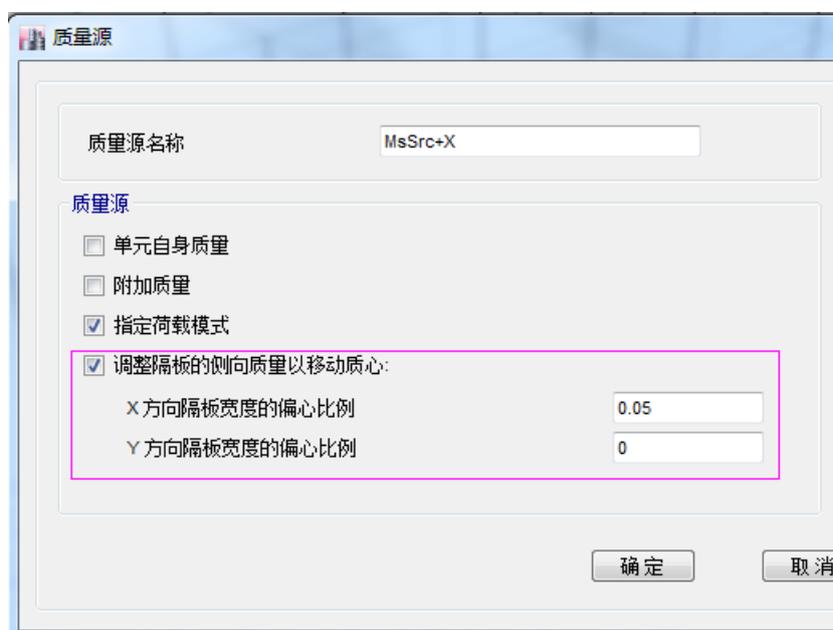


图 13 在质量源中定义质心偏移

7 小结

本文结合 ASCE7-10 对地震荷载的规定，详细说明了 ETABS 相关的参数含义、计算方法以及结果查看。通过对美标的学习，我们感受到美标的规定更偏重原则性的指导，给工程师的发挥空间较大，在实操层面有很强的灵活性。我们将编写一系列的文章来探讨 ETABS 在美标设计中的应用，欢迎工程师们多提需求和意见，与我们交流讨论！