

ETABS 美标钢框架分析设计方法概述

筑信达 李立 吴文博

美国《钢结构设计规范》AISC360-XX (“XX”代表年号)是 ETABS 进行美标钢结构设计的主要依据。由于美国允许新、老规范并存,所以在 ETABS 中 AISC360-05、AISC360-10 和 AISC360-16 都是可用的。同时,ETABS 也实现了 AISC341-XX (钢结构抗震规范)的要求。

自 AISC360-05 起,美国钢结构设计就包含了 ASD 和 LRFD 两种设计方法。并且,明确规定了“直接分析法”和“有效长度法”的细节要求及适用范围,对二阶效应的计算方法也有规定。这些规定都在 ETABS 中得到充分体现。本文将梳理美标钢框架设计的主要思路,理清软件的参数设置与规范要求之间的联系。为便于表达,下文将 AISC360-16 简称为 AISC360。

1 构件设计方法

与我国规范不同,AISC360 有两种并行的钢结构构件设计方法 ASD 和 LRFD。工程师可根据需要自行选择。

ASD (allowable strength design)即容许应力设计法。该方法给出一个安全系数,以此度量因材料屈服或构件屈曲而失效的抵抗能力。ASD 在美国沿用了相当长的时间,但由于其安全系数较依赖于经验,有逐渐被 LRFD 替代的趋势。

LRFD (load and resistance factor design)即荷载和抗力系数设计法。该方法引入了结构可靠度的概念,考虑了荷载和抗力的概率,是目前主流的方法。

ASD 的基本表达式为: $R_a \leq R_n / \Omega$

其中, R_a 是根据 ASD 荷载组合而计算得到的内力设计值, R_n 为

承载能力标准值, Ω 为安全系数, R_n / Ω 为容许强度。

LRFD 的基本表达式为: $R_u \leq \phi R_n$

其中, R_u 是根据 LRFD 荷载组合而计算得到的内力设计值, R_n 为承载能力标准值, ϕ 为抗力系数, ϕR_n 为设计强度。

经规范校准, ASD 的安全系数和 LRFD 的抗力系数的关系为: $\Omega = 1.5 / \phi$

ASD 和 LRFD 对应不同的荷载组合要求。在 ETABS 的钢框架设计首选项中,选择设计方法为 ASD 或 LRFD (图 1),程序便自动生成对应的荷载组合,并按照以上公式验算构件的承载力。

2 二阶效应

二阶效应包含两类,一是由结构整体侧移产生的 P- Δ 效应,二是由构件自身挠曲产生的 P- δ 效应,如图 2 所示。ETABS 能够考虑这两类二阶效应。对于 P- Δ 效应,通过预设 P- Δ 选项(如图 3 所示),计入重力荷载下的几何刚度,再基于修正后的刚度进行分析。对于 P- δ 效应,通过对杆件进行单元细分捕捉其挠曲变形来进行分析,一般细分 3 个单元即可,若杆件变形后的反弯点较多,则要加大细分精度。

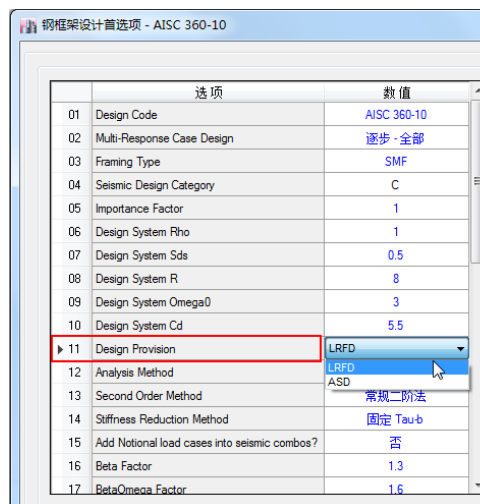


图 1 设计方法选项

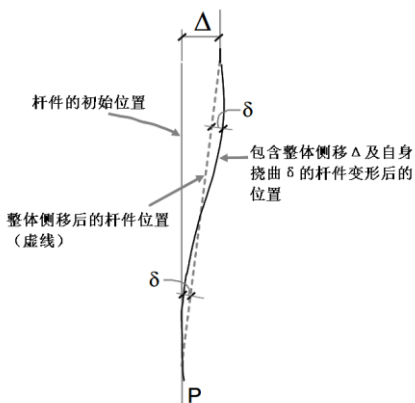


图 2 二阶效应图示

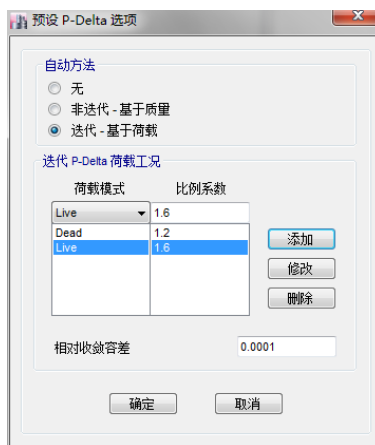


图 3 预设 P-Delta 选项对话框



图 4 二阶方法选项

AISC360 也提供了近似计算二阶效应的方法，即放大一阶分析的内力，表达式如下：

$$M_r = B_1 M_{nt} + B_2 M_{lt}$$

$$P_r = P_{nt} + B_2 P_{lt}$$

其中， M_{lt} 、 P_{lt} 是由结构侧移产生的杆件一阶弯矩、轴力； M_{nt} 、 P_{nt} 是结构不产生侧移时杆件的一阶弯矩、轴力； B_1 、

B_2 是放大系数， B_1 、 B_2 的详细信息整理如下表。

计算公式	说明	ETABS 对应的参数
$B_1 = \frac{C_m}{1 - \alpha P_r / P_{e1}} \geq 1$ <p>详见 AISC A-8-3</p>	<p>考虑 P-δ 效应的放大系数</p> <p>程序自动计算，可通过设计覆盖项修改。</p> <p>其中临界轴力 P_{e1} 与计算长度系数 K_1 有关，故 K_1 会间接影响 B_1 的计算。</p>	
$B_2 = \frac{1}{1 - \frac{\alpha P_{story}}{P_{e story}}} \geq 1$ <p>详见 AISC A-8-4</p>	<p>考虑 P-Δ 效应的放大系数</p> <p>由用户通过设计覆盖项指定</p>	

ETABS 的钢框架设计首选项中，关于二阶方法提供了两个选项，如图 4。“常规二阶法”即按本节开头介绍的方式由程序自动计算二阶效应。“一阶放大法”则对应规范中采用放大系数的近似计算方法。

3 直接分析法

关于钢结构的稳定设计，AISC360 详细规定了具有普遍适用性的“直接分析法”。ETABS 非常适合使用该方法。根据规范要求，“直接分析法”主要包括四个要素：

- 1 考虑构件的弯曲、剪切和轴向变形。程序在分析过程中已自动实现。
- 2 非弹性因素引起的刚度折减，包括残余应力，结构分析要考虑刚度折减的影响。程序已自动实现，下文详细介绍。
- 3 考虑初始缺陷。程序通过“修改未变形几何”或定义“名义荷载”实现，下文详细介绍。
- 4 执行二阶效应分析，同时考虑 P-Δ 效应和 P-δ 效应。程序的实现方式前文已介绍。



3.1 刚度折减

一旦在 ETABS 中使用直接分析法，程序依据 AISC360 的规定会自动将所有构件的刚度乘以折减系数 0.8，同时构件的抗弯刚度还将乘以折减系数 τ_b ， τ_b 的取值规定如下：

若 $\alpha P_r/P_{ns} \leq 0.5$ ， $\tau_b = 1.0$ ；

若 $\alpha P_r/P_{ns} > 0.5$ ， $\tau_b = 4(\alpha P_r/P_{ns})[1 - \alpha P_r/P_{ns}]$

式中， P_r 是轴向压力设计值， P_{ns} 是截面的抗压承载力。此外，若按名义荷载的方式施加大小为 $0.001\alpha Y_i$ 的假想水平荷载，则可以对所有构件使用 $\tau_b = 1$ ，即使 $\alpha_r P_r/P_{ns} > 0.5$ 。

对此，ETABS 设计首选项中可以指定 τ_b 固定值或可变值，当 τ_b 为定值时，即 $\tau_b = 1$ ，当 τ_b 为变值时，程序自动迭代计算确定 τ_b ，进而折减构件的抗弯刚度。



图 5 刚度折减选项

3.2 初始缺陷

依据 AISC360 的规定，结构的初始缺陷可以通过直接修正模型几何，或使用名义荷载来模拟。两种方式 ETABS 都可以实现。通过“修改未变形几何”命令（图 6），能综合考虑某荷载作用下的变形，及屈曲模态的变形来修改模型的初始几何，从而引入初始缺陷。定义“名义荷载”则是按规范要求的要求的给结构施加假想水平力，来模拟初始缺陷。

如图 7 左侧对话框所示，在荷载模式中添加名义荷载，再点击右侧“修改侧向荷载”按钮，弹出图 7 右侧对话框，选择重力工况和水平力的方向。注意以下几点：

1) 名义荷载一般是重力荷载的 0.002，其分布方式与重力荷载一致。所以在图 x 对话框中输入荷载比率 0.002。即 $N_i = 0.002\alpha Y_i$ (Y_i 为使用 LRFD 或 ASD 荷载组合下第 i 层的重力荷载， $\alpha=1.0$ (LRFD)； $\alpha=1.6$ (ASD))。



图 6 修改未变形几何模拟初始缺陷

另外，按上一节的介绍，如果 τ_b 设为定值，按 AISC360 的规定荷载比率要增加 0.001，此时应输入 0.003。

2) 名义水平荷载系数是基于不垂直度 1/500 确定的，当采用不同不垂直度时，可按比例调整名义水平荷载。

3) 两个正交方向的初始缺陷不同时考虑，且每个方向要考虑正、负两种情况。所以，每个重力工况应在两个主轴方向分别定义名义荷载。例如，一个恒载工况 (Dead)，应定义一对名义荷载 (N-D-X 和 N-D-Y)，活载工况 (Live) 同理。图 7 所示的例子中，对应恒载 Dead、活载 Live，以及 X、Y 两个方向，一共定义了 4 个名义荷载。每个名义荷载的正负情况由 ETABS 在生成荷载组合时自动考虑。

4) 当各楼层的最大二阶侧移与最大一阶侧移之比不大于 1.7 时，则只在重力荷载组合分析中考虑名义水平荷载，而在包括其他侧向荷载的组合分析中不考虑名义荷载。此时，需要工程师自行判断，然后在设计首选项中将第 15 项“在含侧向荷载的组合中考虑名义荷载？”设置为是或否。

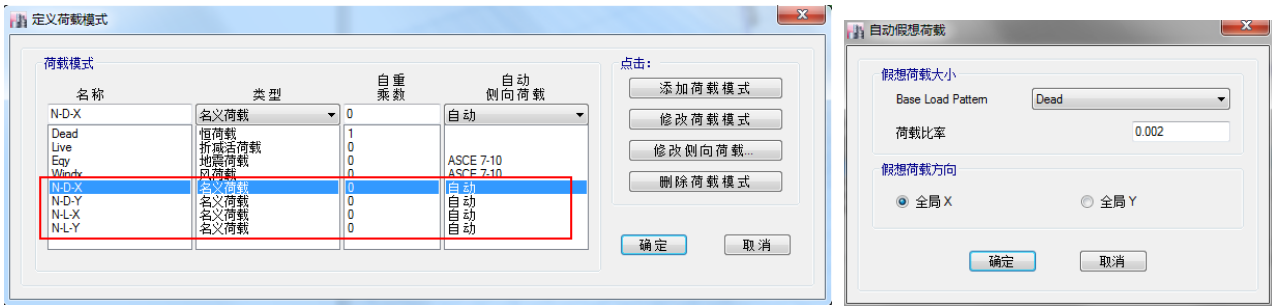


图 7 定义名义荷载

4 有效长度法

直接分析法与有效长度法的区别在于：在压弯构件承载力验算时前者在分析中使用折减后的刚度，且计算长度系数为 1；后者在分析中刚度不予折减，并使用根据屈曲分析获得计算长度系数。

在 AISC 360 规范中，计算长度系数 K 有两种。一种用于所有梁柱节点位置固定，即无侧移的情况，用 K_1 标识， K_1 小于 1，程序默认 $K_1 = 1$ ，若 K_1 需取其它值，需由用户指定。另一种用于所有梁柱节点位置能自由移动，即有侧移的情况，用 K_2 标识。 K_2 大于 1，程序自动计算 K_2 ，用户也能修改。对程序而言， K_1 用于计算二阶放大系数 B_1 ， K_2 用于计算构件的轴向承载力。

程序默认的 K_2 计算方法适用于有侧移的抗弯框架，对于带支撑框架或其他结构体系，用户需自行设置 K_2 的数值。而且， K_2 的计算公式基于一些理想化的基本假定，一些特殊情况，比如斜梁、非正交梁，都会影响 K_2 的计算。这时程序会将 K_2 设置为 1，对这些情况用户应自行检查。当然，如果使用直接分析法，可以避免这些麻烦。

还有一个计算长度系数 K_{ltb} ，用于考虑侧向弯扭屈曲。程序默认取 $K_{ltb} = K_{2minor}$ ，即等于柱的次轴方向计算长度系数，可以修改。

钢框架设计覆盖项输出了各个计算长度系数的数值，用户可查询修改，如图 8 所示。

选项	数值
23 Specified Camber, in	0
24 Net Area to Total Area Ratio	1
25 Live Load Reduction Factor	1
26 Unbraced Length Ratio (Major)	0.915278
27 Unbraced Length Ratio (Minor)	0.915278
28 Unbraced Length Ratio (LTB)	0.915278
29 Effective Length Factor (K1 Major)	1
30 Effective Length Factor (K1 Minor)	1
31 Effective Length Factor (K2 Major)	3.166705
32 Effective Length Factor (K2 Minor)	1.984963
33 Effective Length Factor (K LTB)	1.984963
34 Moment Coefficient (Cm Major)	0.85
35 Moment Coefficient (Cm Minor)	0.85
36 Bending Coefficient (Cb)	1
37 NonSway Moment Factor (B1 Major)	1
38 NonSway Moment Factor (B1 Minor)	1
39 Sway Moment Factor (B2 Major)	1

图 8 计算长度系数

5 方法选择

综上所述，对于美标钢框架设计，可以使用“直接分析法”、“有效长度法”或“一阶分析法”。由于“直接分析法”考虑二阶效应影响，还考虑了结构的初始缺陷、杆件的不垂直度、残余应力引起的刚度折减等，所以是更具普遍适用性的方法。“有效长度法”、“一阶分析法”有各自的适用条件。

下表来自于 CSI 的美标设计技术文档，详细归纳了这几种设计方法的意义和实质。通过本文的介绍，相信能帮助工程师理解该表的内容，了解如何进行二阶分析、如何进行刚度折减、如何定义名义荷载、如何判定计算长度系数的取值等等，进而合理地使用程序进行美标钢框架设计。

直接分析法			
考虑二阶效应的方法	刚度折减设置	适用条件	基本内容
常规二阶分析法	τ_b 设为变值	不限	<ul style="list-style-type: none"> 全面二阶分析，考虑 P-Δ、P-δ 效应 刚度折减，$EI^* = 0.8\tau_b EI$、$EA^* = 0.8EA$，τ_b 值与轴力相关



			<ul style="list-style-type: none"> ○ 计算长度系数 $K_2 = 1$ ○ 若 $\Delta_{2nd} / \Delta_{1st} \leq 1.7$，仅在重力荷载组合中考虑名义荷载，否则所有荷载组合中考虑名义荷载，名义荷载系数一般取 0.002
	τ_b 设为定值	不限	<ul style="list-style-type: none"> ○ 全面二阶分析，考虑 P-Δ、P-δ 效应 ○ 刚度折减，$EI^* = 0.8\tau_b EI$、$EA^* = 0.8EA$，$\tau_b = 1$ ○ 计算长度系数 $K_2 = 1$ ○ 若 $\Delta_{2nd} / \Delta_{1st} \leq 1.7$，仅在重力荷载组合中考虑名义荷载，否则所有荷载组合中考虑名义荷载，名义荷载系数一般取 0.003
一阶放大近似法	τ_b 设为变值	不限	<ul style="list-style-type: none"> ○ 一阶分析 ○ 刚度折减，$EI^* = 0.8\tau_b EI$、$EA^* = 0.8EA$，τ_b 值与轴力相关 ○ 计算二阶放大系数 B_1、B_2，计算长度系数 $K_1 = 1$、$K_2 = 1$ ○ 若 $\Delta_{2nd} / \Delta_{1st} \leq 1.7$，仅在重力荷载组合中考虑名义荷载，否则所有荷载组合中考虑名义荷载，名义荷载系数一般取 0.002
	τ_b 设为定值	不限	<ul style="list-style-type: none"> ○ 一阶分析 ○ 刚度折减，$EI^* = 0.8\tau_b EI$、$EA^* = 0.8EA$，$\tau_b = 1$ ○ 计算二阶放大系数 B_1、B_2，计算长度系数 $K_1 = 1$、$K_2 = 1$ ○ 若 $\Delta_{2nd} / \Delta_{1st} \leq 1.7$，仅在重力荷载组合中考虑名义荷载，否则所有荷载组合中考虑名义荷载，名义荷载系数一般取 0.003
有效长度法			
考虑二阶效应的方法	适用条件	基本内容	
常规二阶分析法	所有楼层位移满足： $\Delta_{2nd} / \Delta_{1st} \leq 1.5$	<ul style="list-style-type: none"> ○ 全面二阶分析，考虑 P-Δ、P-δ 效应 ○ 刚度不折减 ○ 计算并使用有效长度系数 K_2 ○ 仅在重力荷载组合中考虑名义荷载，名义荷载系数一般取 0.002 	
一阶放大近似法	所有楼层位移满足： $\Delta_{2nd} / \Delta_{1st} \leq 1.5$	<ul style="list-style-type: none"> ○ 一阶分析 ○ 刚度不折减 ○ 计算并使用有效长度系数 K_2 ○ 计算并使用二阶放大系数 B_1、B_2 ○ 仅在重力荷载组合中考虑名义荷载，名义荷载系数一般取 0.002 	
一阶分析法			
	适用条件	基本内容	
一阶分析法	所有楼层位移满足： $\Delta_{2nd} / \Delta_{1st} \leq 1.5$ 所有柱轴力满足： $\alpha P_r / P_{ns} \leq 0.5$	<ul style="list-style-type: none"> ○ 一阶分析 ○ 刚度不折减 ○ 计算并使用有效长度系数 K_2 ○ 所有荷载组合中考虑名义荷载，名义荷载系数 = $2.1\alpha(\Delta/L) \geq 0.0042$ 	