

钢框架结构二阶效应系数的计算

刘孝国¹，杨金强²

(1. 中国建筑科学研究院有限公司 北京构力科技有限公司 北京100013; 2. 山东东瑞规划建筑设计院有限公司)

[摘要] 新钢标对于剪切型变形的规则钢框架结构给出了按照楼层刚度与楼层重力荷载有关的结构二阶效应系数计算公式，对于弯曲型及剪弯型的一般钢结构给出了按结构整体最低阶屈曲模态对应屈曲因子的倒数计算二阶效应系数的公式。PKPM软件按照新钢标公式自动计算并输出每一层每个方向的结构二阶效应系数。对软件计算二阶效应系数的结果进行手工复核，进一步让设计师掌握程序的处理过程，深入掌握钢框架结构二阶效应系数计算相关问题。对需要考虑二阶效应的结构，PKPM软件在结果中给出建议，宜采用二阶p-Δ弹性分析方法进行内力分析。

[关键词] 钢框架；二阶效应系数；刚度比；轴力设计值；二阶分析法；

0 前言

《钢结构设计标准》GB50017-2017（后续简称“新钢标”）要求按照结构二阶效应系数大小判断结构设计分析方法是采用一阶还是二阶分析法。按新钢标5.1.6条，当结构二阶效应系数大于0.1时，需要对结构进行二阶效应内力分析。新钢标对结构二阶效应系数的计算区分了不同的结构类型。对剪切型变形的规则框架结构，新钢标提供了按照公式5.1.6-1计算二阶效应系数。对弯曲型和剪弯型变形形态的一般钢结构，如钢框架支撑结构、复杂钢结构及钢结构混凝土混合结构等按钢结构标准5.1.6-2公式进行结构二阶效应系数的计算。

对于钢结构的二阶效应系数，PKPM软件完全按照新钢标的计算公式，并区分不同的结构形式；对规则框架结构按照标准5.1.6-1公式计算二阶效应系数，在计算结果中输出钢结构两个方向每层的二阶效应系数。对于非框架结构，如框架支撑结构体系等，软件按照结果临界荷载与刚重比的关系，通过刚重比计算结构两个方向的二阶效应系数。

对于二阶效应系数的计算，本文结合PKPM软件的处理，给出软件计算的过程，供设计师进一步深入理解钢框架结构二阶效应系数的计算。

1 新钢标对二阶效应系数计算的要求

1.1 规则钢框架的二阶效应系数计算

按照新钢标条文，对于剪切型变形的规则钢框架结构，按照如图1公式进行结构二阶效应系数的计算，每一层每个方向均有二阶效应系数。

1 规则框架结构的二阶效应系数可按式计算：

$$\theta_i^{\text{II}} = \frac{\sum N_i \cdot \Delta u_i}{\sum H_{k_i} \cdot h_i} \quad (5.1.6-1)$$

式中： $\sum N_i$ ——所计算*i*楼层各柱轴心压力设计值之和（N）；

$\sum H_{k_i}$ ——产生层间侧移 Δu 的计算楼层及以上各层的水平力标准值之和（N）；

h_i ——所计算*i*楼层的层高（mm）；

Δu_i —— $\sum H_{k_i}$ 作用下按一阶弹性分析求得的计算楼层的层间侧移（mm）。

图1 规则框架二阶效应系数计算公式

1.2 一般钢结构的二阶效应系数计算

对于除规则钢框架以外的其他钢结构，新钢标给出了不同的二阶效应系数，该二阶效应系数是针对整体结构的，两个方向分别有一个二阶效应系数。图2为新钢标一般钢结构二阶效应系数计算公式。

2 一般结构的二阶效应系数可按下列公式计算：

$$\theta_i^d = \frac{1}{\eta_{cr}} \quad (5.1.6-2)$$

式中： η_{cr} ——整体结构最低阶弹性临界荷载与荷载设计值的比值。

图2 一般钢结构二阶效应系数计算公式

通过新钢标的公式可以看到，对于结构二阶效应系数的计算，规范根据钢结构抗侧力构件在水平力作用下的变形形态，分为剪切型（框架结构）、弯曲型和剪弯型。对剪切型变形的规则框架结构，按钢结构标准5.1.6-1公式计算二阶效应系数。对弯曲型和剪弯型变形形态的一般钢结构，包括钢框架支撑结构、复杂钢结构及钢结构混凝土混合结构等按钢结构标准5.1.6-2公式进行结构二阶效应系数的计算。

2 PKPM软件对规则框架结构二阶效应系数的计算及输出

以某规则框架结构为例，进行规则结构二阶效应系数的计算。该结构的三维模型图如图3所示。使用SATWE软件计算结构二阶效应系数时，需要选择一阶弹性分析方法，且不考虑二阶效应计算方法，如图4为参数选择。

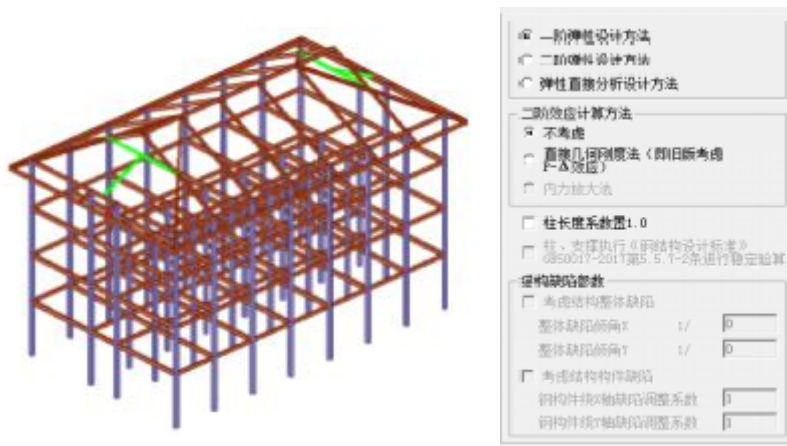


图3 规则框架结构三维图 图4 二阶效应系数计算时相关参数选择

计算完毕，SATWE软件在计算结果的“抗倾覆和验算”下“二阶效应系数及内力放大系数”文本中输出了结构的二阶效应系数，该结构中每一层X，Y两个方向的结果如图5所示。

二阶效应系数及内力放大

【钢结构标准】GB50177-2017 5.1.6条规定：钢质结构的稳定计算应符合下列规定：每层内力分析可采用一阶弹性分析或二阶弹性分析。当二阶效应系数小于0.1时，可采用一阶弹性分析；大于0.1且小于0.25时，应采用二阶弹性分析或非线性分析；大于0.25时，应采用非线性分析。

结构最大二阶效应系数(按4.9.8、5.6.1条)不大于0.1，每层内力分析可采用一阶弹性分析。结构最大二阶效应系数(0.0499, 1.61倍)不大于0.25，应采用《钢结构标准》GB50177-2017(5.1.4)的稳定计算。

θ_x, θ_y: 按《钢结构标准》GB50177-2017 5.1.4.1条规定二阶效应系数

抗震等级: 1级
 抗震等级: 1级
 上部楼层单位: 1kN

层号	X内轴力	Y内轴力	层高	层重量	θ _x	θ _y
4	20896.80	23101.88	5.30	11286.52	0.0499	0.0499
3	94274.72	97704.82	5.30	41089.81	0.0499	0.0499
2	23060.22	24633.22	5.30	11286.52	0.0499	0.0499
1	98775.84	102882.70	5.30	11286.52	0.0499	0.0499

图5 SATWE输出规则框架楼层二阶效应系数

需要说明的是，软件对于钢框架结构的二阶效应系数做了自动输出并给出了相关设计说明，设计师可直接根据软件输出的建议，对于需要考虑二阶效应分析的结构，需手动选择图4的二阶弹性分析方法进行结构的内力计算。

3 对软件输出二阶效应系数结果的手工校核

对软件输出的结果，按照新钢标的公式，进行二阶效应系数的手工校核，过程如下：

3.1 结构楼层刚度的校核

从规则框架结构二阶效应系数的计算公式可知，标准中的 $\sum H_i / \Delta_i$ 表示结构按照一阶弹性分析求得的结构层间剪力与层间位移的比值，即结构的楼层刚度。该刚度可以直接从计算结果中读取，如图6所示。



图6 楼层刚度比结果输出

对楼层层间剪力与层间位移的刚度手工校核，可直接查询楼层剪力与楼层位移。以首层刚度为例来校核，图7所示为该结构地震作用下的楼层剪力，图8所示为该结构地震作用下的楼层位移。



图7 地震作用下楼层剪力

图8展示了地震作用下楼层位移的计算结果。上方表格为X向地震作用下的楼层位移，下方表格为Y向地震作用下的楼层位移。表格中列出了楼层号、楼层剪力、平均位移和最大层间位移角等数据。

图8 地震作用下楼层位移

首层X向地震作用下剪力428.6kN，该方向平均位移为7.18mm，则X方向的楼层剪力与楼层位移之比的刚度为：428.6*1000/7.18=59693.59kN/m，与软件计算结果59675.94 kN/m 基本一致。

首层Y向地震作用下剪力437.0kN，该方向平均位移为7.02mm，则Y方向的楼层剪力与楼层位移之比的刚度为：437*1000/7.02=62250.71kN/m，与软件计算结果62262.75 kN/m 基本一致。造成手工校核结果与软件计算结果不能完全对应的主要原因是变形是四舍五入以后的近似结果。

也可通过软件中指定小数点后几位得较为准确的值，如显示小数点后四位，设置如图9所示为地震下楼层剪力，图10为地震下楼层位移。

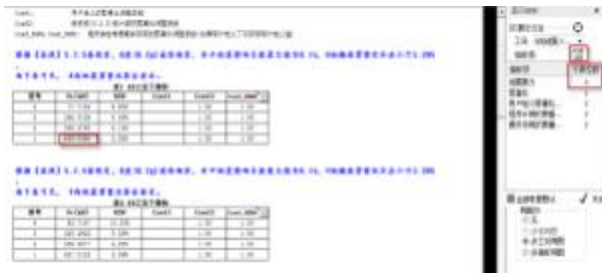


图9 显示小数点后四位地震下楼层剪力



图10 显示小数点后四位地震下楼层位移

通过输出小数点后四位较为准确的结果重新校核首层X方向刚度比，X向地震作用下剪力428.6380kN，该方向平均位移为7.1828mm，则X方向的楼层剪力与楼层位移之比的刚度为：428638/7.1828=59675.61kN/m，与软件计算结果59675.94 kN/m 完全一致。Y向也可按小数点后四位进行准确校核。

3.2 结构楼层轴心压力设计值校核

按照钢结构标准中的 $\sum N_i$ 所表述的含义，对于该设计内力为轴力设计值，可通过查询软件计算结果中恒载及活载的质量进行校核，如图11所示为软件输出结果。

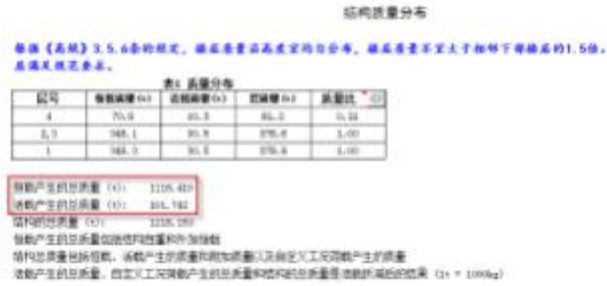


图11 结构总质量输出结果

对于首层来讲，恒载质量为1116.410t，活载质量为101.742t，该活荷载质量已经考虑了重力荷载代表值系数0.5，因此，恒活荷载下的轴力设计值为：

$$1.2 \times 1116.41 \times 10 + 101.742 \times 1.4 / 0.5 \times 10 = 16245.70 \text{ kN}$$

3.3 规则框架结构二阶效应系数校核

按照上述校核的中间值，对该结构首层两个方向的二阶效应系数进行校核，首层层高3.9m，X方向的二阶效应系数计算如下：

$$\theta_x^c = \frac{\sum N_i \cdot \Delta_{ui}}{\sum H_{vi} \cdot h_i} = \frac{\sum N_i / h_i}{\sum H_{vi} / \Delta_{ui}} = \frac{16245.71}{59675.94 \times 3.9} = 0.0698$$

Y方向的二阶效应系数计算如下：

$$\theta_y^c = \frac{\sum N_i \cdot \Delta_{ui}}{\sum H_{vi} \cdot h_i} = \frac{\sum N_i / h_i}{\sum H_{vi} / \Delta_{ui}} = \frac{16245.71}{62262.75 \times 3.9} = 0.0669$$

软件输出结果是四舍五入后的，因此，输出的结果中首层两个方向的二阶效应系数均为0.07，手工校核结果与软件计算结果一致。取小数点后四位的二阶效应系数结果如图12所示。



图12 显示小数点后四位二阶效应系数结果

4 结论

PKPM软件可以自动计算钢结构的二阶效应系数，设计师可以根据软件输出的计算结果，进行设计方法的正确选择。如果结构的二阶效应系数大于0.1，就需要考虑二阶效应，宜采用二阶 $p-\Delta$ 弹性分析方法或者直接分析法。在使用软件进行规则钢框架的二阶效应系数计算时需要注意以下几点：

1. 二阶效应计算的时候要用到楼层剪力与楼层位移的比值，也就是楼层刚度，因此，二阶效应系数的计算，应该在刚性楼板假定下考察该指标。

2. SATWE软件在计算二阶效应系数的时候，按照钢结构标准的要求区分规则框架结构及一般结构。对规则框架结构按新钢标5.1.6-1公式计算二阶效应系数；对一般钢结构，包括钢框架支撑结构、复杂钢结构及钢结构混凝土混合结构等按新钢标5.1.6-2公式进行结构二阶效应系数的计算。

3. PKPM软件计算二阶效应系数时，对于规则框架结构输出每一层两个方向的二阶效应系数；对一般结构，如框架支撑结构等，软件会输出整个结构两个方向的二阶效应系数。

4. 对软件中输出的各项结果，在手工校核时，需要注意精度引起的差异，尤其对于刚度、变形、剪重比等结果，设计师可以通过文本文件中设置显示小数点后更多位数来进行结果的查看，并进行最终结果的精确复核。

5. 按新钢标对一般钢结构二阶效应系数的计算，取结构整体屈曲最低阶屈曲因子的倒数，在PKPM软件中也可实现，SATWE软件通过临界荷载与刚重比的关系，按照刚重比结果计算二阶效应系数。也可通过PMSAP软件对结构做屈曲分析，根据结构最低阶屈曲模态得到结构二阶效应系数。（后续文章会对刚重比与二阶效应系数的关系及如何使用PMSAP进行屈曲分析有详细介绍）

参考文献

[1] GB50017-2017钢结构设计标准[S].北京：中国建筑工业出版社，2017.