

01

二阶效应系数概述

钢结构标准中要求按照结构二阶效应系数的大小判断结构设计的分析方法是采用一阶分析法还是二阶分析法。根据标准5.1.6条，当结构二阶效应系数大于0.1时，需要进行二阶效应分析。标准对结构二阶效应系数的计算区分了不同的结构类型。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，该系数按照整体结构最低阶弹性临界荷载与荷载设计值比值得到的临界因子取倒数得到。因此，要按照钢结构标准计算结构二阶效应系数，需要对结构进行弹性屈曲分析，得到结构整体最低阶的屈曲因子。需要注意排除可能出现的一些最薄弱构件的屈曲模态。

PKPM

的SATWE

软件对一般钢结构，

如钢框架支撑体系等，并未完全按照新钢

标的公式计算二阶效应系数，而是通过二阶效应系数与刚重比的关系，按照刚

重比结果来计算，并输出结构两个方向二阶效应系数。也可使用PMSAP软

件对结构进行屈曲分析，按照计算的屈曲因子，结合钢结构标准5.1.6-2公式得

结构的二阶效应系数。

结合某框架支撑结构案例，按照两种方法分别计算结构的二阶效应系数，并对结果进行对比分析，对设计师在设计中如何正确执行规范提供相关建议。

02

新钢标对结构二阶效应系数的计算

1. 钢结构标准对规则结构的二阶效应系数的计算，按照图1公式进行计算。

图 1

2. 对一般结构的二阶效应系数计算，按照图2公式进行计算。

图 2

按钢结构标准5.1.6-2公式计算钢框架支撑结构、复杂钢结构及钢结构混凝土混合结构等钢结构的二阶效应系数时，需得到整体结构最低阶弹性临界荷载与荷载设计值的比值，该比值可以通过对结构进行弹性屈曲分析得到，也可以对比较规则的结构，按照二阶效应系数与刚重比的关系计算得到。下文针对刚重比与二阶效应系数的关系作推导，得刚重比与二阶效应系数的表达式；同时对某结构进行屈曲分析，得到屈曲因子，再计算得到结构的二阶效应系数。

03

弯曲型和剪弯型结构失稳的临界荷载

一般结构可以
视为悬臂杆件，弯曲型悬臂杆件的临界荷载可以由欧拉公式求得：

$$(1)$$

式中

作用在悬臂杆顶部的竖向临界荷载；

悬臂杆的弯曲刚度；

悬臂杆的高度。

将作用在顶部的临界荷载

以沿楼层均匀分布的重力荷载之总和

取代，进行简化可得到如下（2）的表达式：

$$(2)$$

将（2）式带入（1）式，得到如下表达式：

$$(3)$$

对于弯剪型悬臂构件，近似计算中，可用等效侧向刚度

取代式（3）中的弯曲刚度

。作为临界荷载的近似计算公式，对弯曲型和剪弯型悬臂杆件统一表示为：

$$(4)$$

二阶效应系数与刚重比关系

高规5.4节中对于剪力墙结构、框架-剪力墙结构、板柱剪力墙结构等弯曲型及剪弯型结构的重力二阶效应计算结果满足如下(5)式要求时，可不考虑重力二阶效应的不利影响。

$$(5)$$

式中

结构所有楼层的重力荷载设计值，取1.2倍永久荷载标准值与1.4倍的楼面可变荷载标准值的组合值；

悬臂杆的等效侧向刚度；

悬臂杆的高度。

为便于判断结构是否满足不计算二阶效应的条件，特定义参数

，并称之为刚重比，且当弯曲型或剪弯型结构的刚重比大于2.7时，可不考虑结构重力二阶效应。对应刚重比可表达为如(6)式所示：

$$(6)$$

按照钢结构标准，对于一般钢结构二阶效应系数的表达式如下：

$$(7)$$

再由钢结构标准对的表达，可得如下表达式

$$(8)$$

结合上述表达式（4）（6）（7）及（8），并做相应的变换，得到一般结构二阶效应系数与刚重比的关系如下：

$$(9)$$

05

PKPM软件对一般钢结构二阶效应系数计算

以某钢框架支撑结构为例，进行一般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。

图 3

计算完毕，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”文本中输出了该框架支撑结构两个方向二阶效应系数，如图4所示。

图 4

同时可以直接查看软件计算的结构在两个方向刚重比结果，如图5所示：

图 5

目前SATWE软件按照风荷载下的刚重比计算二阶效应系数，因此校核二阶效应系数时，取风荷载下的刚重比。按照上述的推导公式，手工校核结构X,Y两个方向的二阶效应系数，结果如下：（注：0.135的系数在软件中按照0.14取值）

手工校核该框架支撑结构的二阶效应系数计算结果与软件输出结果完全一致。

06

使用PMSAP对钢结构进行弹性屈曲分析

按照钢结构新标准要求，也可以直接对结构进行弹性屈曲分析，直接以整体结构最低阶弹性临界荷载与荷载设计值比值得到的临界因子取倒数得到结构的二阶效应系数

。在PKPM的PMSAP

软件中，仅仅需要简单的操作结合模态

分析的结果即可得到整体结构最低阶屈曲因子。进行弹性屈曲分析的流程如下：

1. PM模型接入PMSAP进行计算。

如果是在PM中建的模型，直接接入PMSAP进行分析会弹出如下图6的界面，为了和SATWE参数设置一致，计算结果有可比性，首次进入PMSAP计算选择

生成“全新模型”即可；如果是在spascad空间结构中建的模型，直接进行PMSAP分析。

图 6

2. PMSAP软件中选择考虑屈曲分析。

在PMSAP软件的参数设置中，“活荷载”下面选择“考虑buckling分析”，同时指定屈曲模态数及屈曲分析的误差，如果有剪力墙，可以选择“剪力墙按照空间壳元分析”。屈曲分析选择如图7所示。

图 7

3. PMSAP软件中定义屈曲组合。

在PMSAP软件“工况组合”下定义屈曲分析组合，按照规范要求，定义1.2倍永久荷载标准值与1.4倍的楼面可变荷载标准值的组合，如图8所示。

图 8

4. buckling屈曲分析结果的查看。

计算完毕之后，查看后处理计算结果，在“设计结果”图型文件中可以看到定义了屈曲工况下结构的每一个屈曲模态，如图9所示，根据屈曲模态动画，可以判断那个模态属于结构整体沿着某个方向的最低阶模态，该屈曲模态对应的屈曲因子的倒数就是该结构沿着该方向的二阶效应系数。同时“文本查看”下“旧版本文本查看”，查看“详细摘要”，再找到对应的“(ITEM046)结构整体屈曲分析结果 (Buckling Analysis)”该项结果，如图10所示为结果查看菜单，图11所示为图3模型计算的前6阶屈曲模态对应的临界因子。

图 9

图 10

图 11

结构屈曲因子的查看要结合屈曲模态来考察，二阶效应系数的计算要取结构整体最低阶段屈曲模态对应的屈曲因子。

07

对某钢结构按屈曲分析计算二阶效应系数

如图12所示为一框架支撑结构，对该结构按照SATWE软件的方法计算二阶效应系数，同时使用PMSAP软件按照屈曲分析进行二阶效应系数计算，并对两种计算结果进行比对。

图12

1.使用SATWE软件计算该结构的二阶效应系数。

SATWE软件输出的该结构在两个方向的二阶效应系数如图13所示。

图13

2.使用PMSAP软件进行屈曲分析计算该结构的二阶效应系数。

对该结构进行屈曲分析，由于该结构Y方向的低阶屈曲模态出现的比较靠后，因此，在计算时，取屈曲模态数为90。计算完毕得到结构沿着X方向整体屈曲的最低阶模态为第一模态，模态如图14所示；结构沿着Y方向整体屈曲的最低阶屈曲模态为第66个模态，屈曲模态只有取得足够多的情况下才能看到沿着Y向结构整体的屈曲模态，第66阶屈曲模态如图15所示。

图14

图15

再查看该结构计算输出的每一阶屈曲模态的屈曲因子，结果如图16所示。

图16

根据计算结果，结构沿着X方向整体屈曲的最低阶模态为第一模态，第1阶屈曲因子为2.63，因此按照屈曲分析得到的结构X方向的二阶效应系数为 $1/2.63=0.38$ ；结构沿着Y方向结构整体屈曲的最低阶屈曲模态为第66个模态，第66阶屈曲因子为24.23，因此按照屈曲分析得到的结构Y方向的二阶效应系数为 $1/24.23=0.041$ 。

3.两种二阶效应系数计算方法比较。

对两种方法及两个软件计算的同一结构的二阶效应系数结果对比如下表1所示：

SATWE与PMSAP两软件采用不同方法计算的结构二阶效应系数

表 1

通过上述的结果对比可以看出，两种方法计算的结构的二阶效应系数有别，对该框架支撑结构Y向的二阶效应系数结果基本一致，但是X方向的二阶效应系数差异较大，基本接近20%，主要原因是该方向没有支撑基本接近框架，如果加支撑计算，也可以发现这个屈曲分析的结果与按照刚重比计算的结果一致。通过上述的对比可以看到，采用屈曲分析的方式进行一般钢结构二阶效应系数的计算需要找到结构某个方向最低阶整体屈曲模态，才能得到该方向的屈曲因子。但在实际工程设计中要找到结构的屈曲因子，不仅仅要取很多阶屈曲模态，还要观察每个屈曲模态，工作量比较大，并且从图16中也可以看到，高阶模态下的屈曲因子，结果之间差异并不是太大，要确定一个准确的因子不好把握，因此确定结构二阶效应系数也比较困难。

08

对该钢结构X方向增加支撑再计算二阶效应系数

由于图12的结构两种方法计算的二阶效应系数在X方向差异较大，因为X方向属于纯框架，因此，对图12的结构沿着X方向布置了两道支撑，如图17所示，对该工程再按照两种方法进行二阶效应系数的计算及结果比对。

图 17

采用SATWE软件计算之后得到的结构的二阶效应系数如图18所示。

图 18

采用PMSAP软件进行屈曲分析，得到的屈曲因子如图19所示。

图 19

根据计算结果，结构沿着X方向整体屈曲的最低阶模态为第一模态，第1阶屈曲因子为7.13，因此按照屈曲分析得到的结构X方向的二阶效应系数为 $1/7.13=0.1403$ ；结构沿着Y方向结构整体屈曲的最低阶屈曲模态为第69个模态，第69阶屈曲因子为25.02，因此按照屈曲分析得到的结构Y方向的二阶效应系数为 $1/25.02=0.040$ 。两种二阶效应系数计算的方法，对两个方向都是框架支撑结构的体系是一致的。两种方法在设计中都可以使用，并且计算结果也是一致的，屈曲分析唯一比较麻烦的是有可能要取更多阶屈曲模态并且对每个模态观察才能确定二阶效应系数计算需要的屈曲模态与屈曲因子。

09

对一般钢结构二阶效应系数计算的总结

PKPM软件可以自动计算一般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。SATWE软件按照推导出的结构刚重比与二阶效应系数关系来计算一般结构的二阶效应系数；PMSAP软件可按照钢结构新标准屈曲因子的方法计算二阶效应系数。

一般钢结构二阶效应系数计算时需要注意以下几点事项：

1.对比较规则的一般钢结构，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SATWE软件按钢结构标准5.1.6-2公式自动进行结构二阶效应系数的计算。

2.对于复杂钢结构，特别是空间复杂钢结构，用刚重比结果计算二阶效应系数不太适用。虽然SATWE程序也能输出一个二阶效应系数的结果。复杂空间钢结构的二阶效应系数计算建议用PMSAP屈曲分析的方式。

3.SATWE软件按照结构二阶效应系数与刚重比的近似关系

计算一般钢结构的二阶效应系数；PMSAP软件可对结构进行屈曲分析，按照屈曲因子取倒数直接得到结构的二阶效应系数。

4.使用PMSAP软件进行一般钢结构的屈曲分析时，需要定义buckling组合，并且定义永久荷载和可变荷载的分项系数。
。（需要注意的是：由于可靠性新标准的执行，该分项系数应修改为1.3与1.5，但现阶段设计中，高规对该系数没有修改，在该文中及现有软件中均取值1.2与1.4）

5. 使用PMSAP软件做屈曲分析，根据结构最低阶屈曲模态得到结构二阶效应系数时，需要观察取到足够多的模态，并且要观察每一阶模态，确保二阶效应系数计算的屈曲因子对应的屈曲模态是结构整体的模态，要排除可能出现的一些最薄弱构件的屈曲模态。

6.在实际工程设计中，采用新标准屈曲因子直接计算结构二阶效应系数虽然在PMSAP软件中也可实现，但存在结构两个方向最低阶整体屈曲模态不好确定的难题，并且有些情况需要计算很多阶模态才能得到，因此，在设计中建议适当选择。