

二阶效应对钢框架结构分析的影响

牛海清 朱召泉

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 对钢框架结构进行了一阶分析、二阶分析以及按《钢结构设计规范》(GBJ17—88)修订稿推荐的近似二阶分析,通过对不同分析方法的计算对比,得出了钢框架结构分析考虑二阶效应的某些一般性结论.

关键词 二阶效应; 钢结构; 钢框架; 一阶分析; 二阶分析

中图分类号 :TU31 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2002)04-0103-04

钢框架的结构分析是钢结构设计中的基本问题,对于该类结构的分析应该考虑二阶效应的影响.目前,已有许多国家把二阶理论纳入了钢结构的设计规范.在我国现行的《钢结构设计规范》(GBJ17—88)^[1]中,对钢框架进行整体结构分析没有明确规定所采用的方法.《钢结构设计规范》(GBJ17—88)修订稿(后简称修订稿)虽然对钢框架结构的分析计算作了规定,但也只是一种二阶分析的近似计算.为此,本文将结合几个算例,采用作者编制的钢框架结构分析程序,分别对它们进行了一阶和二阶弹性分析,并通过与修订稿所推荐公式的计算结果对比,校核该近似公式的准确性,从而对钢框架的结构分析和设计提出某些建议.

1 结构分析方法

1.1 一阶分析方法

一阶分析是针对未变形的结构进行平衡分析,不考虑变形对外力效应的影响^[2,3].在分析结构内力以进行强度计算时,除少数特殊结构(如悬索结构)外,按一阶分析通常可以获得足够精确的结果.

1.2 考虑二阶效应的分析方法——二阶分析方法

二阶效应是指结构变形对力的效应,如结构水平位移对竖向力的效应($P-\Delta$ 效应),杆件挠度对轴力作用的效应($P-\delta$ 效应),杆件伸长或缩短产生的效应,弯曲使弦长减小的效应以及初始弯曲、初始倾斜产生的效应等.结构的变形将会在结构中引起附加内力,而附加内力的产生将会导致进一步的附加变形,如此往复.考虑二阶效应的方法是用二阶分析考虑变形对外力效应的影响,针对已变形的结构来进行平衡分析.钢框架结构的精确分析应考虑二阶效应,在其二阶精确分析中应同时注意以下几点:

- 建立平衡方程时考虑弦转角和挠度的影响.
- 考虑轴力对杆件刚度降低的影响.杆件刚度(弹性刚度和几何刚度)要用精确表达式^[4]计算.
- 轴力作用下杆件的固端力采用精确公式^[4,5]计算.
- 必须进行关于杆件轴力的收敛性计算:先由一阶分析求得各杆件轴力,由此轴力重新计算刚度和固端力,进而计算二阶内力,如此反复迭代直到轴力收敛为止.

本文的钢框架结构二阶分析程序同时考虑了上述各种因素,在计算杆件的刚度和固端力时应用了精确的函数表达式,对杆件的轴力进行多次迭代以达到收敛.采用本文程序对参考文献[4,5]中的各算例进行计算所得的结果与原文结果吻合得相当好,最大误差不到1%.

1.3 修订稿推荐的近似二阶分析

修订稿第3章第3.3.6条对钢框架结构内力分析计算作了如下规定:

- 无侧移框架结构采用一阶分析.

b. 有侧移框架结构考虑变形对内力的影响采用二阶分析,二阶分析的弯矩可用下列公式近似计算.

$$M_2 = M_{1b} + \alpha_2 M_{1s}$$

(1)

$$\alpha_2 = 1 / \left(1 - \frac{\sum N \cdot \Delta u}{Hh} \right)$$

(2)

式中: M_{1s} ——侧移弯矩, $M_{1s} = M_1 - M_{1b}$, M_1 为有侧移框架的一阶弯矩, M_{1b} 为假想框架无侧移时的构件弯矩; $\sum N$ ——同一楼层各柱轴压力设计值之和; Δu ——层间侧向位移; H ——产生位移 Δu 的水平力; h ——楼层高度.

2 一阶、二阶弹性分析和修订稿推荐公式计算结果比较分析

本文分别采用一阶弹性分析、二阶弹性分析和规范修订稿推荐的近似公式对几个平面钢框架结构的位移和内力进行了计算分析,限于篇幅,下面只列出两个算例的计算结果,以进行对比.

2.1 算例

算例1 某单跨3层钢框架,其尺寸、所受荷载如图1所示.材料弹性模量 $E = 1.99955 \times 10^8 \text{ kPa}$ (1)(2)杆件截面为W8×48 (4)(5)(7)(8)杆件截面为W8×35 (3)(6)杆件截面为W21×44 (9)杆件截面为W14×30.

算例2 某多层钢框架(如图2)横向为两跨5层的框架,纵向为4跨的支撑抗侧力体系,框架梁柱均采用焊接H型钢截面,材质均为Q235钢.本文对其横向框架进行分析.材料弹性模量 $E = 2.06 \times 10^8 \text{ kPa}$,截面特性如下:

左右两列柱及中列柱的上3层截面相同:

$$A = 13280 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad I_x = 395.42 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

中列柱的下2层截面特性:

$$A = 14280 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad I_x = 647.63 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

梁截面:

$$A = 11680 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad I_x = 336.44 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

分别对以上两算例的钢框架结构进行一阶弹性分析、二阶弹性精确分析和修订稿推荐的二阶近似分析,算得的水平侧移列入表1,内力见图3所示(图中纵坐标为一阶分析和修订稿推荐公式所得内力与二阶分析结果的比值).

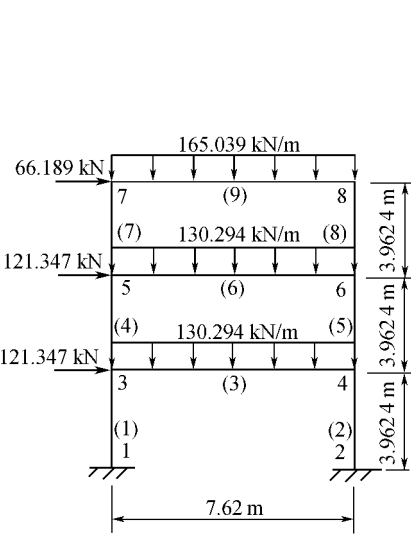


图1 算例1简图
Fig.1 Sketch for example 1

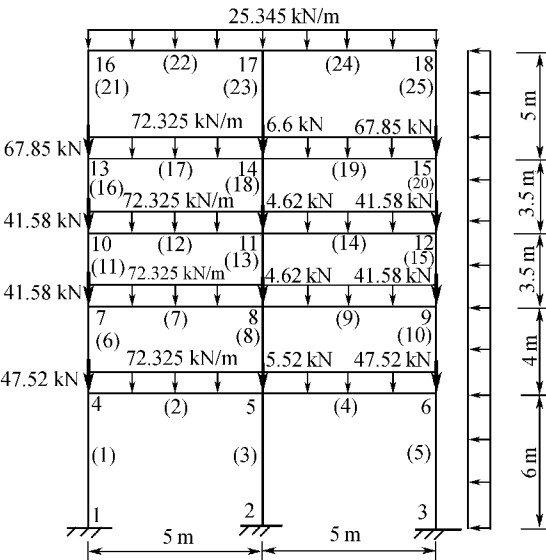


图2 算例2简图
Fig.2 Sketch for example 2

表 1 水平侧移比较					
Table 1 Comparison of horizontal displacement					mm
框架类型	节点编号	一阶弹性分析	修订稿推荐方法分析	二阶弹性分析	二阶效应引起的侧移增大率/%
单跨 3 层	1	0.0000	0.0000	0.0000	
	2	0.0000	0.0000	0.0000	
	3	68.7918	68.5397	87.1426	21.06
	4	68.5616	68.8138	86.91624	21.12
	5	140.5220	140.5290	180.4970	22.15
	6	140.8120	140.8050	180.8290	22.13
	7	174.8410	173.9130	222.4360	21.40
	8	173.2060	174.1350	220.7710	21.55
两跨 5 层	3	0.0000	0.0000	0.0000	
	6	-52.2812	-52.0342	-55.6817	6.11
	9	-80.8966	-80.6878	-85.8655	5.79
	12	-98.5819	-98.3957	-104.2530	5.44
	15	-110.8610	-110.5310	-116.8610	5.13
	18	-121.5700	-121.3810	-127.7750	4.86

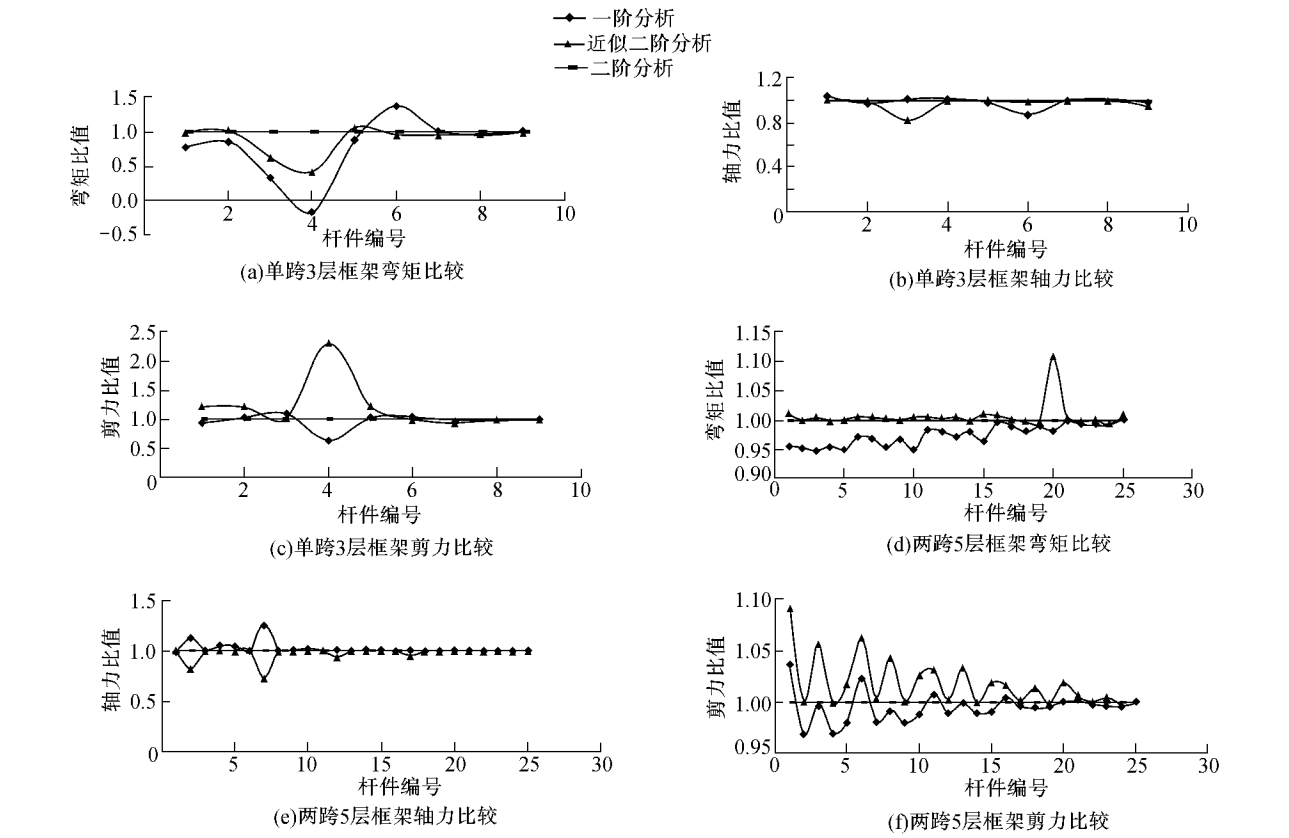


图 3 钢框架结构内力分析结果

Fig.3 Results of inner force analysis of steel frame structures

2.2 水平侧移的分析比较

由表 1 可见,钢框架结构按一阶分析和修订稿推荐方法所得的水平侧移非常接近,但是它们与二阶分析的结果相比却相差很多,本算例中二阶效应引起的侧移增大率最大为 22.15%。一阶分析与二阶分析所得侧移的较大差异是因为一阶分析是针对未变形的结构来分析,没有考虑二阶效应形成的附加水平位移,所以求得的位移值较二阶分析小。对于修订稿推荐的方法,在计算位移时实质上是应用一阶分析的方法,因而它与一阶分析的位移计算结果很相近。从表 1 两跨 5 层框架的结果明显看到,二阶效应对位移的影响在底层部分最为明显,越往上影响越小。此外,表 1 的两算例中二阶效应引起的侧移增大程度不同,这是因为二阶效应对结构侧移增大的影响随结构形式、荷载作用方式和大小、水平荷载和竖向荷载的比值大小等因素的变化而变化。

2.3 内力的分析比较

如图3,修订稿推荐公式与二阶精确分析的计算结果较接近,而一阶分析与二阶分析的计算结果相差较大.实际上,修订稿推荐公式是在一阶分析的基础上采用放大系数间接考虑了二阶效应,其放大系数同参考文献[2,3]所示,这种方法比传统的一阶弹性分析方法算得的内力能更好地反映实际情况.由图3可以看到,同水平侧移一样,二阶效应对内力的影响由下向上逐渐减小;二阶效应不仅对柱有影响,对梁也有影响.

由图3可见,有些杆件处3种分析结果差异较大,如(a)(c)中的4号杆(d)中的20号杆等.其中,一阶分析和二阶分析的较大差异是因为在这些杆件处二阶效应的影响比在其它杆件处相对较大.另外,在结构一阶内力相对较小(算例1中小于2.78%最大内力,算例2中小于1.4%最大内力)处,用近似二阶分析与二阶分析所得结果相差也很大.这是因为二阶效应与结构的受力状态有关,受力越小二阶效应的影响越微弱.推荐稿的近似二阶分析对框架的某一层都采用同一个放大系数,从而扩大了结构内力较小处二阶效应的影响.

3 结 论

a. 考虑二阶效应后,钢框架侧移增大.一阶分析和修订稿推荐方法计算的侧移与二阶分析的侧移相比误差较大.

b. 考虑二阶效应后,钢框架杆件内力绝对值一般都有所增大.修订稿推荐的内力计算公式与二阶精确分析结果吻合较好,但需进行两次一阶分析,对于多、高层框架工作量并不少,建议应用分析程序直接进行二阶精确分析,同时得到其位移和内力.

c. 钢框架结构的二阶效应不仅对柱有影响,对横梁也有影响,其影响是多方面的.

d. 二阶效应对框架杆件侧移和内力的影响在结构底部较大,越往上越小.

e. 二阶效应与结构的形式和材料、荷载的作用方式和大小等因素有关.当框架层数多、侧向刚度不大、竖向荷载和水平作用力较大时,二阶效应更为突出,应予以重视.

参考文献:

- [1] GBJ17—88 钢结构设计规范[S].
- [2] 陈绍蕃. 钢结构稳定设计指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996. 4~10, 125~135.
- [3] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 22~24, 202~211.
- [4] 李存权. 结构稳定和稳定内力[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000. 82~106.
- [5] 川和郎著. 结构的弹塑性稳定内力[M]. 王松涛, 魏钢译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992. 6~8, 30~35.

Influences of second-order effect on structural analysis of steel frames

NIU Hai-qing, ZHU Zhao-quan

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: An analysis of steel frame structures is performed by use of the first-order analysis, the second-order analysis and the approximate second-order analysis recommended in the revised edition of "Chinese Standard for Steel Structure Design (GBJ17—88)". From the comparison of calculated results, some general conclusions are drawn for steel frame structural analysis considering the second-order effect.

Key words: second-order effect; steel structure; steel frame; first-order analysis; second-order analysis