

高层钢框架结构变形控制设计方法研究

金路,朱永伟,张鸣一

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 改进现阶段基于承载能力极限状态分析法应用在高层钢结构设计中的不足。方法 选取二阶效应参数 c 、结构高宽比 H/L 、框架柱长细比 λ 和梁柱总线刚度比 K_z 等参数对单跨 12 层钢框架结构 1B12F 及双跨 32 层钢框架支撑结构 2B32F 进行工况设计与参数分析。结果 由滞回曲线结果看出,对于不同参数的钢框架结构,其一层柱顶的滞回曲线均为饱满的梭形。对于 1B12F 钢框架结构及 2B32F 钢框架支撑结构,在荷载达到一级加载制度的峰值时,结构柱顶水平侧移与层间相对侧移均已经超过了规范的位移容许值。结论 对于钢框架结构以及弱支撑的钢框架支撑结构,在低周往复荷载作用下刚度退化迅速,由于其侧向刚度较低,框架的侧移超过了正常使用极限状态的位移容许值,其抗震设计应由位移作为控制标准。

关键词 钢框架支撑结构;变形性能;滞回曲线;位移控制

中图分类号 TU393.2 文献标志码 A

Research on Deformation Control Design Method of High-rise Steel Frame Structures

JIN Lu, ZHU Yongwei, ZHANG Mingyi

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The main purpose of this paper is to improve based on bearing capacity limit state analysis method used in the current lack of high-rise steel structure design. The test method is based on the second-order effect parameter c , The structure aspect ratio H/L , The frame column slenderness ratio λ and Beam-column bus stiffness ratio K_z can be used by the design and parameter analysis from twelve to thirty layer of steel frame structure and from 1B to 2B of working condition of steel framework-support structure. The research has been seen by the hysteresis curve, one layer of steel frame structure for different parameters are pillars of hysteresis curve are for the spindle, and are relatively full, in addition, the 1B12F and 2B32F steel frame structure and steel frame supporting structure when the load reached the peak of my level of loading system, the structure of the pillars and lateral layer between the relative displacement of the lateral has exceeded the standard tolerance value conclusion for steel frame structure and weak support steel frame supporting structure, the stiffness degradation under low cycle reciprocating load quickly, due to its low lateral stiffness,

收稿日期:2017-04-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51208324);沈阳建筑大学博士后基金项目(SJZUBSH201601)

作者简介:金路(1982—),女,副教授,博士,主要从事高层钢结构方面研究。

the framework of lateral more than the allowable displacement of normal use limit state, thus for high soft steel frame structure and steel frame supporting structure with weak support, its seismic design should be determined by the displacement as control standard. Also has been clear about the scope of application of direct analysis method based on displacement control, which are verified by an example with displacement as the control design method based on the direct analysis of applicability.

Key words: steel frame supporting structure; deformation performance; hysteresis curve; the displacement control

钢结构高等分析的概念最早由澳大利亚规范首次提出,随后 Chen W F^[1-3]做了大量研究,高等分析方法目的是对结构进行一次全过程分析,替代传统设计方法的两阶段设计。该方法充分考虑影响结构的非线性因素,直接描述结构的强度和稳定性,摒弃了构件计算长度和相关方程的概念,特别是对于多高层结构分析其优越性十分明显^[4]。Kim 等^[5-6]对影响空间半刚性框架的非线性因素进行分析,半刚性框架的非线性通过弹簧结构来模拟,用广义位移方法考虑非线性平衡方程增量迭代的问题,得到的荷载位移曲线与先前的研究结果有很好的吻合,减少了结构体系的自由度,并很好地预测了空间钢框架的非线性影响。

钢结构的直接分析与设计方法考虑了结构的几何非线性、材料非线性、构件本身的残余应力和初始几何缺陷等因素的影响^[7-8]。其最大的优点在于可直接分析结构的整体承载力和变形性能,不需要对各个构件进行单独的强度和稳定性验算。目前国内外对于钢结构设计方法的研究普遍集中在基于承载力极限状态考虑多种非线性因素的影响,但有研究表明,对于高柔钢结构,在极限荷载状态下的结构位移往往已经超出规范限值的要求,结构最终容许承载力应由变形限值作为控制依据^[9]。基于此,笔者采用有限元数值模拟的方法,对高层钢框架和框架-支撑结构在低周往复荷载作用下的滞回性能进行研究,提出低周往复荷载作用下高层钢结构变形控制设计方法,通过算例验证了以位移作

为控制依据的直接分析设计方法的适用性。

1 特征值屈曲分析

特征值屈曲分析属于线性分析,可以预测理想弹性结构的理论屈曲荷载,也可以作为非线性屈曲分析的初步评估,其屈曲模态的形状也可以作为非线性屈曲分析的初始几何缺陷^[10]。

特征值屈曲分析的过程包括:创建有限元模型,得到静力解、特征值屈曲解以及查看结果。在进行特征值分析时,应注意以下几点:

(1)特征值屈曲分析仅考虑线性行为。若模型中定义了非线性单元将按线性单元处理。

(2)必须定义材料的弹性模量 EX 或某种指定形式的刚度。非线性的性质会自动忽略。

(3)特征值屈曲分析结果得到的屈曲荷载系数受单元网格密度的影响很大。越高阶的屈曲模态,由网格密度划分影响而产生的误差越大,其原因与形成的单元应力刚度矩阵有关。

(4)必须激活预应力选项。静力计算中必须将 $PSTRES$ 选项设为 ON。

(5)屈曲分析所得到的屈曲荷载系数即为结构的特征值,所施加的荷载乘以屈曲荷载系数等于屈曲荷载。所有荷载都应按照特征值进行相应的缩放,当一个结构中同时存在有恒载和活载时,必须保证恒载的应力刚度在特征值求解时不被缩放。通常求解方案:

屈曲荷载 = 屈曲荷载系数 × (恒载 + 活载).
 通过不断的迭代、调整,直到最后特征值系数变为 1.0.

以 3B32F 钢框架支撑结构为例,提取其特征值屈曲分析的第一阶屈曲模态见图 1.

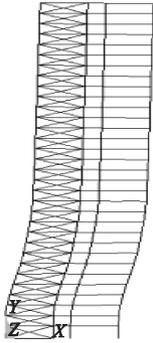


图 1 第一阶屈曲模态

Fig. 1 First order buckling mode

该模型的基本荷载包括恒载、活载和风载,结构自重由程序自动计算,通过几次调整,当活荷载设为基本荷载的 13 倍时,特征值屈曲解得第一模态的屈曲荷载系数为

1.082,接近于 1,因此该结构的临界荷载为基本荷载的 13 倍,将此时结构的几何变形作为该结构的初始几何缺陷.

2 参数组合与工况编号

分别选取 12 层和 20 层纯钢框架以及 32 层和 40 层的带支撑框架,主要分析单跨、双跨、三跨及四跨的钢框架结构.不同跨度表示为 1B~4B,不同层数表示为 12F~40F,根据研究的具体情况,将框架编号为 1B12F、2B12F、2B20F、3B20F、2B32F、3B32F 和 4B40F(其中 B 表示跨度,F 表示层数).对以上钢框架及框架支撑结构选取结构高宽比 H/L 、二阶效应参数 c 、框架柱长细比 λ 以及梁柱总线刚度比 K_z 这 4 个参数展开分析,每个参数在不同范围内取值,组成若干组工况,最终需要计算 36 种工况.钢框架结构工况编号说明如图 2(a)所示,钢框架支撑结构工况编号说明如图 2(b)所示.

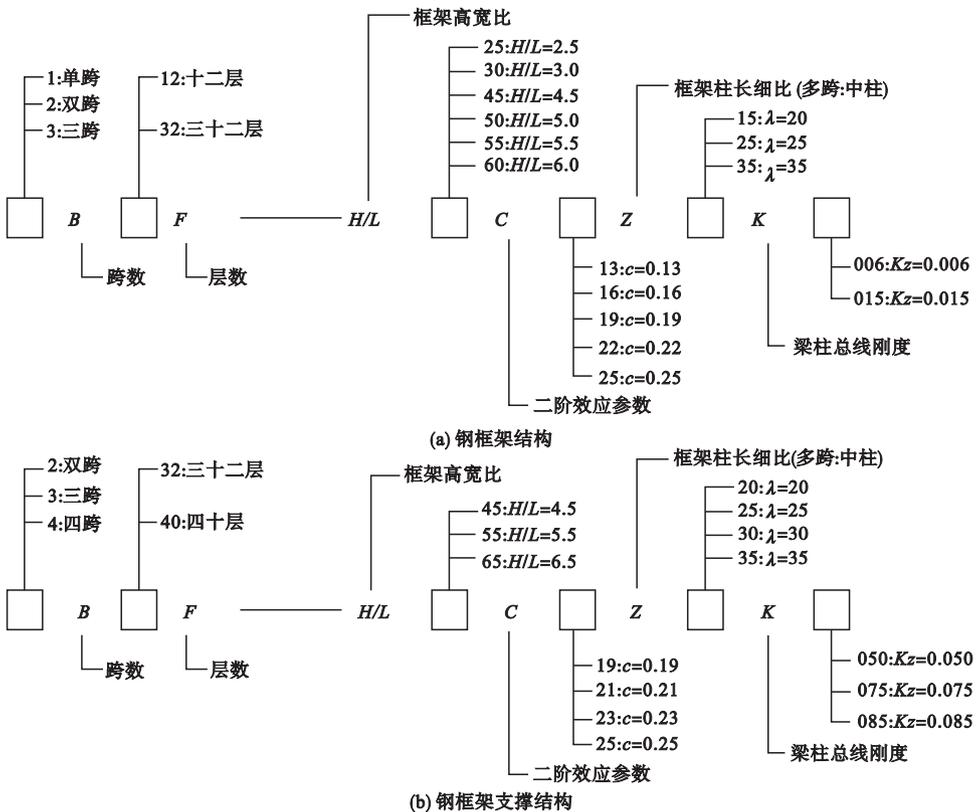


图 2 工况编号

Fig. 2 Work condition number

3 钢结构滞回性能分析

3.1 滞回曲线

以1跨12层钢框架结构1B12F及2跨32层钢框架支撑结构2B32F为例,工况设计编号见表1.

一层中柱柱顶位置在低周往复荷载作用下,1B12F滞回曲线见图3,图中竖线为根据《钢结构设计规范》(GB50017—2003)规定计算的构柱顶水平位移容许值 $x = H/400 = 9\text{ mm}$. 2B32F滞回曲线见图4,图中竖线为根据《钢结构设计规范》(GB50017—2003)

规定计算的构柱顶水平位移容许值 $x = H/400 = 10.5\text{ mm}$.

表1 设计工况

Table 1 Work conditions

工况	1B12F	2B32F
1	HL50C13Z15K006	HLA5C21Z20K050
2	HL60C13Z15K006	HL55C21Z20K050
3	HL60C16Z15K006	HL55C23Z20K050
4	HL50C13Z25K006	HLA5C21Z25K050
5	HL60C13Z25K006	HL55C21Z25K050
6	HL60C16Z25K006	HL55C23Z25K050

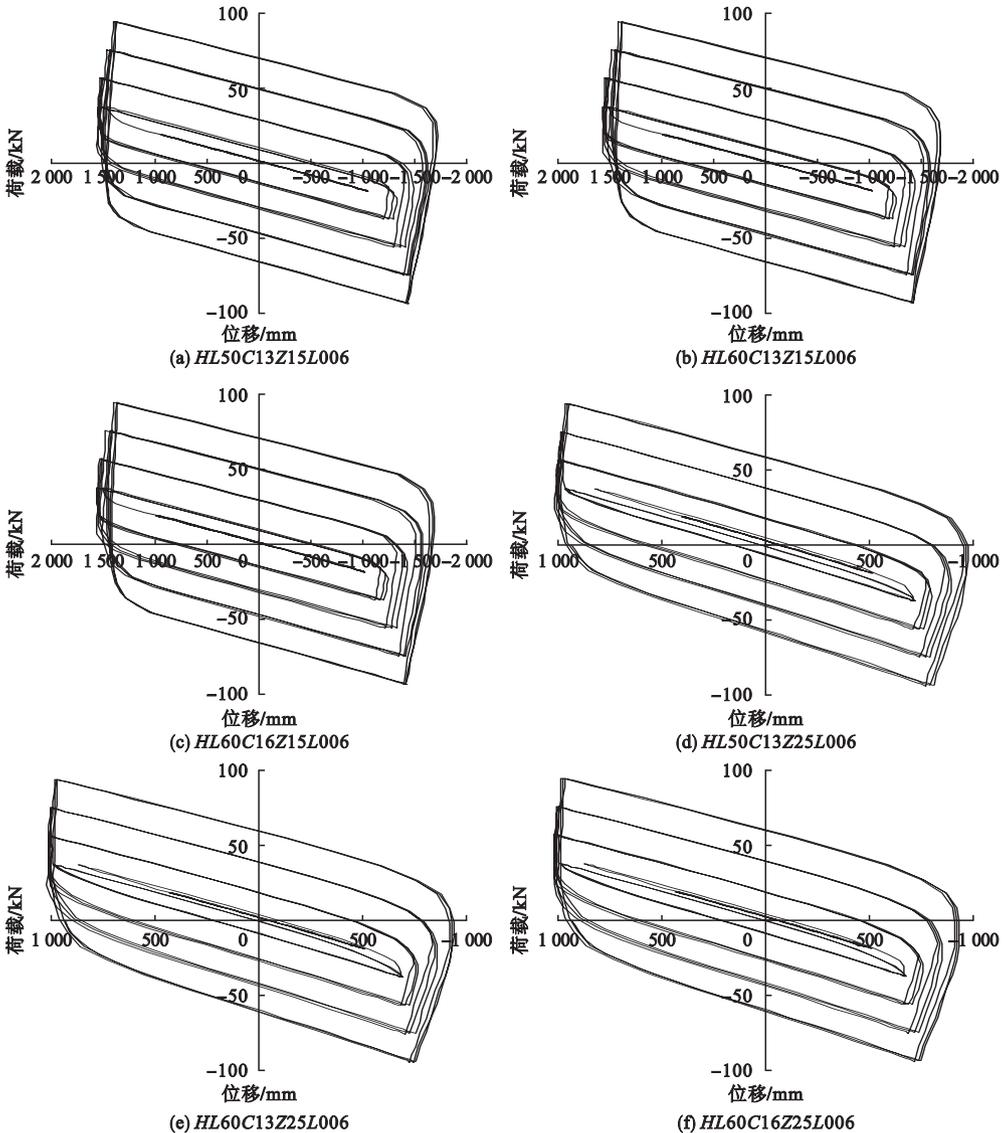


图3 1B12F的滞回曲线

Fig. 3 Hysteresis curves of 1B12F

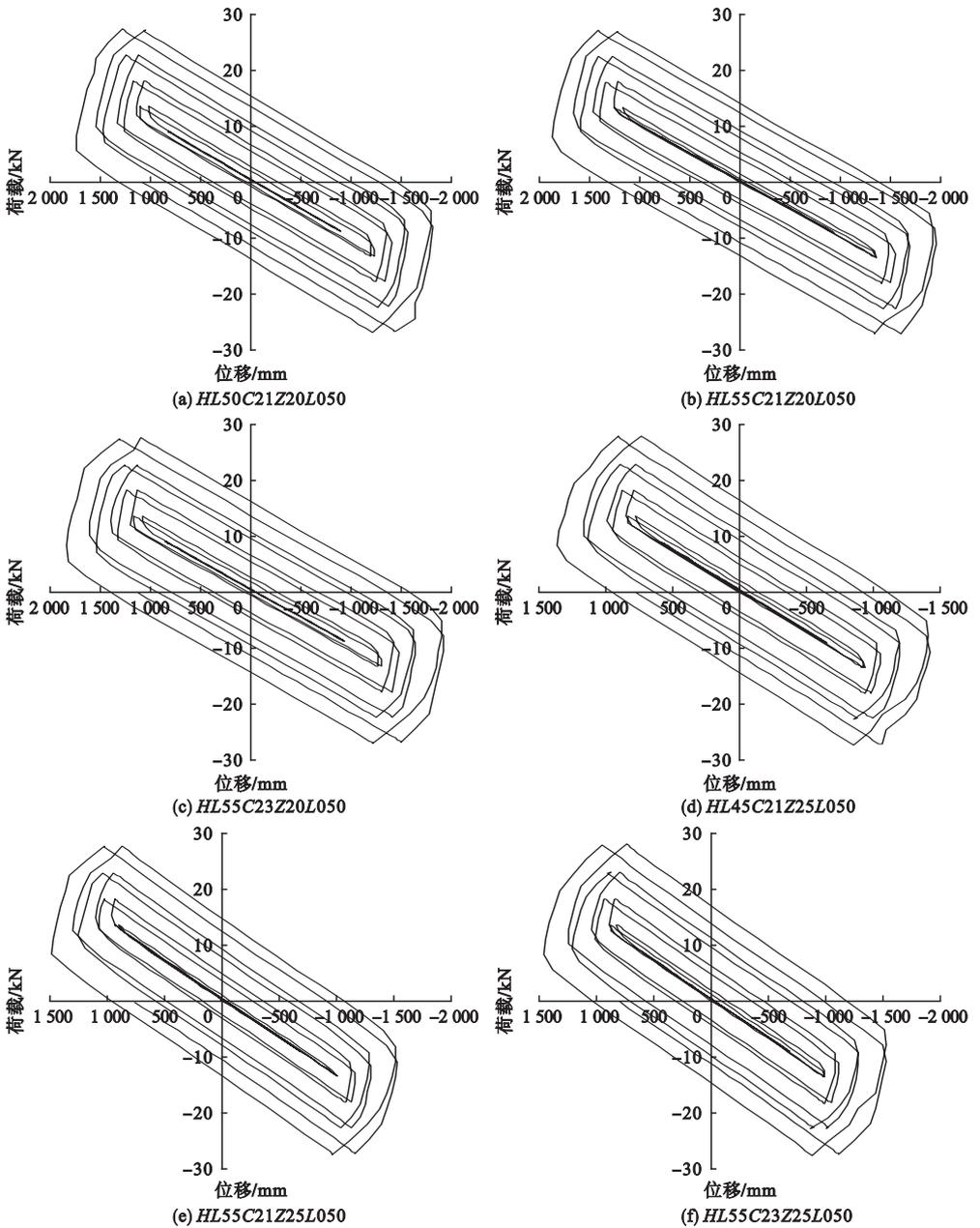


图 4 2B32F 的滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis curves of 2B32F

由滞回曲线可以看出,对于不同参数的钢框架结构,其一层柱顶的滞回曲线都为梭形,且都较为饱满,说明钢框架结构的塑性变形能力很强,具有很好的抗震性能和耗能能力.根据《钢结构设计规范》(GB50017—2003)中规定的结构柱顶水平位移容许值,计算 1B12F 框架的柱顶侧移限值 $x = H/400 = 9 \text{ mm}$, 2B32F 结构 $x = H/400 =$

10.5 mm,对 1B12F 钢框架结构及 2B32F 钢框架支撑结构,在荷载达到一级加载制度的峰值分别为 12 mm 和 14 mm,结构柱顶水平侧移已经超过了规范的位移容许值,不满足规范的要求,需要重新调整构件截面以同时满足承载力和侧移两方面的要求.笔者研究的其他工况均出现此现象,即结构真实承载力水平应该以结构柱顶侧移作为控制依据.

3.2 骨架曲线

依次连接滞回曲线中每个加载制度第一轮的峰值点得到各个框架节点处的骨架曲线

线,1B12F的骨架曲线见图5(a),2B32F的骨架曲线见图5(b).

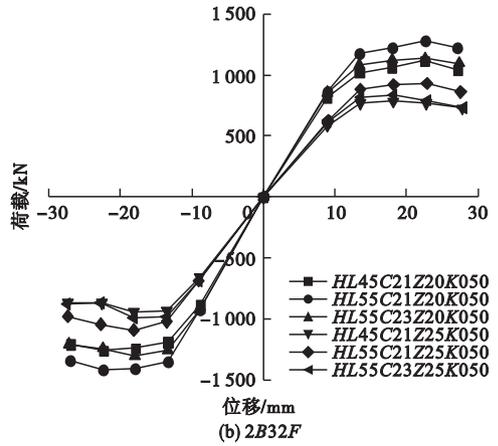
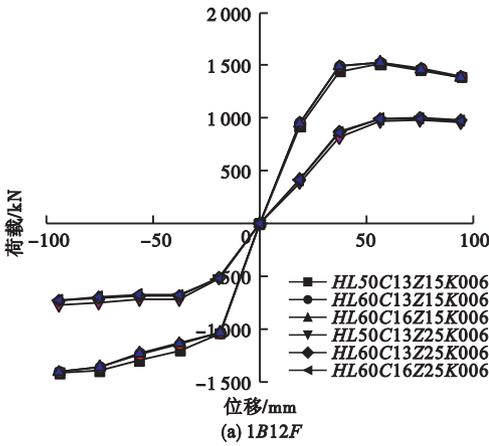


图5 骨架曲线

Fig. 5 Skeleton curves

对比每类框架6种不同工况的骨架曲线可以看出,在弹性阶段,高宽比和二阶效应参数对于框架的变形性能基本无影响;在塑性阶段,高宽比越大,二阶效应参数越小,钢框架的塑性越好.而框架柱长细比对结构的塑性影响很大,柱长细比越大,结构整体的塑性越好.

着加载的反复次数而逐渐减少^[11-12],因此刚度退化是结构抗震性能分析中的一项重要指标.1B12F的刚度退化曲线见图6(a),2B32F的刚度退化曲线见图6(b).从图中可以看出,钢框架结构及钢框架支撑结构的高宽比越大,其割线刚度越大,二阶效应参数越大,割线刚度退化越快.

3.3 刚度退化

当结构进入塑性阶段,结构的刚度会随

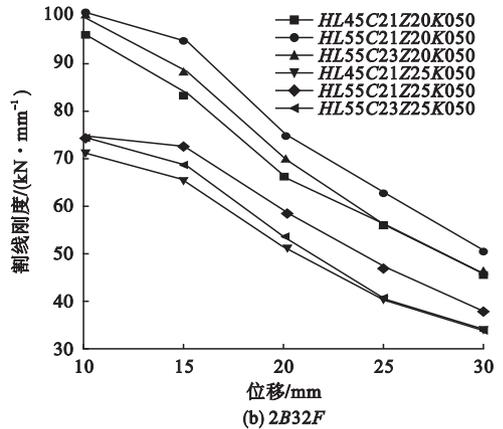
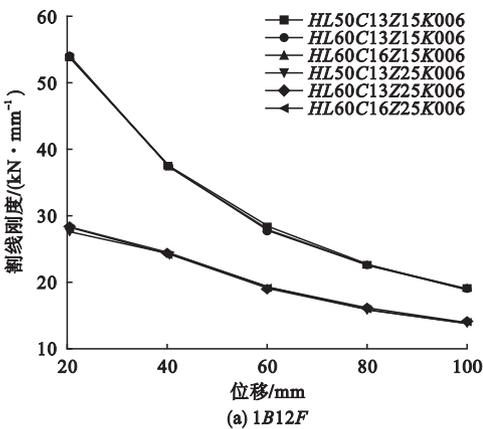


图6 刚度曲线

Fig. 6 Stiffness curves

3.4 延性

钢框架结构及钢框架支撑结构在各种工况下的延性系数见表2.表中 Δ_u 表示塑性极限位移, Δ_e 表示弹性极限位移, μ_s 表示位移

延性系数.由表可以看出,1B12F的延性系数大于4,说明该钢框架结构具有较好的抗震性能.高宽比与二阶效应系数对钢框架结构及钢框架结构的延性影响均不大.

表 2 各工况下延性系数

Table 2 The ductility coefficients under the various work condition

框架	工况	Δ_u	Δ_y	μ_s
1B12F	HL50C13Z15K006	94.21	18.62	5.06
	HL60C13Z15K006	94.24	18.64	5.05
	HL60C16Z15K006	94.25	18.64	5.06
	HL50C13Z25K006	94.13	18.66	5.05
	HL60C13Z25K006	94.15	18.70	5.04
	HL60C16Z25K006	94.16	18.69	5.04
2B32F	HLA5C21Z20K050	27.15	8.893	3.05
	HL55C21Z20K050	27.13	8.925	3.04
	HL55C23Z20K050	27.37	8.925	3.07
	HLA5C21Z25K050	27.76	8.997	3.09
	HL55C21Z25K050	27.61	9.033	3.06
	HL55C23Z25K050	27.94	9.034	3.09

3.5 耗 能

各框架峰值滞回环的等效黏滞阻尼系数 h_e 和能量耗散系数 E 见表 3。对比能量耗散系数可知,框架的高宽比及二阶效应系数都能稍微地提高钢框架结构的耗能能力,提高幅度约为 0.07% ~ 6.5%,但影响不大;对于钢框架支撑结构,高宽比从 4.5 增加到 5.5,钢框架支撑结构的耗能降低 3.1% ~ 7.6%,而二阶效应系数从 0.21 增加 0.23,其耗能增加 11.3% ~ 17.1%。

表 3 各试件峰值荷载能量耗散系数

Table 3 The peak load energy dissipation coefficient of specimens

框架	工况	h_e	E
1B12F	HL50C13Z15K006	0.229	1.435
	HL60C13Z15K006	0.229	1.436
	HL60C16Z15K006	0.229	1.435
	HL50C13Z25K006	0.200	1.255
	HL60C13Z25K006	0.204	1.278
	HL60C16Z25K006	0.204	1.279
2B32F	HLA5C21Z20K050	0.171	1.077
	HL55C21Z20K050	0.159	1.001
	HL55C23Z20K050	0.177	1.115
	HLA5C21Z25K050	0.169	1.064
	HL55C21Z25K050	0.163	1.022
	HL55C23Z25K050	0.187	1.175

4 钢框架结构变形控制设计方法

通过前文对钢框架结构及钢框架支撑结构进行直接分析研究表明,在极限荷载因子加载的荷载效应标准组合作用下,框架的变形验算往往超过规范规定的限值^[13-14],这时结构不满足正常使用极限状态的要求。由此提出对于高柔的钢结构体系,其结构设计应由变形作为控制依据,并给出设计方案的流程图。

目前国内外规范中对于直接分析设计方法的规定,在全过程直接分析时都是基于承载力极限状态进行设计的^[15-16]。图 7 表示结构在低周往复加载下的荷载位移曲线。当基准荷载因子 $S_0 = 1.0 (P_0 = 1.0)$ 时,结构刚进入塑性或仍处于弹性阶段,验算此时结构的层间侧移与柱顶位移往往都满足规范的变形要求;而当荷载因子增加到承载力极限状态下的极限荷载因子 $S_u (P_u)$ 时,此时的柱顶侧移已经超过了我国规范规定的容许值,需要重新设计结构构件的截面尺寸,最终结构的容许荷载由 $S_x (P_x)$ 荷载水平控制。由此提出低周往复荷载下钢结构以水平位移为控制依据的直接分析设计方法。

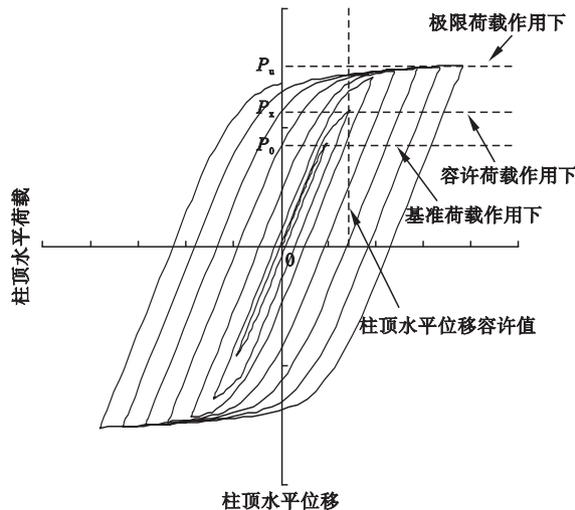


图 7 直接分析法柱顶的荷载 - 位移曲线

Fig. 7 Direct analysis of load-displacement curves of the pillars

现阶段的直接分析与设计方法多数以极限承载力为控制依据来实现的,但对于高柔钢框架结构,其变形验算通常不满足规范要求,需要增大构件截面重新求解极限承载力和变形的验算^[17-18].采用以变形性能为控制的基于正常使用极限状态的直接分析设计法,可以避免因结构变形而重选截面:首先根据研究对象初步确定结构构件尺寸,并初步判别是否适宜采用基于变形性能的直接设计方法;在荷载效应标准组合下对结构进行直接分析,研究结构的变形性能;当所有结构和构件的变形性能均满足规范限值要求时,确定此时结构的容许荷载因子;在容许荷载因子下将荷载效应基本组合施加在结构上,若此时结构承载力满足要求,则结构最终的容许承载力就是此时荷载因子的基本组合,具体流程图见图8.

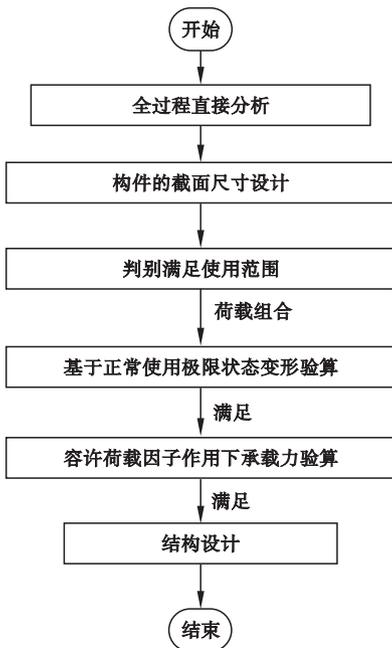


图8 流程图

Fig. 8 The flow chart

通过对大量多高层钢结构的研究表明^[19],大部分的钢结构均适合采用基于变形性能的直接设计方法,对于高柔钢结构,建议采用基于变形性能的实用直接设计方法来提高设计效率^[20].

通过对1B12F、2B32F钢结构体系进行大量的参数设计与低周往复荷载作用下的滞回性能研究,分析比较框架的高宽比、二阶效应系数对框架变形的影响,发现对于钢框架结构以及弱支撑的钢框架支撑结构,在低周往复荷载作用下刚度退化迅速,由于其侧向刚度较低,框架的侧移超过了正常使用极限状态的容许位移,因此对于高柔的钢框架结构以及具有弱支撑的钢框架支撑结构,其抗震设计应该由位移作为控制标准.

5 结论

(1)特征值屈曲分析可以预测理想弹性结构的理论屈曲荷载,也可以作为非线性屈曲分析的初步评估,其屈曲模态的形状可以作为非线性屈曲分析的初始几何缺陷的添加方式.

(2)钢框架结构具有较好的塑性,在地震荷载中可以大量的消耗地震能量,但由于其侧向刚度较低,框架的侧移超过了正常使用极限状态的容许位移,因此此类钢结构的真实荷载水平由柱顶侧移作为控制标准.

(3)钢框架的高宽比与二阶效应系数对钢框架的耗能性能影响不大,但二阶效应系数对钢框架支撑结构的耗能有较大的影响.

(4)对于高柔的钢框架结构及钢框架支撑结构,变形控制设计方法可以简化设计过程,提高设计效率.

参考文献

- [1] CHEN W F, KIM S E. LRFD Steel design using advanced analysis [M]. New York: CRC Press, 2009.
- [2] CHEN W F, LIU E M. Stability design of steel frames [M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [3] CHEN W F. Advanced analysis in steel frame [M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [4] 张耀平, 易凌. 钢结构高等分析的应用研究 [J]. 山西建筑, 2007, 33(30): 94-95. (ZHANG Yaopin, YI Ling. Steel structure of the application research of higher analysis [J]. Shanxi jianzhu, 2007, 33(30): 94-95.)

- [5] NGUYEN P C, KIM S E. An advanced analysis method for three-dimensional steel frames with semi-rigid connections [J]. Finite elements in analysis and design, 2014, 80: 23 - 32.
- [6] SHAYAN S, RASMUSSEN K J R, ZHANG H. On the modelling of initial geometric imperfections of steel frames in advanced analysis [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 98(5): 167 - 177
- [7] 金路, 张壮南, 王春刚. 基于蒙特卡罗的考虑随机初始缺陷的分析方法[J]. 工程力学学报, 2012(增刊2): 93 - 96.
(JIN Lu, ZHANG Zhuangnan, WANG Chungang. Based on the monte carlo analysis method considering the random initial defects [J]. Journal of engineering mechanics, 2012(S2): 93 - 96.)
- [8] 司汉. 考虑随机初始缺陷的钢框架支撑结构试验研究与有限元分析[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.
(SI Han. Experimental research and finite element analysis on steel braced frame structures with random imperfections [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)
- [9] 金路. 基于变形性能的多高层钢框架结构高等设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
(JIN Lu. Research on deformation performance-based advanced design method for multi-story and high-rise steel frame structures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [10] 张文元. 钢框架规范简化分析方法与精确分析方法的对比研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
(ZHANG Wenyuan. Steel frame standard simplified analysis method and contrast research of accurate analysis method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.)
- [11] 董建莉. 新型延性节点钢框架抗震性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
(DONG Jianli. New type of steel frame ductility node seismic performance research [D]. Tsingdao: Tsingdao University of Technology, 2016.)
- [12] 许峰. 利用柱腹板屈曲后强度钢框架抗震性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
(XU Feng. Study on the anti-seismic property of steel frame using post-buckling strength of column web [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.)
- [13] CHEN Zongping, ZHOU Chunheng. Investigation on damage mechanism and rigidity degeneration of steel reinforced recycled concrete column after high temperature [J]. Journal of building structures, 2016, 37(5): 128 - 137.
- [14] LIU Y P, CHAN S L, ZHOU Z H, et al. Second-order analysis and design of wall-framed structure allowing for imperfections [J]. Advanced in structural engineering, 2010, 13(3): 513 - 524.
- [15] KIM S E, PARK M H, CHOI S H. Direct design of three-dimensional frames using practical advanced analysis [J]. Engineering structures, 2009, 23(11): 1491 - 1502.
- [16] American Institute of Steel Construction. Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360 - 05 [S]. Chicago: The American Association of Steel Structure of the Board of Directors, 2008.
- [17] CHEN W F. Implementing advanced analysis for steel frame design [J]. Progress in structural engineering and materials, 2008, 1(3): 323 - 328.
- [18] KING W S, WHITE D W, CHEN W F. On second-order inelastic methods for steel frame design [J]. Journal of structural engineering, 2009, 118: 408 - 428.
- [19] 刘坚. 钢结构高等分析及程序的开发[D]. 广州: 广州大学, 2011.
(LIU Jian. High steel structure analysis and program development [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2011.)
- [20] 金路, 刘丹, 贾连光. 考虑随机缺陷的钢框架-支撑结构试验研究与有限元分析[J]. 工程力学学报, 2016, 33(6): 79 - 84.
(JIN Lu, LIU Dan, JIA Lianguang, et al. Experimental study and finite element analysis on steel braced frame structures considering random imperfections [J]. Journal of engineering mechanics, 2016, 33(6): 79 - 84.)