

文章编号:1673-2049(2011)01-0016-04

# 高温作用下钢交错桁架结构侧移简化模型

陈长坤<sup>1,2</sup>, 张 冬<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 中南大学 防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙 410075)

**摘要:**结合钢交错桁架结构的特点,提出了其在火灾高温作用下的三折线简化模型,并对高温作用下结构的侧移变化特征和高温引起的附加倾覆力矩进行了分析,给出了相应的理论表达式;结合有限元法,通过具体算例对该模型进行了验证。结果表明:侧移简化模型能较好地描述钢交错桁架结构在水平荷载和高温作用下的侧向变形情况;结构侧移和附加倾覆力矩计算方法简便可行,并具有较高的精度。

**关键词:**钢结构;交错桁架;火灾;抗侧刚度;侧移

**中图分类号:**TU998.12

**文献标志码:**A

## Simplified Model for Lateral Displacement of Steel Staggered-truss Structure Under High Temperature

CHEN Chang-kun<sup>1,2</sup>, ZHANG Dong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026,

Anhui, China; 2. Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central

South University, Changsha 410075, Hunan, China)

**Abstract:** A three-segment simplified model was presented for describing the lateral displacement of steel staggered-truss framing system subjected to high temperature according to the structural attributes. Both the structural lateral displacements and the additional overturning moment induced by high temperature were analyzed, and the corresponding calculation methods were proposed. Furthermore, associated with the finite element method, a case was given for clarifying the above method. Results show that the proposed simplified model can describe the lateral deformation of steel staggered-truss structure under lateral force and high temperature well. The calculation methods for the lateral displacement of structure and the additional overturning moment are relative simple, feasible, and have considerable precision.

**Key words:** steel structure; staggered-truss; fire; lateral stiffness; lateral displacement

## 0 引言

钢结构交错桁架体系是 20 世纪 60 年代麻省理工学院在美国钢铁联合企业资助下提出的一种经

济、实用、高效、环保的新型抗侧力结构体系<sup>[1]</sup>。这种体系在国外的工程应用越来越多,但在中国还未得到应用。

各国的研究成果及工程实践表明,钢交错桁架

收稿日期:2010-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(50706059);火灾科学国家重点实验室开放基金项目(HZ2009-KF05)

作者简介:陈长坤(1977-),男,福建福安人,中南大学教授,工学博士,E-mail:cckchen@mail.csu.edu.cn。

结构具有良好的经济性能、抗震抗风性能与抗侧力性能<sup>[2-3]</sup>,但是,其抗火研究尚未形成科学系统的理论体系,这也成为制约其在中国推广应用的一个重要因素<sup>[4-6]</sup>。火灾是钢结构建筑设计需要考虑的一个重要方面,随着温度的升高,受火结构抗侧刚度将会显著衰减,使其良好的抗侧力性能受到破坏。同时,火灾高温将导致结构侧移和重力荷载引起的荷载-位移效应更为突出,而由此产生的附加倾覆力矩将影响结构的整体稳定性,甚至导致整体倒塌,因此,有必要对高温作用下钢交错桁架结构体系的抗侧性能及火灾产生的附加倾覆力矩进行研究,为该体系的抗火设计提供参考。

本文中笔者结合钢交错桁架结构特点,提出了水平荷载作用下该结构在高温作用下的侧移简化分析模型,分析火灾高温下钢交错桁架结构侧向位移的变化特征及产生的附加倾覆力矩,对火灾下该结构的抗侧性能进行研究。

## 1 简化模型

以往研究表明,火灾对钢交错桁架整体结构的影响只限于局部区域,受火弦杆所在桁架层的内力重分布较严重,受火灾影响较大,其余桁架层受影响较小。火灾高温作用下将导致受火楼层抗侧刚度显著减小,而其他楼层抗侧刚度所受影响不大。

钢交错桁架结构体系在常温下受水平荷载作用产生的侧向变形主要来源于桁架弦杆的剪切变形和杆件的轴向变形,变形性能介于框架结构与剪力墙结构之间,整体结构的侧移曲线以剪切变形的特征为主。近似地,将钢交错桁架结构体系在水平荷载作用下的侧移曲线认为随高度呈线性分布。在火灾高温作用下,非受火楼层抗侧刚度基本保持不变,其侧移曲线仍可看作线性分布。仅考虑受火楼层抗侧刚度的减小,钢交错桁架结构侧移曲线只在受火楼层处发生突变,于是,提出一种三折线简化模型来描述不同温度荷载下该结构侧向位移的变化特征,如图 1 所示。

### 1.1 抗侧刚度

令  $\mu_i(T)$  为钢交错桁架结构体系第  $i$  层抗侧刚度折减系数。由于在火灾高温作用过程中,非受火楼层抗侧刚度不随温度变化,于是  $\mu_i(T)$  可表示为

$$\mu_i(T) = \begin{cases} 1.0 & i \neq f \\ \frac{D_{T,f}(T)}{D_{0,f}} & i = f \end{cases} \quad (1)$$

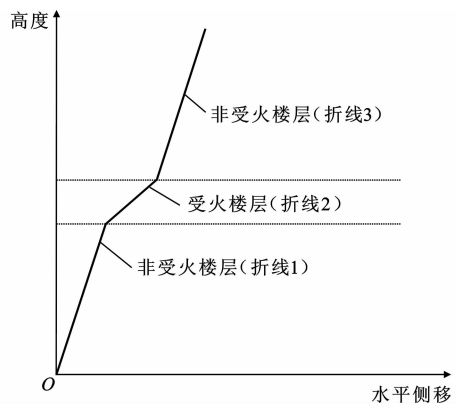


图 1 高温下钢交错桁架结构侧移曲线三折线简化模型

Fig. 1 Three-segment Simplified Model for Lateral Displacement Curve of Steel Staggered-truss Structure Under High Temperature

式中:  $f$  为受火楼层;  $D_{T,f}(T)$  为受火楼层抗侧刚度,与受火温度相关,  $T$  为温度;  $D_{0,f}$  为未受火灾作用前楼层  $f$  的抗侧刚度。

为方便说明,下面将受火楼层  $f$  的抗侧刚度折减系数表示为  $\mu_f(T)$ 。

### 1.2 侧向位移

钢交错桁架结构的层间侧移  $\Delta u_i$  的计算公式为

$$\Delta u_i = \frac{V_i}{D_i} \quad (2)$$

式中:  $V_i$  为第  $i$  层侧向力;  $D_i$  为第  $i$  层抗侧刚度。

钢交错桁架结构受火灾高温作用时,非受火楼层抗侧刚度不随温度变化,其层间侧移与常温下相同,即有  $\Delta u_{\text{fire},i} = \Delta u_{0,i}$ ,其中,  $\Delta u_{\text{fire},i}$  为  $f$  层受火时钢交错桁架结构体系第  $i$  层的层间侧移,  $\Delta u_{0,i}$  为常温下钢交错桁架结构体系第  $i$  层的层间侧移。而受火楼层  $f$  的层间侧移受高温作用产生变化,令受火楼层侧移增量为  $\Delta_{\text{fire},f}$ ,则钢交错桁架结构受火楼层在火灾作用下的层间侧移为  $\Delta u_{\text{fire},f} = \Delta u_{0,f} + \Delta_{\text{fire},f}$ ,  $\Delta_{\text{fire},f}$  与  $\Delta u_{0,f}$  有如下关系

$$\Delta_{\text{fire},f} = \left[ \frac{1}{\mu_f(T)} - 1 \right] \Delta u_{0,f} \quad (3)$$

根据简化模型中的假设,在火灾作用下,钢交错桁架仅有受火楼层的侧向位移产生突变。因此,钢交错桁架结构在火灾作用下第  $j$  层的侧向位移  $u_{\text{fire},j}$  可表示为

$$u_{\text{fire},j} = \begin{cases} \sum_{i=1}^j \Delta u_{0,i} & 0 < j < f \\ \sum_{i=1}^j \Delta u_{0,i} + \Delta_{\text{fire},f} & j \geq f \end{cases} \quad (4)$$

式中: $j$  为楼层。

1.3 倾覆力矩

火灾高温作用下,钢交错桁架由于受火楼层抗侧刚度减小,该楼层层间侧移增大,将导致结构侧移和重力荷载引起的荷载-位移效应更为突出,使得结构倾覆力矩增大,对结构整体的稳定性造成了很大的影响,可能引起结构失稳。在火灾作用下引起的附加倾覆力矩  $M_{\text{fire}}$  由重力荷载的二阶效应产生,可表示为

$$M_{\text{fire}}=G_{\text{U},f}\Delta_{\text{fire},f}\tag{5}$$

式中: $G_{\text{U},f}$  为受火楼层以上的楼层竖向荷载之和。

结合式(3),钢交错桁架结构受高温作用的总倾覆力矩  $M_q$  可表示为

$$M_q=M_0+G_{\text{U},f}\bigg[\frac{1}{\mu_f(T)}-1\bigg]\Delta u_{0,f}\tag{6}$$

式中: $M_0$  为常温下的倾覆力矩。

2 算例分析

参考文献[7]中的典型交错桁架,建立算例分析模型,如图 2 所示。该模型共 12 层,层高 2.9 m,建筑宽度为 19.6 m,平面桁架采用混合桁架的形式,节间距为 2.8 m。弦杆采用 W10×77 的 H 型钢,腹杆采用 HSS10×6×(1/2),各层外柱钢构件均采用 H 型钢截面,相应结构按文献[7]中的典型交错桁架结构选取,如表 1 所示。钢材料为 Q345,高温下钢材料参数按欧洲规范 Eurocode 3<sup>[8]</sup> 选取。结构模型中,弦杆与外柱铰接,腹杆与弦杆铰接,弦杆间刚接,沿房屋顶层横向作用的水平荷载为 100 kN。

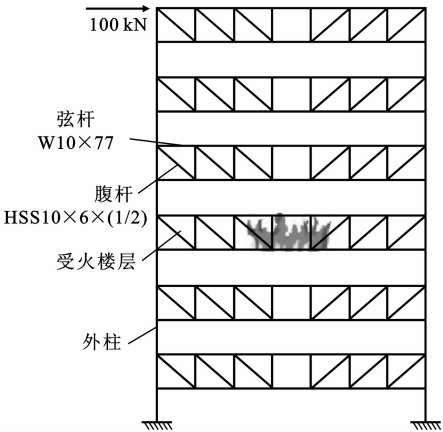


图 2 算例分析模型

Fig. 2 Model of Example Analysis

令第 6 层桁架层受火,该受火模式下,火灾发生在楼层靠近某榀桁架时,桁架上弦杆除与上层楼板

表 1 各层外柱结构

Tab. 1 External Column Structure of Each Storey

外柱结构型号	适用楼层
W12×230	1、2
W12×190	3、4
W12×152	5、6
W12×120	7、8
W12×87	9、10
W12×65	11、12

连接面处未受火灾的高温作用外,其他各面均受到火灾的高温作用,斜腹杆与竖腹杆四面受火,下弦杆受到本层楼板保护未受到火灾的高温作用。假定外柱被墙体保护较好,不受火灾高温影响,数值模拟采用有限元软件 ANSYS 进行计算。

图 3 给出了不同温度下简化模型与数值模拟的钢交错桁架结构楼层侧移增量曲线。由图 3 可以看出,钢交错桁架结构在高温作用下,受火楼层附近结构侧移明显增大,这与本文中提出的三折线简化模型理论相符。采用简化模型与数值模拟得到的不同温度作用引起的钢交错桁架结构楼层侧移增量相差不大。本文中提出的三折线简化模型能够较好地反映钢交错桁架结构在高温作用下的侧移变化特征。

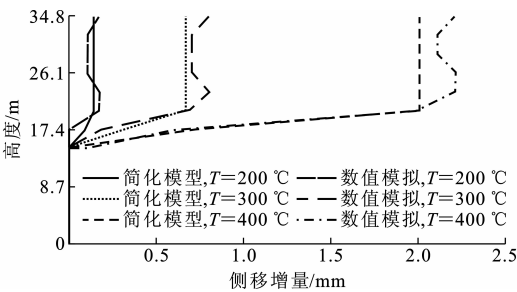


图 3 不同温度下简化模型与数值模拟的楼层侧移增量曲线

Fig. 3 Storey Lateral Displacement Incremental Curves of Simplified Models and Numerical Simulation Under Different Temperatures

表 2 给出了不同温度下采用简化模型与数值模拟分析得到的钢交错桁架结构层间侧移的比较。由表 2 可知,简化模型和数值模拟得到的钢交错桁架结构层间侧移较接近。钢交错桁架结构侧向位移只在受火楼层处产生较大突变。数值模拟分析得到的结果中,钢交错桁架结构呈现剪切变形的特征,在靠近顶层的各楼层层间侧移有所减小,与本文中提出的三折线简化模型有一定差别,但 2 种方法得到的结构层间侧移总体相差不大。

表 2 简化模型与数值模拟的层间侧移比较

Tab.2 Comparisons of Storey Lateral Displacements from Simplified Model and Numerical Simulation

楼层	不同温度(℃)下的层间侧移/mm					
	200		300		400	
	简化模型	数值模拟	简化模型	数值模拟	简化模型	数值模拟
1	2.63	2.62	2.63	2.62	2.63	2.62
2	2.63	2.61	2.63	2.61	2.63	2.61
3	2.63	2.65	2.63	2.65	2.63	2.64
4	2.63	2.60	2.63	2.60	2.63	2.61
5	2.63	2.70	2.63	2.70	2.63	2.80
6	2.62	2.60	2.85	2.80	3.36	3.10
7	2.67	2.70	2.99	3.00	3.92	3.90
8	2.63	2.50	2.63	2.60	2.63	2.70
9	2.63	2.30	2.63	2.30	2.63	2.40
10	2.63	2.30	2.63	2.30	2.63	2.20
11	2.63	1.60	2.63	1.60	2.63	1.60
12	2.63	1.50	2.63	1.50	2.63	1.50

表 3 给出了不同温度下采用简化模型与数值模拟分析得到的顶层侧移与附加倾覆力矩的比较。由表 3 可知,随着温度的升高,钢交错桁架的顶层侧移与附加倾覆力矩均逐渐增大。采用简化模型得到的顶层侧移与数值模拟结果相比略微偏大,但相差仅在 3 mm 左右。采用 2 种方法计算得到的钢交错桁架结构受高温作用后的附加倾覆力矩较为接近。本文中提出的侧移简化模型可以较好地描述水平荷载和火灾高温作用下钢交错桁架结构的变形情况。运用本文中提出的附加倾覆力矩计算方法能较为简便并准确地估计水平荷载作用下钢交错桁架结构在火灾高温作用下的附加倾覆力矩。

表 3 简化模型与数值模拟的顶层侧移与附加倾覆力矩比较

Tab.3 Comparisons of Lateral Displacements for Top Storey and Additional Overturning Moment from Simplified Model and Numerical Simulation

温度/℃	顶层侧移/mm		附加倾覆力矩/(kN·m)	
	简化模型	数值模拟	简化模型	数值模拟
200	31.5	28.7	1.37	1.18
300	32.3	29.3	6.72	6.47
400	33.4	30.7	19.90	18.90

### 3 结 语

(1)提出了钢交错桁架结构在火灾高温作用下侧移曲线的三折线简化模型,该模型能够较好地描述钢交错桁架结构在火灾高温作用下的侧移变化特征。通过分析,给出了该结构在火灾高温下的侧向

位移和附加倾覆力矩的理论表达式,所获得的计算结果具有较高的精度,可用于钢交错桁架结构高温作用下的稳定性计算。

(2)进一步研究应结合工程实例,建立具体的受火楼层抗侧刚度与火灾温度的关系模型,为侧移简化模型的工程应用及结构的稳定性分析的提供理论基础。

#### 参考文献:

#### References:

[1] KIM J K, LEE J H, KIM Y M. Inelastic Behavior of Staggered Truss Systems[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2007, 16(1): 85-105.

[2] 周绪红,莫 涛,刘永健,等. 高层钢结构交错桁架结构的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(5): 86-92. ZHOU Xu-hong, MO Tao, LIU Yong-jian, et al. Experimental Study on High-rise Staggered Truss Steel Structure[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(5): 86-92.

[3] 莫 涛. 钢结构交错桁架体系的弹塑性全过程分析理论与试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005. MO Tao. Elastic-plastic Analysis Theory and Experiment Research on Steel Staggered Truss System[D]. Changsha: Hunan University, 2005.

[4] 李国强,蒋首超,林桂祥. 钢结构抗火计算与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. LI Guo-qiang, JIANG Shou-chao, LIN Gui-xiang. Fire Resistance Calculation and Design for Steel Structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999.

[5] CHEN C K, XIAO R, ZHANG D. 3-D Finite Element Analysis of the Response Behaviors of Steel Staggered-Truss Framing System at Local Elevated Temperatures [C]//LI S C, WANG Y J, AN Y, et al. Progress in Safety Science and Technology. Beijing: Science Press, 2008: 769-773.

[6] 陈长坤,肖 荣,张 鹏. 火灾作用下钢交错桁架结构体系的力学响应分析[J]. 火灾科学, 2008, 17(3): 131-136. CHEN Chang-kun, XIAO Rong, ZHANG Peng. Mechanical Response Analysis of Steel Staggered-truss System Under Fire Conditions[J]. Fire Safety Science, 2008, 17(3): 131-136.

[7] Steel Design Guide Series 14, Staggered Truss Framing System[S].

[8] EN 1993-1-2: 2005, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1. 2: General Rules, Structural Fire Design[S].