

钢交错桁架结构和钢框架结构抗火性能分析与对比

陈长坤^{1,2}, 张威¹, 张冬¹

1. 中南大学土木建筑学院防灾科学与安全技术研究所, 长沙 410075
2. 中国科学技术大学; 火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026

摘要 钢交错桁架结构是在钢框架结构基础上演变而来的一种新型结构体系, 虽然在国外已有许多工程应用实例, 但在中国的应用尚处于起步阶段。为了研究此种结构体系的抗火性能, 为制定相应的防火设计规范提供理论依据, 根据结构设计和传统防火设计理论, 对钢交错桁架结构体系和钢框架结构体系的结构设计方案和防火方案分别进行了研究, 比较了两种结构体系的用钢量和防火涂料用量, 探讨了火灾情况下两种结构体系可能发生的多米诺坍塌效应, 并进行改进设计与分析。结果表明, 在相同极限承载力和耐火极限下, 交错桁架结构和框架结构相比, 虽然能够大大降低用钢量, 但是增加了防火涂料用量, 火灾时更容易发生多米诺坍塌效应, 减弱了其经济优势。传统结构防火设计的拓广应用不能满足其防火要求, 需要制定相应的防火设计规范, 提出适合此种结构的防火设计方法。

关键词 钢交错桁架; 钢框架; 防火涂料; 多米诺坍塌效应

中图分类号 TU998.12

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)18-0068-04

Comparison and Analysis of Fire Resistance Between Steel Staggered-truss System and Steel Frame Structure

CHEN Changkun^{1,2}, ZHANG Wei¹, ZHANG Dong¹

1. Institute of Disaster Prevention Science & Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China
2. The State Key Laboratory of Fire Science; University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract The Steel Staggered-Truss Framing System (SSTFS) is a new type of structural system, which is developed on the basis of the Steel Frame Structure (SFS). Though there are already a large number of examples of engineering applications of SSTFS in the world, in China, its application is still in an initial stage. In order to study its fire resistance performance and to provide a possible theoretical foundation for related codes of fire protection, the structure design strategy and the fire protection strategy of SSTFS and SFS are studied in this paper based on the structure design and traditional fire protection design theories. The amounts of steel and fireproof coatings used are compared and the potential domino collapse effects of two kinds of structures exposed to fire are studied. Results show that with the same ultimate bearing capacity and fire resistance, SSTFS could greatly reduce the amount of steel, as compared to SFS. However, it would need larger amount of fireproof coatings, and the domino collapse is more likely to occur during a fire, which reduces the economic advantages of SSTFS. As the traditional fire protection design can not be directly extended for the fire protection of SSTFS, the corresponding fire protection strategy must be established and a new fire protection design method, suitable for the structure of SSTFS, should be found.

Keywords steel staggered-truss framing system; steel frame structure; fireproof coatings; domino collapse effect

收稿日期: 2010-03-05; 修回日期: 2010-07-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(50706059); 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室开放课题(HZ2009-KF05)

作者简介: 陈长坤, 副教授, 研究方向为钢结构火灾安全, 电子信箱: cckchen@mail.esu.edu.cn

0 引言

钢交错桁架结构是在钢框架结构基础上演变而来的一种新型结构体系(图1),虽然在欧美等发达国家已经有很多应用实例,但是在中国的应用基本处于起步阶段。目前,中国正在积极筹备,制定符合该体系的行业标准,准备大力推广^[1-2]。而钢框架结构是一种较为成熟的钢结构形式,已经得到了广泛的研究和应用。目前国内外学者对以上两种结构体系的受力性能进行了大量对比研究,结果表明钢交错桁架结构在常温下具有较好的抗侧与经济性能。Kim等^[3]对钢交错桁架在常温下的非弹性行为进行了研究,并且比较了钢交错桁架和钢框架的抗震性能。周绪红等^[4]开展了钢交错桁架结构的缩尺模型静力弹性试验研究,对理论结果进行了验证。然而,对于钢结构建筑,火灾下结构的安全性能是需要考虑的一个重要方面^[5-7]。目前国内外的研究对于交错桁架的防火设计尚未给出基于该结构特点的细致的设计说明,只是针对普通钢结构防火设计理论的拓广应用。这种拓广应用并不能够满足钢交错桁架结构的防火设计要求,一旦发生多米诺坍塌效应,将造成结构整体坍塌,后果严重,因此对钢交错桁架结构的防火设计研究是十分有必要的,以便为今后制定相应的防火设计规范提供理论依据^[8-10]。

本研究通过对钢交错桁架结构和钢框架结构的对比研究,比较了具有相同极限承载力的两种结构体系的用钢量和防火涂料用量,探讨了在火灾情况下两种结构体系可能发生的多米诺式坍塌效应,为钢交错桁架结构体系的发展及其抗火设计提供参考。

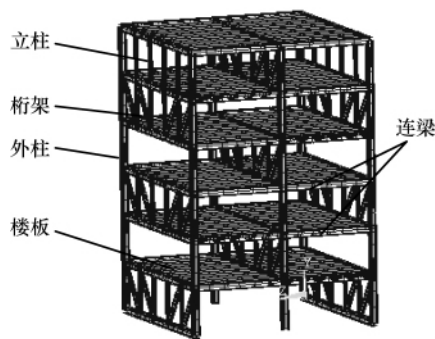


图1 钢交错桁架结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the steel staggered-truss framing structure

1 结构设计和比较

对具有相同极限承载力的两种结构体系进行设计比较,假定梁上极限均布荷载为30kN/m。两种结构的跨度均为19.6m,层高2.8m,钢材均采用Q345钢。

1.1 交错桁架体系

依美国钢结构设计规范“Steel Design Guide Series 14: Staggered Truss Framing System”^[11]推荐的设计方法,将该结构

设计为7节间桁架形式,中间节间为空腹节间,每节节间宽2.8m。上弦杆和竖腹杆受压,下弦杆和斜腹杆受拉。计算分析桁架所受轴力如图2所示。

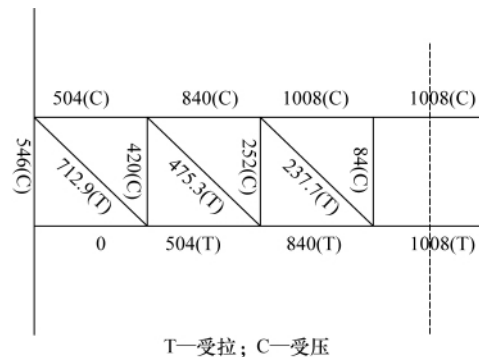


图2 交错桁架各杆件轴力(单位:kN)

Fig. 2 Axial force in members of the steel staggered-truss (unit: kN)

依据图2各杆件轴力分布,桁架各构件截面设计包括:

- ① 斜腹杆截面设计。斜腹杆受拉,不必考虑稳定性问题。由 $P=713\text{kN}$ 可计算得所选截面应满足 $S>23\text{cm}^2$,选择矩形冷弯空心型钢,截面尺寸 $200\text{mm}\times 150\text{mm}\times 4.0\text{mm}$ 。
- ② 竖腹杆截面设计。竖腹杆受压,需考虑稳定性,由 $P=546\text{kN}$ 可知所选截面应满足 $\Phi\cdot S\cdot f_d>546\text{kN}$,选择矩形冷弯空心型钢,截面尺寸 $250\text{mm}\times 150\text{mm}\times 4.0\text{mm}$ 。 Φ 为稳定系数, S 为截面面积, f_d 为常温下梁的设计强度(取 310N/mm^2)。
- ③ 弦杆截面设计。上弦杆受压,下弦杆受拉,所以弦杆截面的选择也需考虑稳定性。由 $P=1008\text{kN}$ 得所选截面应满足 $\Phi\cdot S\cdot f_d>1008\text{kN}$,选择H型钢,截面尺寸 $200\text{mm}\times 200\text{mm}\times 8\text{mm}\times 12\text{mm}$ 。

根据以上设计,单层桁架总用钢量为3027.6kg。

1.2 钢框架结构体系

为获取与交错桁架相同的跨度空间,将钢框架结构的跨度选为19.6m,中间不设其他柱支撑。经计算可得钢框架梁最大弯矩为 $9.266\times 10^5\text{N}\cdot\text{m}$,由 $M=W_x\cdot f_d$ 可得 $W_x=2989\text{cm}^3$,选择截面为H型钢,截面尺寸 $400\text{mm}\times 400\text{mm}\times 13\text{mm}\times 21\text{mm}$ 。单层钢梁(与交错桁架相对应,应含上、下两根钢梁)总用钢量为6742.4kg。结构如图3和图4所示。

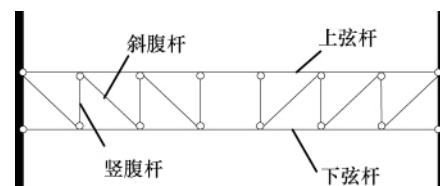


图3 交错桁架结构体系

Fig. 3 Steel staggered-truss framing system

2 抗火性能比较

按照传统防火设计方法对两种结构体系进行抗火设计^[12],

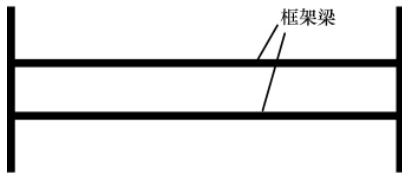


图4 钢框架结构体系

Fig. 4 Steel frame system

要求耐火极限均达到 2h, 对两种结构均使用厚型防火涂料, 其密度为 300kg/m³, 热传导系数 λ_i 为 0.1W/(m·°C)。

2.1 钢框架体系防火设计

1) 梁的相关几何参数计算

框架梁为三面受火, 形状系数 F_i/V=92.01; 截面塑性抵抗矩 W_p=3.741×10⁶mm³。其中, F_i 为单位构件长度上保护层的内表面积, V 为单位长度构件的体积。

2) 梁临界温度计算

$$M_q = \frac{B_n}{8} q l^2 = 720.3 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (1)$$

$$\eta_T \geq \frac{M_q}{W_p \gamma_R f_d} = 0.565 \quad (2)$$

由 η_T=1.24×10⁻⁸T_s³-2.096×10⁻⁵T_s²+9.228×10⁻³T_s-0.2168, 可得框架梁的临界温度 T_d=557°C, q 为荷载, T_s 为梁的温度。

3) 梁的防火保护厚度

$$d_i = \frac{5 \times 10^{-5} \lambda_i}{\left(\frac{T_d - 20}{t} + 0.2 \right)^2 - 0.044} \cdot \frac{F_i}{V} = 14.7 \text{ mm} \quad (3)$$

式中, M_q 为梁上荷载产生的弯矩; B_n 为与梁端部连接有关的参数, 当梁两端铰接时, B_n=1, 当梁两端刚接时, B_n=0.5; l 为梁的跨度; η_T 为高温下钢材的强度折减系数; γ_R 为钢的抗力系数, 近似可取 γ_R=1.1; t 为构件的耐火极限要求, 单位为 s。

此钢框架结构体系设计中, 单层上下梁防火涂料用量共为 341.3kg。

2.2 交错桁架体系防火设计

交错桁架体系上弦杆为三面受火, 竖腹杆和斜腹杆均为四面受火。对上弦杆和腹杆的防火保护应分别考虑。

1) 弦杆防火设计

上弦杆和下弦杆采用相同的防火设计方案, 其计算方法和钢框架结构梁的计算相同, 通过计算, M_q 为 76356N·m, η_T 为 0.419, T_d 为 613°C, 从而得到上弦杆涂料厚度应为 12.8mm。下弦杆和上弦杆采用相同厚度的防火涂料, 则弦杆防火涂料用量为 149.4kg。

2) 腹杆防火设计

按轴心受压(拉)构件计算其所需的防火涂料厚度。竖腹杆所受轴心压力, 压力设计值为 546kN, 稳定系数 Φ=0.84, 竖腹杆的荷载比 R 为

$$R = \frac{N}{\Phi A f_d} = 0.68 \quad (4)$$

从而可得临界温度 T_d=536°C, 防火涂料厚度 d_i 可由式(3)进行计算,

$$d_i = \frac{5 \times 10^{-5} \lambda_i}{\left(\frac{T_d - 20}{t} + 0.2 \right)^2 - 0.044} \cdot \frac{F_i}{V} = 42.8 \text{ mm}$$

斜腹杆受轴心拉力, 与竖腹杆使用相同厚度的防火涂料, 腹杆防火涂料用量为 545.1kg。

结合弦杆与腹杆防火设计分析结果, 交错桁架体系防火涂料总用量为 694.5kg。

3 火灾下结构多米诺坍塌分析与改进

火灾时, 受火楼层因失去承载能力坍塌至下层楼板, 下层楼板则因受火楼层的坍塌使得其承受的荷载超过极限荷载, 失去支撑作用, 由此造成多米诺坍塌效应, 致使结构整体坍塌。“9·11 事件”中美国五角大楼的倒塌正是“多米诺坍塌效应”造成, 火灾下的多米诺坍塌效应危害极其严重, 起火楼层下方的未受火楼层由于上层楼层的坍塌而逐层超载失效, 使得结构整体连锁破坏, 缩短了人员疏散时间, 对消防灭火人员的生命构成严重威胁, 增大了人员伤亡概率^[13-15]。

钢交错桁架结构和钢框架结构在火灾下均可能发生多米诺坍塌效应, 在设计过程中应该考虑避免此种情况的发生。如图 5 所示, 对于交错桁架结构, 从其结构特点可知, 为避免火灾下产生多米诺式坍塌效应, 应使其单层桁架能够承担 3 层楼板的荷载, 即将交错桁架结构的极限承载力提高至原来的 3 倍以上; 对于框架结构, 从其结构特点可知, 为避免火灾下产生多米诺式坍塌效应, 应使其单层楼板能够承担两层楼板的荷载, 即将框架结构的极限承载力提高至原来的 2 倍。

为防止火灾时多米诺式坍塌发生, 有必要对以上两种结构的截面设计进行改进。

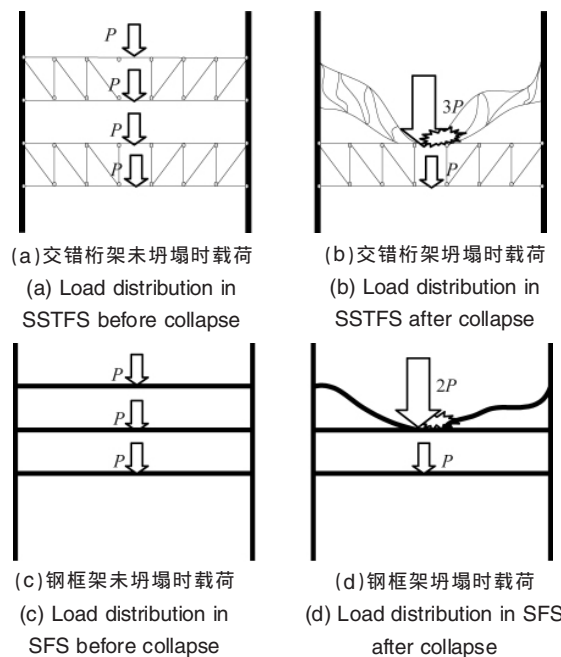


图5 交错桁架和框架结构多米诺坍塌效应示意图

Fig. 5 Schematic diagram of collapse as domino effect for SSTFS and SFS



1) 对于交错桁架结构,应将其设计荷载提升为实际楼层荷载的 3 倍,以上算例即取为 90kN/m,依据前述方法,斜腹杆选择矩形冷弯空心型钢,截面尺寸为 400mm×200mm×8.0mm,竖腹杆选择矩形冷弯空心型钢,截面尺寸为 300mm×200mm×8.0mm,弦杆选择 H 型钢,截面尺寸为 300mm×300mm×10mm×15mm,总用钢量为 6729.5kg。

2) 对于钢框架结构,应将其设计荷载提升为实际楼层荷载的两倍,以上算例即取为 60kN/m,依据前述方法,选择 H 型钢,截面尺寸为 792mm×300mm×14mm×22mm,总用钢量为 7487.2kg。

3) 基于上述分析,对改进后的两种结构重新进行防火设计,耐火极限均为 2h,采用厚型防火涂料,密度为 300kg/m³,热

传导系数为 0.1W/(m·℃)。依据前述方法,可得交错桁架结构所需防火涂料用量为 716kg,钢框架结构所需防火涂料用量为 460.3kg。

4 结果分析

通过比较发现,具有相同楼板荷载和耐火极限的两种钢结构形式,交错桁架结构比钢框架结构用钢量减少了 55%,而防火涂料用量则是钢框架结构的 2 倍,如表 1 所示。由于交错桁架结构的杆件增多,杆件总表面出现多米诺坍塌效应,产生的后果更为严重。使用基于防止火灾下多米诺坍塌效应的设计方法,交错桁架的用钢量仍然比钢框架结构降低了 10%,防火涂料用量则比钢框架结构增加了 56%。

表 1 钢交错桁架结构体系和钢框架结构体系的用钢量及防火涂料用量比较

Table 1 Comparison of the volume of steel and fire protection coatings between SSTFS and SFS

	交错桁架结构	钢框架结构	两种结构比较
传统设计的用钢量/kg	3027.6	6742.4	减少 55%
传统设计的防火涂料用量/kg	694.5	341.3	增加 103%
基于防止多米诺坍塌效应改进设计的用钢量/kg	6729.5	7487.2	减少 10%
基于防止多米诺坍塌效应改进设计的涂料用量/kg	716.0	460.3	增加 56%

注:两种结构的比较以钢框架结构的数据为标准。

Note: The data of SFS is taken as a standard for the comparison.

5 结论

1) 按照传统设计方法,交错桁架结构比钢框架结构用钢量约减少 55%,但防火涂料用量则达到钢框架结构的 2 倍。减弱了交错桁架的经济优势。

2) 火灾下钢交错桁架结构更易产生多米诺坍塌效应,致使结构整体垮塌,造成严重后果,为此需要对现有设计方法进行改进。采用改进的设计方法后,交错桁架的用钢量仍然比钢框架结构降低了 10%,防火涂料用量则比钢框架结构增加了 56%。

可见,普通钢结构防火设计理论的拓广应用并不能满足钢交错桁架结构的防火设计要求,因此需要对钢交错桁架结构的抗火性能及防火方法进行更深入的研究,制定相应的防火设计规范,提出适合此种结构的优化防火设计方案。

参考文献 (References)

[1] Levy M P. Staggered truss system earns an A⁺ source [J]. *Modern Steel Construction*, 2000, 40(11): 28.
 [2] 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): 131-135.
 Chen Changkun, Xiao Rong, Zhang Peng. *Fire Science*, 2008, 17(3): 131-135.
 [3] Kim J, Lee J, Kim Y. Inelastic behavior of staggered truss systems[J]. *Struct Design Tall Spec Build*, 2007(16): 85-105.
 [4] 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 Xuhong, Mo Tao, Liu Yongjian, et al. *Journal of Building Structures*, 2006, 27(5): 86-92.
 [5] Wang Y C. Steel and composite structures: Behaviour and design for fire

safety[M]. London: Spon Press, 2002.
 [6] British Standards Institution. Eurocode 3: Design of steel structures[S]. Britain: British Standards Institution, 2000.
 [7] Chang J, Buchanan A H, Moss P J. Effect of insulation on the fire behaviour of steel floor trusses[J]. *Fire and Materials*, 2005, 29(4): 181-94.
 [8] Buchanan A H. Structural design for fire safety [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
 [9] Chen C K, Yan Y. Numerical studies on the behaviors of staggered-steel truss system under fire conditions [C]. *Progress in Safety Science and Technology*, Part A, Changsha, 2006, 4: 690-694.
 [10] 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]. *Progress in Safety Science and Technology*, Beijing, 2008: 769-773.
 [11] American Institute of Steel Construction. Steel design guide 14: Staggered truss framing system [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2002.
 [12] 李国强,韩林海,楼国彪,等. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
 Li Guoqiang, Han Linhai, Lou Guobiao, et al. Fire protection design of steel structure and steel-concrete composite structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
 [13] NIST NCSTAR 1. Final report on the collapse of world trade center building 7[R]. USA. 2008.
 [14] 许清凤,王孔藩,李向民,等. 世界贸易中心倒塌原因浅析[J]. *钢结构防护*, 2002, 17(3): 54-56.
 Xu Qingfeng, Wang Kongfan, Li Xiangmin, et al. *Steel Construction*, 2002, 17(3): 54-56.
 [15] 李飞,王金凤. 世贸中心倒塌原因探讨 [J]. *山西建筑*, 2009, 35(16): 58-59.
 Li Fei, Wang Jinfeng. *Shanxi Architecture*, 2009, 35(16): 58-59.

(责任编辑 岳臣)

