

文章编号:1673-2049(2006)02-0052-05

影响交错桁架整体延性的结构因素

许红胜¹, 周绪红², 刘永健³

(1. 长沙理工大学 桥梁与结构工程学院, 湖南 长沙 410076; 2. 长安大学 建筑工程学院,
陕西 西安 710061; 3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:针对施工方便、造价低廉的交错桁架结构体系的设计方法、构造细节及防震减灾问题,对影响交错桁架结构体系的整体延性性能的若干结构因素,如桁架不落地、桁架构件、柱的连接形式及建筑高宽比等进行了研究。研究表明:在交错桁架设计中,应采用抗弯矩连接,避免采用底层桁架不落地的交错桁架结构形式。该研究结果及建议对交错桁架结构体系在中国的推广和应用有积极的意义。

关键词:交错桁架; 结构体系; 整体延性; 破坏模式; 抗震设防烈度

中图分类号: TU323.4 **文献标志码:** A

Structural Factors Influenced Global Ductility of Staggered-Truss

XU Hong-sheng¹, ZHOU Xu-hong², LIU Yong-jian³

(1. School of Bridge and Structural Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, Hunan, China; 2. School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: Improved fabricated efficiencies and low mill prices make staggered-truss structure system winning choice for multistorey residential construction. To generalize the use of the system, more works need to be done on design methodology, details of seismic design and seismic design methodology. Authors investigated influence of some factors on global ductility of staggered-truss framing system. Those factors included non-truss on the first floor, the model of connection of elements and ratio of building height and building width. Some suggestions about seismic design of the staggered-truss framing system were offered. It is good to the application and popularization of the staggered-truss framing system in China.

Key words: staggered-truss; structure system; global ductility; failure mode; seismic fortification intensity

0 引言

交错桁架是一种在 20 世纪 60 年代发展起来的结构体系,通常应用于钢结构建筑中。交错桁架结构体系在美国、加拿大等国已经得到了大量的推广应用,但在中国还是一个新生事物,广大的工程和设

计人员对其了解还是十分有限。20 世纪 90 年代,以周绪红教授为首的课题组对交错桁架体系进行了广泛而深入的研究,取得了大量的研究成果^[1-6]。笔者对于一些影响交错桁架体系延性的结构因素^[7-8],如底层抽空、构件连接形式、建筑高宽比等进行分类的研究,以便给出一些对于交错桁架体系抗震设计

收稿日期:2006-02-07

基金项目:国家自然科学基金项目(50078021);湖南省自然科学基金项目(00JJY2067)

作者简介:许红胜(1974-),男,江苏无锡人,讲师,工学博士,E-mail:hongsheng75@126.com。

有益的建议,希望给交错桁架体系的工程和设计人员提供一些参考。

1 连接形式

对于钢结构体系而言,构件的连接处理都对结构体系的性能有着重要的影响^[9-10];对于结构的延性而言,连接的处理更是一个重要的影响因素。笔者主要对混合桁架体系的弦杆、腹杆的连接方式是否给钢结构体系的延性带来影响进行深入的研究。

为了能够给工程实际设计提供有益的帮助,严格按照实际工程要求进行结构计算和设计给出设计算例(图 1、2):住宅楼 18 层,层高 2.7 m,楼面活荷载 2 kPa,屋面活荷载 1.5 kPa,建筑主体长 43.2 m,宽 15 m,高 48.6 m,场地土类别Ⅲ类,采用桩筏基础。基本风压 0.35 kPa,基本雪压 0.35 kPa,不考虑积灰荷载,抗震设防烈度 7 度,0.10g 的设计基本地震加速度,地面粗糙度为 B 类,主体构件钢材选用 Q345b。

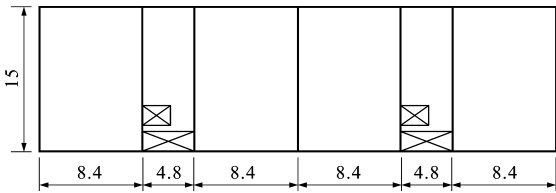


图 1 18 层住宅楼结构平面布置(单位:m)
Fig. 1 Structural Plane Layout of 18-Storey Residential Building(Unit:m)

考虑到模型的简便性,只采用理想铰接和理想刚接两种连接形式进行分析比较。考虑到对比性的要求,以该住宅楼设计算例的混合桁架体系作为计

算分析模型,将设计算例的混合桁架的弦杆、腹杆连接均考虑为理想刚接的连接形式,以及将弦杆与腹杆连接改为理想铰接,对这两种计算模型进行静力弹塑性分析,给出分析结果比较见表 1、图 3。

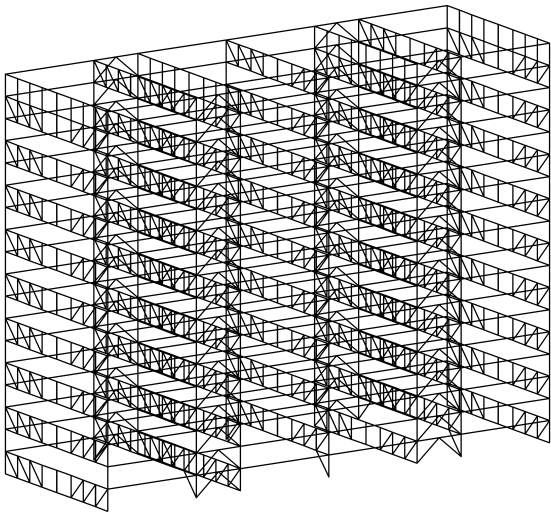


图 2 18 层住宅楼结构布置透视
Fig. 2 Structural Layout Perspective of 18-Storey Residential Building

从表 1、图 3 可以看出,不同的连接模型对于理论分析的结果影响差别是较为显著的,采用理想铰接的计算模型相对理想刚接模型混合交错桁架的刚度变小,顶点最大容许侧向位移变小,名义延性系数降低。从以上分析可知,桁架腹杆与弦杆的理想铰接连接模型显著降低了体系的整体延性能力,因而,在交错桁架的设计中,无论是混合桁架体系还是空腹桁架体系,都希望能够保证桁架腹杆与弦杆可靠地约束连接,确保构件具有足够的转动能力。

表 1 采用理想铰接模型与理想刚接模型的比较
Tab. 1 Comparison of Hinged Connection Model and Rigid Connection Model

连接类型	结构侧向最大周期/s	结构弹性刚度/(kN·m ⁻¹)	假定破坏模式下顶点侧向位移	形成第一个塑性铰时顶点侧向位移/mm	荷载曲线发生明显变形时的顶点侧向位移/mm	名义延性系数
理想铰接模型	1.694	31 852.1	0.71% <i>H</i>	143.90	221.1	1.57
理想刚接模型	1.602	41 866.2	1.03% <i>H</i>	93.04	264.7	1.89

注:*H* 为楼高,后文同。

2 桁架不落地

钢结构交错桁架体系的桁架不落地对建筑设计无疑是理想的,它在底层形成了无内柱、无隔断的开阔的大空间布置;从结构设计的角度看,桁架不落地无疑是一种不利于抗震的设计方案,它形成了一种上刚下柔的结构布局,在强震中容易出现底层发生过大的层间变形而导致结构破坏。为了显现这种影

响,将第 1 节中的住宅楼方案改为桁架不落地的设计(图 4),用静力弹塑性分析进行比较来分析桁架不落地对钢结构交错桁架体系的延性的影响(表 2)。

从表 2 可以看出,桁架不落地导致结构变形能力、抗侧刚度及名义延性系数等所有参数的下降,且在地震作用下一般形成摇摆机构而导致结构整体破坏,这是一种十分不利的破坏模式,因此,应避免将桁架不落地的结构作为钢结构交错桁架体系抗震设

计中的处理方式。

图 5、6 为落地及不落地桁架体系静力弹塑性分析得到的塑性铰分布。从图 6 可以看出,不落地桁架体系由于底层柔弱,发生较大层间变形,最终在柱底形成大量塑性铰,使得结构成为摇摆机构而破坏。

表 2 采用落地和不落地桁架体系对延性影响的比较

Tab. 2 Influence on Ductility Comparison of Truss and Non-truss System on the First Floor

连接类型	结构侧向最大周期/s	结构弹性刚度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	假定破坏模式下顶点侧向位移	形成第一个塑性铰时顶点侧向位移/mm	荷载曲线发生明显变形时的顶点侧向位移/mm	名义延性系数 ^[1]
落地桁架	1.602	41 866.2	1.03% H	93.04	264.7	1.89
不落地桁架	1.618	40 508.2	0.90% H	83.10	248.9	1.81

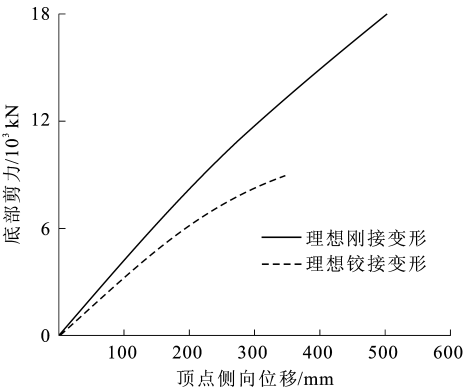
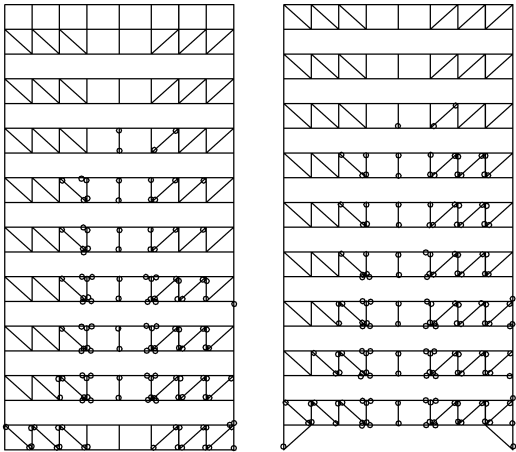


图 3 不同连接形式的变形比较

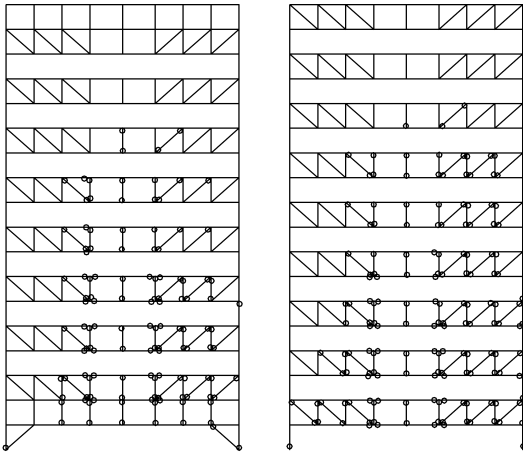
Fig. 3 Deformation Comparison of Different Connection Forms



(a)交错前榀 (b)交错后榀

图 5 桁架落地的混合交错桁架塑性铰分布

Fig. 5 Plastic Hinges Distribution of Truss on the First Floor Mixed Staggered-Truss



(a)交错前榀 (b)交错后榀

图 6 桁架不落地的混合交错桁架塑性铰分布

Fig. 6 Plastic Hinges Distribution of Non-truss on the First Floor Mixed Staggered-Truss

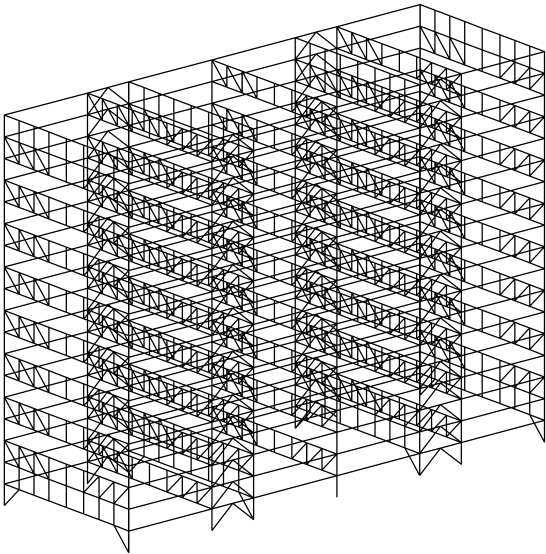


图 4 桁架不落地的住宅楼结构透视

Fig. 4 Structural Perspective of Residential Building of Non-truss on the First Floor

3 高宽比

为了分析高宽比对延性性能的影响,保持住宅楼的混合桁架体系的平面布置,对楼层进行增减,改为 12、18、22、28 层 4 种不同高度的结构,则高宽比分别为 2、3、2、4、5。通过对这 4 种高度结构的静力弹塑性分析得到高宽比对结构整体延性的一般性影

响。表 3 为不同高宽比结构方案的基本设计参数比较。表 4 为不同高宽比结构方案等效成单自由度体系求得的等效延性系数和等效最大位移反应。

在表 4 的计算中,采用了 3 组输入地震波进行位移反应计算,分别为 220 Gal 的 El Centro 南北

波、220 Gal 的 Northridge 波、250 Gal 的 San Fernando 波。表 4 中的最大位移反应基本都是在 250 Gal 的 San Fernando 波输入下的计算结果。

表 3 不同高宽比结构方案的设计参数比较
Tab. 3 Design Parameters Comparison for Structural Schemes of Different Ratios of Building Height and Width

层数(高宽比)	沿横向最大周期/s	弹性刚度/(kN·m ⁻¹)	结构主体用钢量/(kg·m ⁻²)
12 层(2)	1. 047	67 828. 0	33. 8
18 层(3. 2)	1. 602	41 866. 2	33. 2
22 层(4)	1. 884	40 411. 3	36. 8
28 层(5)	2. 360	26 925. 8	41. 3

表 4 不同高宽比结构方案等效成单自由度体系的参数

Tab. 4 Parameters of Equivalent SOD System for Structural Schemes of Different Ratios of Building Height and Width						
层数(高宽比)	结构等效弹性刚度/(kN·m ⁻¹)	等效屈服荷载/kN	α	等效周期/s	等效延性系数	最大位移反应/m
12 层(2)	65 283	9 874	0. 9	1. 28	1. 032	0. 155
18 层(3. 2)	41 150	4 649	0. 9	1. 86	2. 158	0. 244
22 层(4)	39 782	4 808	0. 9	2. 22	2. 187	0. 264
28 层(5)	26 124	4 207	0. 8	2. 84	2. 234	0. 360

注: α 为弹塑性刚度折减系数。

表 5 不同高宽比结构方案的整体延性系数比较

Tab. 5 Global Ductility Coefficient Comparison for Structural Schemes of Different Ratios of Building Height and Width					
层数(高宽比)	最大侧向底部剪力/ 10^3 kN	局部破坏模式下顶点侧向位移	形成第一个塑性铰时顶点侧向位移/mm	产生局部破坏模式时顶点位移/mm	整体延性系数
12 层(2)	19. 31	1. 08% H	62. 1	348. 5	5. 6
18 层(3. 2)	17. 98	1. 03% H	93. 0	500. 6	5. 4
22 层(4)	18. 28	0. 89% H	119. 0	527. 9	4. 4
28 层(5)	12. 57	0. 72% H	142. 6	541. 4	3. 8

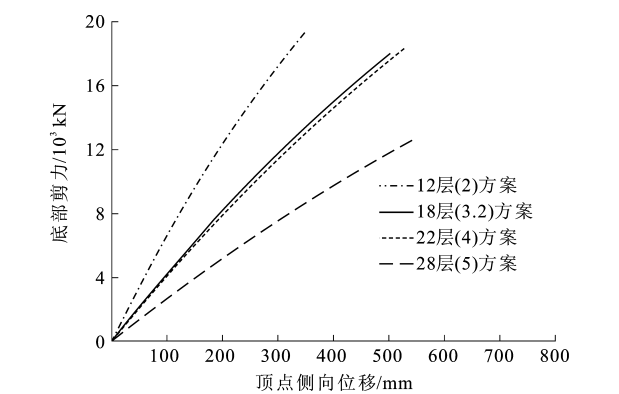


图 7 不同高宽比结构方案的底部剪力-顶点位移关系

Fig. 7 Shearing Force at Bottom and Top Displacement Relation for Structural Schemes of Different Ratios of Building Height and Width

的整体延性系数随着结构高宽比的增加而降低。结合表 3 中给出的用钢量信息,可以认为随着高宽比

下面给出 4 种不同高宽比结构方案的静力弹塑性分析的结果。表 5 为 4 种不同高宽比结构方案在静力弹塑性分析曲线基础上求得的理论整体延性系数比较。图 7 为不同高宽比结构方案的底部剪力-顶点位移变形。

通过分析发现,4 种不同高宽比结构方案的破坏模式都是以形成局部可变体系为主。本文中不再给出结构塑性较发展的示意图。从上面的分析可以看出,钢结构交错桁架体系的高宽比对结构的整体延性系数是有一定影响的。表 4 中的数据表明,在相同地震波输入情况下,结构的等效延性系数随高宽比的增加而提高;表 5 中的比较结果则显示结构

的增加,钢结构交错桁架体系的整体延性系数和经济性都在下降。考虑到在 UBC 97^[12] 给出的中等地震强度地区的结构要求整体延性系数大于 4,结合表 5 中的分析数据,建议在 7 度及 7 度以下抗震设防地区,钢结构交错桁架体系的高宽比宜小于 5;在 8 度抗震设防地区,钢结构交错桁架体系的高宽比宜小于 4。

4 结 语

(1)交错桁架结构体系设计中,应将桁架弦杆与腹杆的连接设计为抗弯矩连接,在节点构造设计上需要保证腹杆的转动能力。

(2)考虑到底层桁架不落地会导致结构变形能力、抗侧刚度及整体延性系数等所有参数的下降,且易形成摇摆机构导致结构倾覆破坏,因此,建议在需要考虑抗震设计的地区避免采用底层桁架不落地的

交错桁架结构形式。

(3)随着高宽比的增加,钢结构交错桁架体系的整体延性系数和经济性都在下降。建议在 7 度及 7 度以下抗震设防地区,钢结构交错桁架体系的高宽比宜小于 5;在 8 度抗震设防地区,钢结构交错桁架体系的高宽比宜小于 4。

参考文献:

References:

- [1] 周绪红. 新型交错桁架结构体系的应用[J]. 钢结构, 2000, 15(2): 16-18.
ZHOU Xu-hong. The Application of New Structure System Staggered-Truss Frame[J]. Steel Construction, 2000, 15(2): 16-18.
- [2] 潘 英, 周绪红. 交错桁架体系的抗震性能动力分析[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 12-16.
PAN Ying, ZHOU Xu-hong. Dynamic Analysis of Anti-seismic Behavior of Staggered-Truss System[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 12-16.
- [3] 周绪红, 周期石, 黄湘湘. 竖向荷载作用下交错桁架结构的内力计算[J]. 工程力学, 2004, 21(3): 25-30.
ZHOU Xu-hong, ZHOU Qi-shi, HUANG Xiang-xiang. Calculation of Internal Forces of Staggered Truss Structure Subjected to Vertical Loads[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(3): 25-30.
- [4] 周绪红, 周期石. 水平荷载作用下交错桁架结构的内力和侧移计算[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(4): 66-71.
ZHOU Xu-hong, ZHOU Qi-shi. Calculation of Internal Forces and Drift of Staggered Truss Structure Under Lateral Loads[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(4): 66-71.
- [5] 许红胜, 周绪红, 刘永健. 交错桁架结构体系设计要点[J]. 建筑结构, 2004, 34(5): 1-7.
XU Hong-sheng, ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian. The Outline Design of Staggered Truss Frame System[J]. Building Structure, 2004, 34(5): 1-7.
- [6] 周绪红, 石 宇, 周天华, 等. 低层冷弯薄壁型钢结构住宅体系[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(2): 1-14.
ZHOU Xu-hong, SHI Yu, ZHOU Tian-hua, et al. Cold-Formed Steel Framing System of Low-Rise Residential Building[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 1-14.
- [7] 宋永发, 宋玉普, 许劲松. 重复荷载作有下无粘结部分预应力高强混凝土梁变形及延性试验研究[J]. 中国公路学报, 2001, 14(3): 44-50.
SONG Yong-fa, SONG Yu-pu, XU Jin-song. Experimental Research on Deformation and Ductility of Unbonded Partially Prestressed High-Strength Concrete (PPC)[J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(3): 44-50.
- [8] 韩林海, 杨有福, 游经团, 等. 圆钢管混凝土压弯构件滞回性能的试验研究与理论分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 51-56.
HAN Lin-hai, YANG You-fu, YOU Jing-tuan, et al. Experimental and Theoretical Studies on the Hysteretic Behavior of Beam-Columns of Concrete-Filled Circular Steel Tubes[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 51-56.
- [9] 狄 谨, 周绪红, 刘永健. 矩形钢管混凝土桁架节点极限承载力研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(3): 62-67.
DI Jin, ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian. Research on the Ultimate Bearing Capacity of Joint in the Concrete Filled Rectangular Steel Tube Truss[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(3): 62-67.
- [10] 季 韬, 郑建岚. 固定角软化桁架模型的新计算方法[J]. 中国公路学报, 2003, 16(1): 47-49.
JI Tao, ZHENG Jian-lan. New Calculation Method of the Fixed Angle Softened Truss Model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(1): 47-49.
- [11] 许红胜. 钢结构交错桁架体系的抗震延性性能分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2003.
XU Hong-sheng. Analysis of Global Ductility of Staggered Truss Steel Frame System in Severe Earthquake[D]. Changsha: Hunan University, 2003.
- [12] UBC 97, Uniform Building Code[S].