

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.012



薄壁轻钢矩管桁架梁的优化

李彦霖¹, 朱兰影², 冯盼盼²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

2. 重庆大学 土木工程学院; 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:薄壁轻钢矩管桁架梁由上、下弦矩管与 Z 撑经自攻螺钉连接而成, 通常会发生上弦矩管局部压屈破坏, 而受拉下弦管起不了控制作用的情况。为达到充分利用材料, 降低工程造价且便于加工的目的, 提出了一种新型的薄壁 U 形下弦轻钢桁架梁。首先, 通过 3 个采用不同形式下弦的桁架梁试件的静力堆载试验, 研究了上下弦截面面积、刚度以及截面形式的不同对整个桁架梁破坏模式、抗弯刚度和极限承载力的影响。然后, 对 6 个不同下弦截面形式、截面面积及开口方向的模型梁进行了有限元分析。试验及分析结果表明, 采用 U 形截面下弦代替矩形截面下弦管可行, 正 U 形截面受力性能优于倒 U 形截面。

关键词:薄壁轻钢; 桁架梁; 优化设计; 试验研究

中图分类号: TU392.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)06-0091-07

Optimization research of light-gauge tube truss beam

Li Yanlin¹, Zhu Lanying², Feng Panpan²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education; School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The light-gauge tube truss beam is formed by connecting the upper chord, the lower chord, and the Z clip through screws. The failure of the tube truss beam is mainly due to the local buckling of the upper chord, not the tensile yielding of the lower chord. In order to make full use of the material, reduce project costs and manufacture the lower chord more easily, a new type of tube truss beam with U-shaped lower chord is proposed in this paper. Firstly, three tube truss beams with different forms of the lower chord are tested, the effect of upper and lower chord section form, sectional area and stiffness on failure mode, bending stiffness and ultimate bearing capacity of the whole truss beam are examined. Secondly, the finite element analyses of six tube truss beams are carried out, considering different section forms, sectional areas and opening directions of the lower chord. Testing and finite element analysis results have

收稿日期: 2016-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(51508050); 国家重点研发计划(2016YFC0701506); 国家级大学生创新训练项目(0200107342)

作者简介: 李彦霖(1995-), 男, 主要从事钢结构及组合结构研究, (E-mail)2713417352@qq.com。

朱兰影(通信作者), 女, 副教授, (E-mail)zhuly@cqu.edu.cn。

Received: 2016-12-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51508050); National Key R & D Program of China(No. 2016YFC0701506); National College Students Innovation Training Program(No. 0200107342)

Author brief: Li Yanlin (1995-), main research interests: steel structure and composite structure, (E-mail)2713417352@qq.com.

Zhu Lanying (corresponding author), associate professor, (E-mail)zhuly@cqu.edu.cn.

verified the feasibility of using the U shaped lower chord, and the normal U shaped section is better than an upside down one.

Keywords: thin-walled light-gauge steel, tube truss beam, optimal design, test research

冷弯薄壁轻钢结构^[1]是钢结构中一种年轻而极具生命力的结构体系,在新建的一般工业、商业性建筑以及旧房增层、改造和活动式可拆迁建筑方面应用较广。常见轻钢结构的楼盖系统主要由 C 型钢楼盖梁或空腹钢桁架梁(如矩管或 C 型钢桁架梁)及楼面板组成。相比于冷弯薄壁 C 型钢楼面梁而言,空腹桁架式楼盖梁更便于室内管线的布置,特别是轻钢矩管桁架梁可以承受更大的竖向荷载,适用于更大跨度的楼盖结构。

近年来,许多学者对冷弯薄壁钢构件的力学性能以及冷弯薄壁钢梁及其组合楼盖的强度及稳定性进行了研究。王春刚等^[2]、Yu 等^[3-4]对冷弯薄壁型钢受弯及轴压构件的承载力进行了试验及理论研究,发现卷边形式是影响构件受弯承载力的重要因素,并提出了轴压简支斜卷边槽钢柱承载力的直接强度法修正计算公式。姚行友等^[5]、Ayhan 等^[6]对控制冷弯薄壁型钢卷边槽形截面构件畸变屈曲的临界条件及构造措施进行了研究,提出了该类型截面构件承载力的计算方法。此外,Szymczak 等^[7]还推导出了计算各种截面构件的局部压屈临界应力的简化方程,但是,却缺少对于构件刚度的考虑。Schafer 等^[8]建议对冷弯薄壁结构进行较精确有限元建模时,宜采用壳单元。郭耀杰等^[9]对采用 G550 MPa 高强钢材制作的 C 型钢桁架梁的研究表明,桁架梁上弦杆受力易出现局部屈曲,整体破坏为脆性破坏。王小平等^[10]则研究了 V 型撑及直撑轻钢矩管桁架梁的破坏模式及影响其承载力、刚度的因素。Lakkavalli 等^[11]、Irwan 等^[12]的试验研究指出了板厚、钉的形式以及连接构造间距对冷弯薄壁型钢-混凝土组合梁极限承载力的影响,周绪红等^[13]通过单调静载试验,分析了冷弯薄壁 C 型钢-OSB 板组合楼盖的破坏机理以及螺钉间距和 OSB 板厚度对楼盖承载力的影响,提出将屈服荷载作为组合楼盖承载力设计的准则,但未和 C 型钢单梁的承载力进行对比。

传统的轻钢矩管桁架梁是由上、下弦矩形镀锌钢管及斜腹杆(Z 撑)通过自攻螺钉组合而成的。现在,还出现了新型的 HRC 铆钉连接方式,研究表明其刚度性能与螺钉连接相似^[14]。当上下弦均采用相同厚度的矩管时,根据已有的试验研究和有限元

分析发现^[15],桁架梁的主要破坏形式之一是上弦矩管的局部屈曲破坏,破坏时下弦矩管的应力仍较小,材料没有得到充分利用。考虑到下弦杆是拉弯构件,为充分利用材料的力学性能,提出用 U 形截面下弦杆代替矩形截面下弦杆的桁架梁设计方案,并通过试验与有限元对比分析轻钢矩管桁架梁和 U 形下弦轻钢桁架梁的破坏模式和荷载-挠度曲线,以及上下弦杆关键部位的应变分布情况,以验证桁架梁采用 U 形截面下弦杆代替矩形截面下弦杆的可行性。

1 试验概况

1.1 试件

设计了 3 个桁架梁的足尺试件进行对比性试验,试件编号为 L1~L3,跨度均为 4 200 mm,上下弦之间的净距为 160 mm。上、下弦杆及 Z 撑连接件均采用 S350 钢材,各桁架梁 Z 撑厚度均为 1.2 mm,其具体的布置方式如图 1 所示。各试件所用钢板的应力-应变曲线均没有明显的屈服平台,故采用残余应变 0.2% 所对应的应力作为其屈服强度。各试件的主要材性指标见表 1。

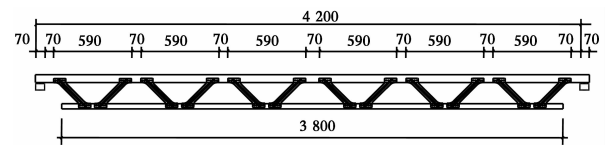


图 1 Z 撑布置图

Fig. 1 Layout of Z clips

表 1 试件主要材料性能

Table 1 Main properties of specimen materials

钢板板厚 t/mm	屈服强度 f_y/MPa	抗拉强度 f_u/MPa	弹性模量 E/MPa	伸长率 $\delta/\%$
1.0	410	518	201 000	27.8
1.2	426	518	202 000	29.0

试件上弦为 60 mm×40 mm 矩形管,L1 的矩管壁厚为 1.0 mm,L2 和 L3 为 1.2 mm。各试件的下弦杆各不相同,L1 的下弦为矩管,L2、L3 的下弦为 U 形,各下弦的具体截面尺寸如图 2 所示。其中,L2 与 L1 下弦杆的截面高度、宽度及厚度均相同,但面积有所减小,L3 和 L1 下弦杆的截面面积相同。

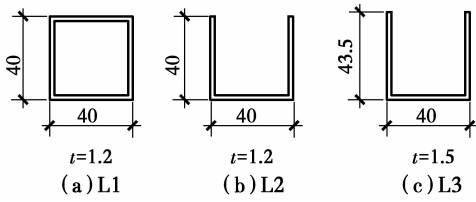


图 2 下弦截面尺寸

Fig. 2 Specific sizes of bottom chords

为了防止试件发生平面外失稳破坏,同时,考虑到施加竖向荷载的需要,试验试件由两片相同的桁架梁及上下弦杆之间的若干横撑构成,两片桁架梁轴线之间的距离为 500 mm,各试件的平面布置如图 3 所示。

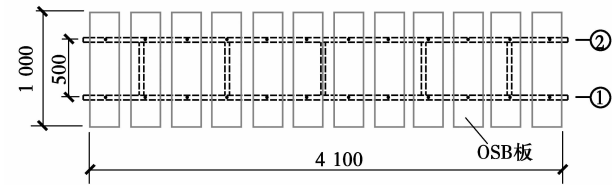


图 3 试件平面布置图

Fig. 3 Floor plan of specimens

1.2 试验装置及加载方案

桁架梁两端分别采用辊轴支座和三角支座以模拟简支支承,梁上铺有小块 OSB 板作为加载媒介,其上施加的均布荷载采用人工堆载的方式,荷载采用标准尺寸的铅块,每块的重量是 50 N。加载时按照梁轴线处、两梁之间、梁外侧的顺序依次加载,每次加载 10 个铅块(500 N),且沿梁长均匀摆放,如图 4 所示。



图 4 试件加载图

Fig. 4 Test set-up

1.3 试件测点布置方案

为了测得桁架梁跨中的挠度,了解上、下弦杆的受力情况,分别在试件的支座及跨中部位布置了百分表,同时,在两片桁架梁的关键部位贴上了应变片,各部位具体的测点布置方案如图 5 所示。

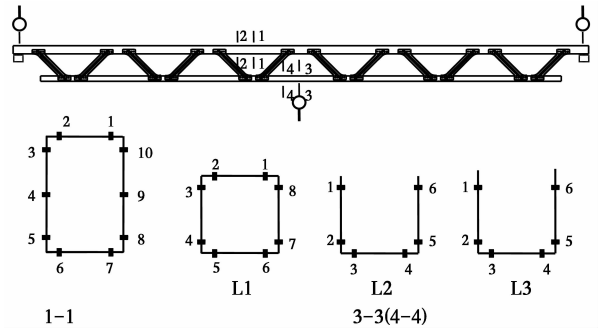


图 5 测点布置方案

Fig. 5 Layout of the surveying points

2 试验结果及比较分析

2.1 试验破坏现象

试件 L1 最终破坏时,由于上弦矩管较薄,发生了上弦矩管局部屈曲;而 L2、L3 下弦杆是开口的 U 形管,其抗扭刚度较封闭矩管小,由于桁架梁跨中部 Z 撑是单边布置的,故发生了平面外失稳, L2 尤为明显。破坏时, L2、L3 的上弦矩管均未出现局部屈曲的现象。各试件的破坏现象如图 6~图 8 所示。



(a)



(b)

图 6 L1 破坏现象

Fig. 6 Failure phenomena of L1



(a)

(b)

图 7 L2 破坏现象

Fig. 7 Failure phenomena of L2

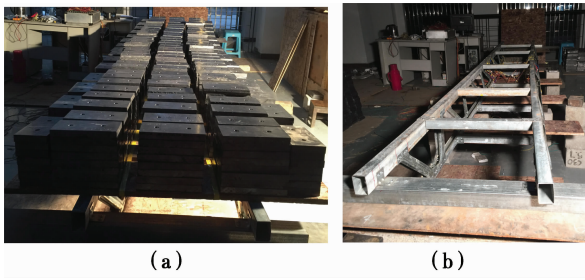


图 8 L3 破坏现象

Fig. 8 Failure phenomena of L3

2.2 试验结果对比

各试件的极限承载力如表 2 所示,荷载-挠度曲线如图 9 所示。

表 2 各试件的极限承载力对比

Table 2 Comparison for ultimate capacity of specimens

试件 编号	正常使用 荷载/kN	变化幅 度/%	破坏荷 载/kN	变化幅 度/%
L1	8.98		18	
L2	9.1	1.3	10.5	-41.7
L3	11.25	25.3	23	27.8

注:表中的正常使用荷载是指构件挠度达到规范规定的 $L/250$ ^[16] 时所对应的荷载值^[8];破坏荷载是指构件整体失稳或发生局部屈曲不能再继续承载时对应的荷载值。

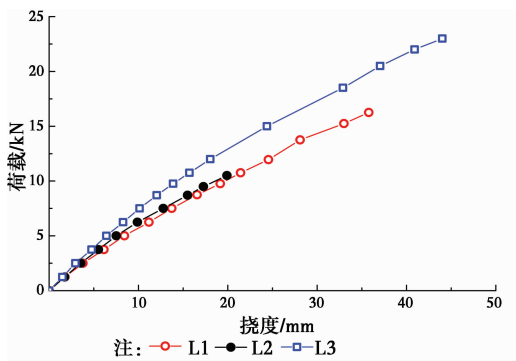


图 9 荷载-挠度曲线

Fig. 9 Load-deflection curve of specimens

从表 2 及图 9 可以看出:

1) L2 相比于 L1,下弦的截面面积减小 24.2%,刚度降低 48%,而上弦截面面积却增大了 19.5%,刚度也增大了 20%,L2 与 L1 达到正常使用极限状态时对应的荷载基本一致,整个桁架梁截面的刚度也接近,说明下弦杆刚度变化对桁架梁抗弯刚度的影响不太大,只要上、下弦杆截面总面积不变,截面整体刚度就不会有较大改变。但是,由于桁架梁 L2 下弦管的面积较小,应力水平较高,试件易过早发生平面外失稳破坏,其破坏时的荷载比矩管桁架梁 L1 减小了 41.7%。

2) L3 相比于 L2,虽然上弦矩管截面尺寸相同,但下弦杆截面面积增大了 20%,刚度增大了 29%,L3 的正常使用荷载相比于 L2 提高了 23.6%,破坏荷载提高了 119%,由此说明下弦杆的截面面积对整个桁架梁的抗弯刚度以及极限承载力也有较大的影响。

各试件关键部位上弦顶面及下弦底面的荷载-应变关系如图 10 所示。从图中可以看出:

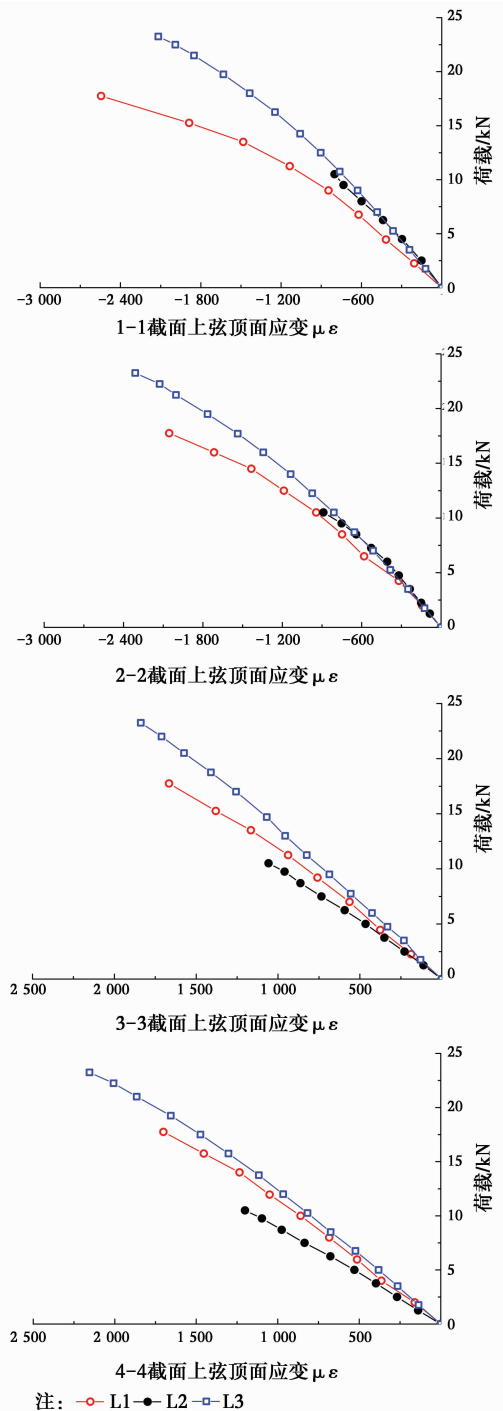


图 10 不同截面的荷载-应变曲线

Fig. 10 Load-deflection curves of different sections

1)各构件达到正常使用极限状态时,上、下弦控制截面处的应变均较小,下弦拉应力仅达到其材料强度的 26%左右,说明材料强度远远没有发挥出来。

2)在相同荷载下,L1跨中截面上弦顶面压应变最大,破坏时接近 2 700;而对于跨中截面下弦底面拉应变,则是 L2 最大,且增长速度较快,容易发生侧向失稳。

3)上弦矩管截面面积相同时,增大下弦杆的截面面积对桁架梁上弦顶面的应力影响很小,但是可以减小下弦杆底面的应力,提高整个桁架梁的极限承载力。

3 U形下弦管轻钢桁架梁受力性能的有限元分析

3.1 试件有限元模拟

为了更好地了解下弦杆形状、截面面积以及 U形截面开口方向的改变对桁架梁受力性能的影响,优化桁架梁设计方案,利用 SAP2000 对 3 个试验梁进行了模型验证分析,并对 6 个不同截面形式的模型梁进行了受力性能的对比分析。

建模时作了如下考虑:

1)桁架梁各部件均简化为杆系结构,上下弦杆的截面尺寸利用 SAP2000 的截面设计器直接绘制,连接件则按槽形截面进行绘制,截面属性由程序自动计算。桁架梁的高度取上下弦截面中心线的距离,即 210 mm。

2)桁架梁两端为简支支座,铰接点在上弦矩管的两端,均布荷载沿上弦通长施加。

3)桁架梁各部件材料的应力-应变关系采用双线性本构模型,其数学表达式为

$$\text{当 } \epsilon \leq \epsilon_y \text{ 时, } \sigma = E\epsilon \quad (1)$$

当 $\epsilon_y < \epsilon \leq \epsilon_u$ 时,

$$\sigma = f_y + E_1(\epsilon - \epsilon_y) \quad (2)$$

E_1 是材料强化段直线的斜率。1.0 mm 和 1.2 mm 钢板的极限应变分别为 14.5%和 13%, E_1 分别为 755 N/mm² 和 719 N/mm²。

4)有限元分析时,考虑到节点部位的半刚性性质,采用非线性弹簧单元模拟 Z 撑和弦管连接的平动滑移和转动半刚性连接。根据文献[17]的试验及理论分析结果,弹簧的平面内线刚度的取值如图 11 (a)、(b)所示,平面外采用刚接。此外,弹簧平面内的转动刚度定义为无穷大,平面外的转动刚度按表 3 取值。

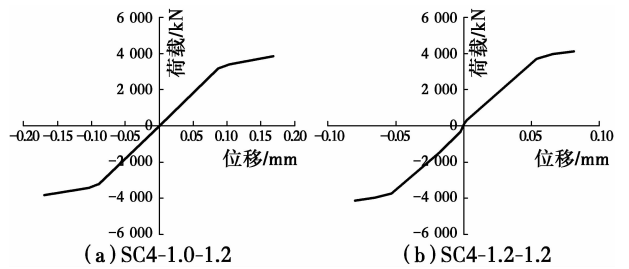


图 11 弹簧平面内线刚度

Fig. 11 Line stiffness in plane of spring

表 3 弹簧平面外转动刚度

Table 3 Rotational stiffness out-plane of spring

节点形式/mm	割线刚度/ (10 ⁵ N · mm)	转动刚度/ (10 ⁸ N · mm · rad ⁻¹)
1.0~1.2	0.27	0.77
1.2~1.2	0.60	1.68

考虑到薄壁轻钢矩管梁在实际工程中主要由正常使用极限状态下的跨中挠度控制设计,且不同上下弦杆厚度的桁架梁破坏模式不尽相同。因此,在用 SAP2000 模拟桁架梁的受力时,其破坏准则难以确定,且 SAP2000 无法模拟出梁的平面外失稳现象,即难以准确获取梁的极限承载力。因此,本文的有限元分析主要针对的是正常使用情况及试验荷载下的应力和挠度对比研究。

笔者在文献[17]中已对该方法的合理性进行了试验验证,为了进一步说明模拟结果的准确性,对 3 个试验梁进行了有限元模拟,结果如图 12 所示。

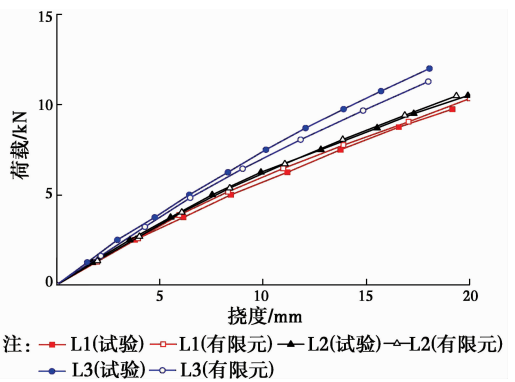


图 12 试件的荷载-挠度曲线对比

Fig. 12 CoMParison for load-deflection curve of specimens

参考《薄壁管桁轻钢建筑技术规程》(DBJ/CT 045—2008)中常用的楼盖做法,当桁架梁间距为 500 mm 时,跨度为 4 200 mm 轻钢桁架梁上作用的荷载标准组合值为 8.4 kN,荷载基本组合值为 10.92 kN。由此,根据《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)^[18]5.4 及 5.5 节关于拉弯构件和压弯构件强度及稳定性的计算公式,求出各梁在荷载标准组合及基本组合值作用下 1-1 及 3-3 截

面的应力比值(σ/f),计算结果见表 4。

表 4 各试件应力比值
Table 4 σ/f of specimens

试件 编号	标准组合下应力比值				基本组合下应力比值			
	上弦		下弦		上弦		下弦	
	试验	模拟	试验	模拟	试验	模拟	试验	模拟
L1	0.66	0.62	0.45	0.44	0.87	0.83	0.60	0.59
L2	0.49	0.51	0.54	0.53	0.64	0.66	0.69	0.69
L3	0.48	0.47	0.44	0.42	0.66	0.63	0.59	0.55

从图 12 及表 4 中可以看出,有限元模拟的试件荷载-挠度关系以及计算出的关键部位的应力比值和试验值比较接近,吻合度好,该有限元模型的精度可以满足进一步分析的需要。

3.2 模型梁有限元分析

进行对比分析的 6 个模型梁的几何参数如表 5 所示,所有梁的跨度均为 4 200 mm,上弦管全部采用矩形截面。ML1 对应于试验梁 L1,ML2 的上弦截面厚度为 1.2 mm,其余同 L1;ML3 对应于 L2,ML5 对应于 L3;ML4 和 ML6,除下弦开口方向不同外,其它参数分别与 ML3 和 ML5 相同。

表 5 各模型梁几何参数

Table 5 Geometric parameters of model girders

试件 编号	截面尺寸(高×宽×厚)		下弦管截 面形状	开口 方向
	上弦管	下弦管		
ML1	40 mm×	40 mm×	矩形	
	60 mm×1.0 mm	40 mm×1.2 mm		
ML2	40 mm×	40 mm×	矩形	
	60 mm×1.2 mm	40 mm×1.2 mm		
ML3	40 mm×	40 mm×	U 形	上
	60 mm×1.2 mm	40 mm×1.2 mm		
ML4	40 mm×	40 mm×	U 形	下
	60 mm×1.2 mm	40 mm×1.2 mm		
ML5	40 mm×	43.5 mm×	U 形	上
	60 mm×1.2 mm	40 mm×1.5 mm		
ML6	40 mm×	43.5 mm×	U 形	下
	60 mm×1.2 mm	40 mm×1.5 mm		

各模型梁有限元分析所得的荷载-挠度曲线见图 13,1-1 及 3-3 截面应力比值见表 6。

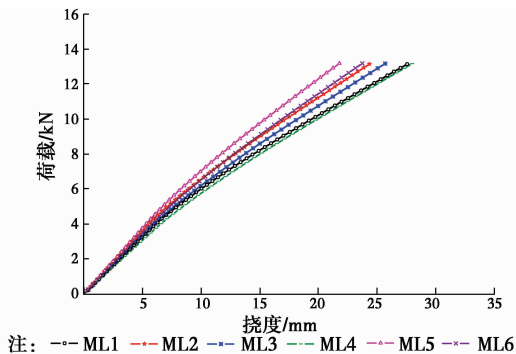


图 13 模型梁的荷载-挠度曲线

Fig. 13 Load-deflection curve of model girders

表 6 各模型梁应力比值

Table 6 σ/f of model girders

试件 编号	正常使用荷载下 跨中挠度/mm	应力比值(σ/f)			
		标准组合		基本组合	
		上弦	下弦	上弦	下弦
ML1	15.4	0.62	0.44	0.83	0.59
ML2	13.7	0.49	0.44	0.66	0.58
ML3	15.0	0.51	0.53	0.66	0.69
ML4	15.8	0.52	0.54	0.70	0.73
ML5	12.4	0.47	0.42	0.63	0.55
ML6	13.5	0.50	0.44	0.67	0.59

从图 13 和表 6 中可以看出:

1)上弦矩管截面厚度的改变对 ML1、ML2 上弦矩管的应力比及跨中挠度的影响较大,但对下弦的应力比影响很小。

2)上开口 U 形截面梁的抗弯刚度高于下开口的梁,应力比值则小于下开口梁,说明在截面尺寸不同的情况下,上开口梁的受力性能更好些。

3)下弦截面面积相同时,上开口 U 形截面梁的抗弯刚度大于矩形截面梁,提高幅度达 10.5%,应力比则略小于矩形截面梁。

4)从表 3 和表 6 可知,L2(ML3)和 L3(ML5),均满足挠度控制要求。虽然 L2 也基本能满足承载能力极限状态要求,但考虑到下弦面积减少太多时,试件容易失稳,结合上述第 3)条,下弦可考虑仅减小 10%面积的上开口 U 形截面,使其抗弯刚度和下弦矩管梁基本相同。

4 结论

1)其他条件都相同的情况下,下弦上开口梁的抗弯刚度强于下开口梁。

2)在截面面积相同的情况下,下弦采用上开口 U 形截面的桁架梁比矩形截面的抗弯刚度更大。

3)上弦管截面面积相同时,减小下弦杆的截面面积对桁架梁上弦顶面的应力影响较小。

综上所述,将普通轻钢桁架梁的下弦矩管改为上开口的 U 形截面下弦杆是可行的。上弦管相同的情况下,抗弯刚度相同的两种桁架梁,U 形下弦杆的截面面积可比矩形的截面面积适当减小(10%)。

参考文献:

- [1] 王元清,石永久,陈宏,等.现代轻钢结构建筑及其在中国的应用[J].建筑结构学报,2002,23(1):2-8.

- WANG Y Q, SHI Y J, CHEN H, et al. Contemporary lightweight steel structure and its application in China [J]. *Journal of Building Structures*, 2002, 23(1): 2-8. (in Chinese)
- [2] 王春刚, 张壮南, 张耀春. 冷弯薄壁斜卷边槽钢轴压构件承载力计算的直接强度法研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(3): 75-82.
- WANG C G, ZHANG Z N, ZHANG Y C. Direct strength method study on bearing capacity calculation of channel columns with inclined simple edge stiffeners under axial compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(3): 75-82. (in Chinese)
- [3] YU C, SCHAFER B W. Distortional buckling tests on cold-formed steel beams [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(4): 515-528.
- [4] YU C, SCHAFER B W. Simulation of cold formed steel beams in local and distortional buckling with applications to the direct strength method [J]. *Journal of Construction Steel Research*, 2007, 63(5): 581-590.
- [5] 姚行友, 李元齐. 冷弯薄壁型钢卷边槽形截面构件畸变屈曲控制研究[J]. *建筑结构学报*, 2014, 35(6): 93-101.
- YAO X Y, LI Y Q. Distortional buckling controlling of cold-formed thin-walled steel members with lipped channel section [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35(6): 93-101. (in Chinese)
- [6] AYHAN D, SCHAFER B W. Cold-formed steel member bending stiffness prediction [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 115: 148-159.
- [7] SZYMCZAK C, KUJAW M. On local buckling of cold-formed channel members [J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 106: 93-101.
- [8] SCHAFER B W, LIA Z, MOEN C D. Computational modeling of cold-formed steel [J]. *Thin-Walled Structures*, 2010, 48(10/11): 752-762.
- [9] 曾德伟, 郭耀杰, 曹珂, 等. 高强冷弯薄壁型钢住宅楼盖梁受力性能研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2013, 46(1): 128-132.
- ZENG D W, GUO Y J, CAO K, et al. Study of force resistance of floor beams in high-strength cold-formed thin-walled steel housing system [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2013, 46(1): 128-132. (in Chinese)
- [10] 王小平, 刘峰, 袁巧云, 等. 新型轻钢龙骨体系析架梁承载力试验研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2006, 28(6): 57-61.
- WANG X P, LIU F, YUAN Q Y, et al. Experimental research on truss beam carrying capacities of new type of light-gauge steel system [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2006, 28(6): 57-61. (in Chinese)
- [11] LAKKAVALLI B S, LIU Y I. Experimental study of composite cold-formed steel C-section floor joists [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2006, 62: 995-1006.
- [12] IRWANJ M, HANIZAH A H, AZMI I. Test of shear transfer enhancement in symmetric cold-formed steel concrete composite beams [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2009, 65: 2087-2098.
- [13] 周绪红, 李喆, 王瑞成, 等. 冷弯薄壁型钢梁-OSB板组合楼盖的受弯承载力研究[J]. *土木工程学报*, 2013, 46(9): 1-11.
- ZHOU X H, LI Z, WANG R C, et al. Study on load-carrying capacity of the cold-formed steel joists-OSB composite floor [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(9): 1-11. (in Chinese)
- [14] MATHIESON C, CLIFTON C, LIM J. Novel pin-jointed connection for cold-formed steel trusses [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 116: 173-182.
- [15] 朱兰影, 王志军, 刘界鹏. 蝶撑桁架梁跨中挠度的计算方法研究[J]. *工程力学*, 2016, 33(5): 184-192.
- ZHU L Y, WANG Z J, LIU J P. Study on the deflection of butterfly-shaped clips truss girders [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(5): 184-192. (in Chinese)
- [16] 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程: JGJ 227—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel buildings: JGJ 227-2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [17] 冯盼盼. 薄壁管桁轻钢楼面梁的简化分析及快速设计 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- FENG P P. Simplified analysis and rapid design of thin-walled tube truss light-gauge floor beam [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [18] 冷弯薄壁型钢结构技术规范: GB 50018—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- Technical code of cold-formed thin-wall steel structures: GB 50018-2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese)