

# 冷弯斜卷边 Z 型连续檩条的抗弯性能 试验及设计方法研究

张磊 童根树 陈强 单银木\*  
(浙江大学 杭州 310027) (浙江杭萧钢构 杭州 310000)

摘要 通过对嵌套搭接连接的斜卷边冷弯 Z 型薄壁钢檩条的连续效果的试验研究,得出了相应的设计方法。  
关键词 Z 型檩条 受弯构件 试验研究

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON BENDING PERFORMANCE OF CONTINUOUS COLD FORMED LIPPED Z-SECTION STEEL PURLIN

Zhang Lei Tong Genshu Chen Qiang  
(Zhejiang University Hangzhou 310027)  
Shan Yinmu  
(Zhejiang Hangxiao Ganggou Hangzhou 310000)

**ABSTRACT** An experimental research on the bending behavior of continuous purlins composed of cold-formed Z-section with 50° lips purlins, under two third points concentrated loads is drafted here. The continuity of purlins is realized by nesting one Z purlin into the other for a short length. The design methods for this kind of continuous purlins were derived from the experiment.

**KEY WORDS** Z-section steel purline bending member experimental research

斜卷边冷弯 Z 型薄壁钢檩条与传统的直角卷边 C 型檩条和直角卷边 Z 型钢檩条相比可以迭起来堆放,不占工厂和工地现场的空间,运输时体积小。最重要的是,斜卷边冷弯 Z 型薄壁钢檩条通过在上下翼缘采用不同宽度的方法,实现了檩条和檩条之间通过嵌套搭接达到多跨檩条连续的目的,从而大大地减小了檩条的下挠变形,使得檩条可以跨越更大的跨度,承担更大的荷重,有更加广阔的使用前景。

目前,国内对斜卷边冷弯 Z 型薄壁钢檩条通过嵌套搭接实现檩条连续的方法还没有进行过研究报道。本文通过对嵌套搭接连接的斜卷边冷弯 Z 型薄壁钢檩条的连续效果的试验研究,提出了这种檩条的设计方法。

## 1 试件和试验装置

### 1.1 试件

本试验共有 Z 型檩条 4 根,试验用的钢材为 Q235 A,镀锌,是国内檩条产品中常用的材料。材料的弹性模量为  $2.06 \times 10^5$  MPa。本试验采用两跨连续梁,试件的长度为 4 m,搭接长度分别为 400 mm 和 800 mm,实际单跨跨度为 3 720 mm 和 3 520 mm。截面为 Z150 × 67.5(62.5) × 15 × 2.5,截面以及搭接形式如图 1 所示。

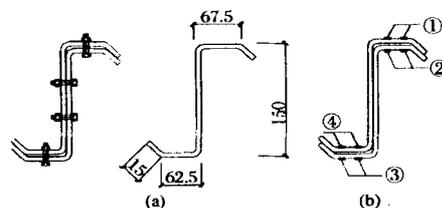


图 1 檩条搭接及测定编号

### 1.2 试验装置

试验时,在边支座和中间支座采用柔性连接,各用两颗 M12 普通螺栓与檩托板固定(图 2),在中间嵌套搭接段的两端,各用 4 颗 M12 螺栓将两根檩条连接固定(腹板两颗,上下翼缘各一颗)。

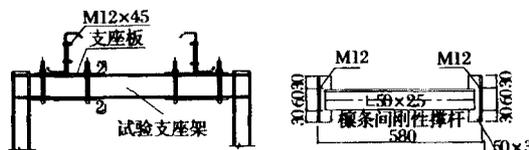


图 2 试验边支座及刚性撑杆的连接

螺栓孔为檩条生产线上自动冲孔的椭圆孔,为

\* 单银木同志为第二作者。

第一作者:张磊 男 1978 年 1 月出生 博士研究生

收稿日期:2002-03-22

安装方便,采用了 $18 \times 22$ 的椭圆孔。为了防止试件的平面外弯扭失稳,在试验中采用两根檩条共同受力,每跨加三道刚性撑杆连接的形式(图2),撑杆位置如图3。

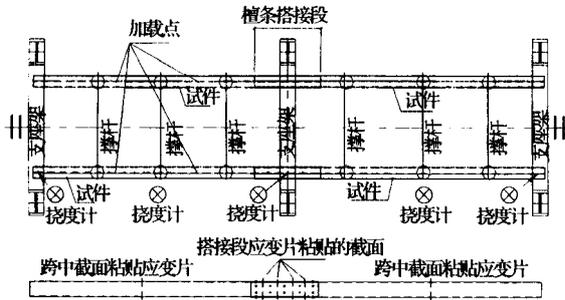


图3 试验装置和加载方案

在正式加载之前,先进行预加荷载,使得试件协同工作,荷载和变形关系趋于稳定。试验采用分级加载,采用在每跨三分点加载,在两平行檩条间使用分配梁,荷载加在分配梁上,由两根平行放置檩条共同承受,以下所有荷载值( $P$ )均指分配梁上的荷载。主要测量各跨跨中挠度和跨中截面的应变。

在本试验中,每个试件的跨中(或接近跨中)测点处的上下翼缘均使用两片应变片,其中一片靠近腹板,另一片靠近翼缘边缘,在跨中共使用了16片应变片。在每个试件的跨中(或接近跨中)和支座处均设挠度计,共10个。试验中的挠度计均使用百分表,应变数据的采集使用YJR-5型静态电阻应变仪。

对支座截面的应变变化情况也进行了测量,由于估计到搭接段打孔较多,会产生应力集中,螺栓连接后,两Z型截面部分接触部分不接触,有局部弯曲,加上Z型截面本身会产生一定程度的扭转,嵌套连接通过接触传递的部分弯矩无法测量等因素,应力的传递不会太均匀而有规律,因此在搭接段对应变进行测量主要掌握应变的量级。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 搭接总长度为800 mm(单边400 mm)时的试验

此时,檩条的实际单跨为3520 mm。

#### 2.1.1 应变测试结果

如前所述,由于搭接处应变传递不规律,我们主要关心跨中的应变。由于两边支座为简支,我们可以根据跨中应变计算构件上各点的弯矩,弯矩如图4。上述应变测试结果表明,由于嵌套面存在一定程度的缝隙以及檩条之间的连接孔是椭圆形,导致嵌套搭接连接的两个Z型钢达不到完全共同工作的效果。本檩条的搭接长度为总跨度的 $800/7040 = 11.36\%$ ,尝试对搭接段截面惯性矩进行拟合,可以看出在搭接长度为800 mm时,在搭接段用1.225倍檩条刚度来拟合,对弯矩有良好的效果。而且,在中支座附近变截面处(400 mm)的弯矩与跨中最大处(1/3跨)的值非常接近。其中跨中弯矩略大于变截面处的弯矩。

表1 跨中应变和相应的弯矩(部分)

kN·m

荷载/N	试验值				计算值(搭接段取1.225I)	
	应变/ $10^{-6}$	跨中弯矩	中支座弯矩	变截面处弯矩	跨中弯矩	中支座弯矩
2481.36	93.8	1.384	-3.054	-1.714	1.387	-3.055
2801.82	106	1.565	-3.446	-1.934	1.566	-3.450

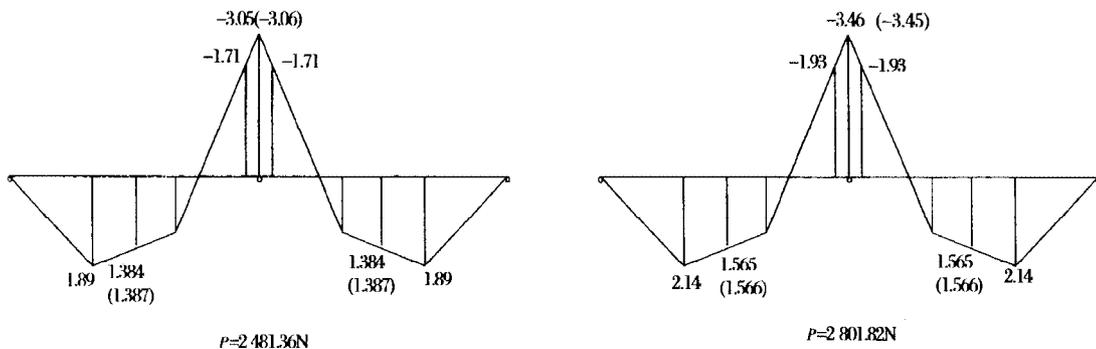


图4 弯矩图(其中括号内为搭接段按1.225 檩条刚度的计算值) kN·m

## 2.1.2 挠度测试结果

在考虑支座沉降和支座处的变形后,在距离边支座 1 960 mm 的测点处的位移及平均值如表 2。其中理论拟合为搭接段按 1.225 倍檩条刚度的理论计算挠度值乘上 1.2 的放大系数所得的挠度。

发现对于挠度,采用 1.2 的放大系数能够比较精确地拟合试验结果,如表 2、图 5。

表 2 近跨中测点处的位移 - 挠度 mm

荷载 / N	测点				试验平均挠度	理论拟合
	1	2	3	4		
490	0.285	0.285	0.285	0.309	0.291	0.295
980	0.575	0.575	0.565	0.618	0.583	0.591
1 470	0.865	0.875	0.865	0.927	0.883	0.886
1 975.68	1.195	1.175	1.205	1.246	1.205	1.191
2 481.36	1.535	1.485	1.545	1.565	1.533	1.496

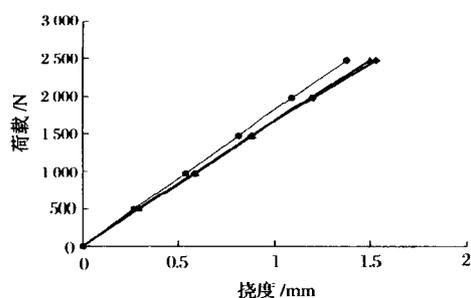


图 5 荷载位移曲线

—◇—试验;—○—理论 I;—△—理论 II  
(理论 I 为按等刚度连续檩条计算;理论 II 为按  
搭接处 1.225 倍檩条刚度计算值的 1.2 倍)

同样跨度的等刚度简支檩条,在同样的荷载( $P = 2\,481.36\text{ N}$ )作用下,跨中相应点挠度为 3.420 mm,可见,嵌套搭接后,檩条的挠度减小到简支檩条的 40%。

一端简支一端固定的檩条在同样荷载的作用下,跨中相应点的挠度为 1.332 mm,试验值为 1.536 mm,可见嵌套搭接后,檩条的刚度更接近于中间支座完全连续或固定的情况。

对于搭接部分的应变片读数的处理和解释存在一定的难度,因为:

- ① 搭接段打孔较多,会产生应力集中;
- ② 螺栓连接后,两 Z 型截面部分接触部分不接触,有局部弯曲;
- ③ Z 型截面本身会产生一定程度的自由扭转和翘曲扭转;
- ④ 即使没有螺栓,通过嵌套连接也能够传递部分弯矩,这种通过接触传递的弯矩大小到底有多大,是无法测量的。

因此在搭接区段应力的传递不会太均匀而有规

律,因此在搭接段对应变进行测量主要掌握应变的量级,对弯矩的传递有一个大概的了解。

对测得的应变进行整理(表 3),我们得到离支座 300 mm 的截面上的测点在荷载为 2 481.36 N 时的读数整理出来的弯矩。截面编号如图 1b 所示。按照跨中截面应变推算出来的在搭接区段内测点截面 1、2、3、4 上的弯矩为 2.049 kN·m。因此可知:

(1) 在单个的 Z 型檩条上弯矩基本等于根据跨中弯矩推算出来的总弯矩,两者之差 4.98%。这种推算方法符合实际情况,具有很好的可信度。由此可以推论通过接触传递的弯矩基本可以忽略。

(2) 搭接段,单个 Z 型钢的弯矩小于跨中弯矩。

表 3 离中间支座 300 mm 处的弯矩 kN·m

截面	测点	测点的平均弯矩	单个 Z 型截	整个截面	四个截面平均弯矩
			面弯矩(四个测点平均)	上的弯矩合计	
1	a	1.232	0.947	2.166	
	b	0.664			
	c	1.247			
	d	1.345			
2	a	1.321	1.270	2.104	
	b	1.218			
	c	0.827			
	d	0.841			
3	a	1.277	1.381	2.197	
	b	1.535			
	c	0.074			
	d	1.557			
4	a	0.118	0.779	2.137	
	b	1.439			
	c	0.568			
	d	2.148			

## 2.2 搭接总长度为 400 mm(单边 200 mm)时的试验

此时,檩条的实际单跨变为 3 720 mm。

### 2.2.1 应变测试结果

同样,由于搭接处应变传递不规律,很难测定,而且从 2.1.1 可知根据跨中弯矩推算出来的构件的各点弯矩具有很强的可信度,所以我们主要关心跨中的应变。由于两边支座为简支,我们可以根据近跨中测点(距边跨 1 760 mm 处)测得的应变计算构件上各点的弯矩,弯矩如图 6 所示。

上述应变测试结果表明,檩条嵌套搭接连接方式,由于存在与 2.1.1 同样的问题,导致嵌套搭接连接达不到完全共同工作的效果,在搭接长度减小到檩条跨度的  $400/7440 = 5.38\%$  时,尝试对搭接段的截面惯性矩进行拟合。可以看出在搭接长度为 400 mm(5.38%)时,在搭接段用 0.8 倍檩条刚度来

表 4 跨中测点应变和相应的弯矩(部分)

荷载 / N	试验值				计算值(搭接段取 0.8 I)	
	应变 / $10^{-6}$	跨中弯矩	中支座弯矩	变截面处弯矩	跨中弯矩	中支座弯矩
1 991.36	89.7	1.259	- 2.421	- 1.892	1.271	- 2.381
2 311.82	105	1.475	- 2.783	- 2.171	1.475	- 2.764

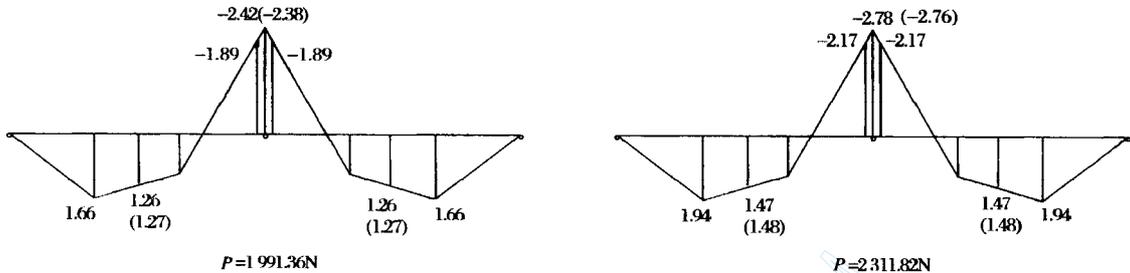


图 6 弯矩图(其中括号内为搭接段按 0.8 檩条刚度的计算值)  $kN \cdot m$

拟合,对弯矩有良好的效果。同样,在中间支座附近(200 mm)处的弯矩与跨中最大处(1/3 跨)的值非常接近,其中变截面处的弯矩略大于跨中最大弯矩。

2.2.2 挠度测试结果

在考虑支座沉降和支座处的变形后,在距离边支座 1 960 mm 的测点处的位移及平均值如表 5。其中理论拟合为搭接段取 0.8 倍檩条刚度的理论计算挠度值乘以 1.12 放大系数所得的挠度值。

发现对于挠度值,采用 1.12 的放大系数能够比较精确地拟合试验结果,如表 5 图 7。

同样跨度的等截面简支檩条,在同样的荷载( $P = 2 311.82 N$ )作用下,跨中测点处挠度为 3.794 mm。可见,嵌套搭接后,檩条的挠度减小到简支檩条的 47.8%。

一端简支一端固定的檩条在同样荷载的作用下,跨中相应点的挠度为 1.526 mm,试验挠度为 1.814 mm,可见嵌套搭接后,檩条的刚度更接近于中间支座完全连续或固定的情况。

3 试验结论、设计建议及经济效益

通过两根 Z 型钢嵌套搭接的技术,在刚度方面,即使采用搭接长度为檩条单跨跨度的 10% 这样一种构造方式,也能够达到接近于等截面连续梁的连续效果,能够有效地减小檩条的变形,与两端简支檩条相比减小挠度 50% 以上。因此在刚度方面,通过嵌套搭接,可以大大增加屋面的刚度,增加檩条的侧向稳定性,增加屋面结构整体性和抗震性能。

等截面连续梁在弯矩的分布方面存在这样一个缺点,即支座弯矩为跨中截面弯矩的两倍,使得支座截面控制了截面的尺寸。如果采用一种柔性的过渡

使支座弯矩降低,跨中弯矩可以相应地提高,使跨中弯矩和支座弯矩接近,反而可以取得更好的经济效益。本次试验表明,嵌套搭接连接的连续檩条,由于采用了椭圆孔的连接方式,能够达到释放部分支座弯矩的结果,可以取得更好的经济效益。

根据试验研究,本文提出如下设计建议:

(1) 连续檩条在中间支座处的搭接总长度可以取单侧跨度的 10% (两侧跨度之和的 5%)。更长的搭接长度对进一步减小檩条的挠度效果不明显。

(2) 连续檩条的变形和弯矩分布可以通过檩条为变截面来计算,当搭接长度为单跨跨度的 10% 时,搭接部分的截面惯性矩取檩条截面本身惯性矩的 0.8 倍进行计算。当搭接长度为单跨跨度的 20% 时,搭接段的截面惯性矩可以取檩条截面本身惯性矩的 1.2 倍进行计算。但是,在验算挠度时,在按上述刚度计算得出挠度的基础上应乘以 1.2 的放大系数(表 2、表 5)。对搭接长度为中间值的情况,可以采用插值的方法确定搭接段的截面惯性矩。

(3) 在获得了各截面的弯矩以后,取搭接开始的变截面处的弯矩和跨中弯矩两者较大值进行檩条强度计算。

根据上述建议,如果采用 10% 单跨跨度的搭接长度,多跨连续檩条单截面的最大弯矩约为同样荷载下简支檩条弯矩的 75%,而跨中弯矩则约为 65%,两者比值为 1.15 比等截面普通连续梁的弯矩分布(比值为 2)更为有利。因此如果强度控制设计的话,理论上讲连续檩条的截面(或钢板厚度)为简支檩条的 75%。假设一四跨连续檩条,每根长度为 6 m,搭接段的长度(为檩条跨度的 10%),再加上每个搭接段外伸的螺栓端距为 70 mm,共 210 mm,可

以节省用钢量约为 20%。扣除因采用连续檩条而增加的螺栓用量和所需要增加的打孔工作量,但又加上斜卷边 Z 型檩条的在运输方便和因用钢量小而减小的运输量以及由此带来的一系列好处,理论上其综合经济效益是十分明显的。

表 5 近跨中测点处的位移 - 挠度 mm

荷载 / N	测点				试验平均挠度	理论拟合
	1	2	3	4		
490	0.368	0.367	0.353	0.348	0.359	0.379
980	0.768	0.781	0.715	0.714	0.745	0.758
1 485.68	1.180	1.210	1.076	1.090	1.141	1.149
1 991.36	1.609	1.642	1.459	1.505	1.554	1.539
2 311.82	1.878	1.929	1.696	1.754	1.814	1.788

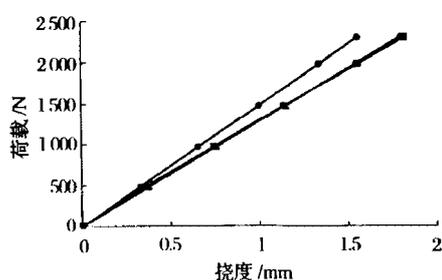


图 7 荷载位移曲线

—■—试验；—●—理论 I；—▲—理论 II  
(理论 I 为按同等刚度连续檩条计算,理论 II 为按搭接处 0.8 檩条刚度计算值的 1.12 倍)

设简支檩条设计的用钢量为 6 kg/m, 檩距 1.5 m, 理论上连续檩条的用钢量可以为 4.8 kg/m, 节省用钢量为 1.2 kg/m, 按照材料费计算的直接节省的造价为:  $3.3 \text{ 元/kg} \times \frac{1.2}{1.5} - 0.34 \text{ 元/m}^2 = 2.3 \text{ 元/m}^2$ 。因此经济效益非常显著。

因为檩条的板厚在国内为 3.0、2.75、2.5、2.3、2.0 mm 等几种规格, 实际节省可以通过:

(1) 变厚度, 3 mm 可以变动到 2.5 mm。

(2) 变规格, 在同样厚度下可以使截面抵抗矩变为原来的 75%。

两种途径能节省用钢量 15%~20%。

当构件的刚度控制檩条的设计时, 采用嵌套搭接的连续檩条的经济效益更为显著。

#### 4 结 语

翼缘不等宽 Z 型冷弯斜卷边檩条是具有比普通连续梁更好的刚度和受力性能, 安装方便, 用钢量省, 经济效益好的钢结构新产品。本文对这种檩条在跨中三分点处承受集中荷载时的受弯性能进行了试验研究, 提出了这种连续檩条的设计方法, 并对由此产生的经济效益进行了分析, 得出了一些有实用价值的结论。

(上接第 47 页)

N/mm, 梁的轴向刚度  $\frac{EA}{l} = 5.67 \times 10^5 \text{ N/mm}$ 。求梁 AB 的温度内力。

解: 由式(2a)得  $Q_a = 0.7815 \times 10^5 \text{ N/mm}$

由式(c)得  $T_2 = 280 \text{ }^\circ\text{C}$ , 由式(a)得  $E_T = 0.9273 E$ , 升温后梁 AB 的轴向刚度  $= 0.9273 \times 5.67 \times 10^5 = 5.2578 \times 10^5 \text{ N/mm}$

$$\begin{aligned} N_2^F &= -1.4 \times 10^{-5} \times 280 \times 5.2578 \times 10^5 \times 6000 \\ &= -12.366345 \times 10^6 \text{ N} \end{aligned}$$

利用对称关系:  $\Delta_{(4)} = -\Delta_{(1)}$ ,  $\Delta_{(3)} = -\Delta_{(2)}$ , 由式(3)、式(4)得

$$\begin{aligned} -5.67 \Delta_{(1)} + 11.7093 \Delta_{(2)} + 5.2578 \Delta_{(2)} &= 123.66345 \\ 6.4515 \Delta_{(1)} - 5.67 \Delta_{(2)} &= 0 \end{aligned}$$

求得  $\Delta_{(1)} = 9.069098 \text{ mm}$  及  $\Delta_{(2)} = 10.319102 \text{ mm}$

进而求得  $X_2 = 10.851154 \times 10^6 \text{ N}$  及  $N_2 = -1.515191 \times 10^6 \text{ N}$

#### 5 结 语

(1) 本文提出的三  $\Delta$  方程法适用于火作用在少个别层的情况; 如果火作用在较多的层时, 建议采用现有分析软件 PK 进行电算。

(2) 本文只介绍了均匀温差  $T_n$  的计算, 对温差  $\Delta T_n = T_1 - T_2$  使梁产生弯曲温度变形和弯曲温度应力, 此时先将梁端固定, 求出梁的固端弯矩:  $M_n^F = \alpha_s \Delta T_n \left(\frac{EI}{h}\right)_n$ , 其中  $I$  及  $h$  分别为梁截面惯性矩及截面高度, 然后用人们熟知的力矩分配法进行分层计算, 也可采用现有分析软件 PK 进行电算。

#### 参考文献

- 1 莫鲁. 钢结构的耐火设计计算. 建筑结构, 1989(6)
- 2 刘开国. 杆系与板系结构的分析方法. 北京: 中国建筑工业出版社, 1980
- 3 刘开国. 超长框架结构的温度变形与温度应力. 建筑结构, 2000(2)
- 4 ECCS. European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structure. Elsevier, Amsterdam, 1983