

文章编号:1673-2049(2019)01-0112-08

# 直立锁边金属屋面系统关键连接节点抗拉承载力试验

于敬海<sup>1,2</sup>, 赵彧洋<sup>1</sup>, 蒋智宇<sup>1</sup>, 李路川<sup>2</sup>, 闫翔宇<sup>2</sup>

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学建筑设计规划研究总院, 天津 300073)

**摘要:**针对直立锁边金属屋面系统的固定支座与檩条连接节点的抗拉承载力计算问题,以檩条翼缘板厚、檩条材质、自攻螺钉直径、自攻螺钉数量以及固定支座底板厚度为变量,进行了 92 个连接节点试件的受拉试验,研究连接节点在竖向拉荷载下的破坏现象及破坏模式。对已有固定支座与檩条连接节点的抗拉承载力计算公式进行了修正,并将抗拉承载力试验值与国内外规范的计算值进行了对比。结果表明:自攻螺钉的抗拉承载力与檩条翼缘板厚、檩条材质的抗拉强度、自攻螺钉直径、螺钉数量基本呈正比关系,固定支座底板厚度大于 4 mm 时,螺钉抗拉承载力与固定支座底板厚度相关性较小;节点存在自攻螺钉被拉出、固定支座底板被拉弯和自攻螺钉被拉出、固定支座底板被拉弯和自攻螺钉在螺帽处被拉断 3 种破坏模式;根据国内外规范公式得到的节点抗拉承载力计算值比试验值偏小,工程应用偏于安全。

**关键词:**直立锁边金属屋面;抗拉承载力;节点试验;自攻螺钉;破坏模式

**中图分类号:**TU395 **文献标志码:**A

## Tension Bearing Capacity of Key Connections of Standing Seam Metal Roofing System

YU Jing-hai<sup>1,2</sup>, ZHAO Yu-yang<sup>1</sup>, JIANG Zhi-yu<sup>1</sup>, LI Lu-chuan<sup>2</sup>, YAN Xiang-yu<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin University Research Institute of Architectural Design & Urban Planning, Tianjin 300073, China)

**Abstract:** In view of the calculation problems of tension bearing capacity on the connection of fixed support and purlin of standing seam metal roofing, taking the purlin flange thickness, purlin material, diameter of self-tapping screw and plate thickness of fixed support as the variables, the tension tests of 92 connection specimens were carried out. Failure phenomena and failure modes of connections under vertical tensile load were investigated. The tension bearing capacity calculation formulas of the connection of fixed bearing and purlin were corrected. The test values of tension bearing capacity were compared with the calculation values of codes at home and abroad. The results indicate that the tension bearing capacity of the self-tapping screw is proportional to the purlin flange thickness, purlin material tension strength, diameter of self-tapping screw and number of screw. When the bottom plate thickness of fixed support is more than 4 mm, the bearing capacity of screw has little correlation with the bottom plate thickness of fixed support. There are three failure modes including the self-tapping screws being pulled out,

收稿日期:2018-04-27

基金项目:天津市科技支撑计划项目(13ZCZDSF01400);天津市建委科技项目(2016-3)

作者简介:于敬海(1965-),男,山东聊城人,研究员,博士研究生导师,工学博士,E-mail:yjh300072@163.com。

the bottom plate of fixed support being bent and self-tapping screws being pulled out, bottom plate of fixed support being bent and self-tapping screws being broken at nut because of pulling. The calculated values of tension bearing capacity of connection at home and abroad are smaller than test values, so the engineering application is safety.

**Key words:** standing seam metal roof; tension bearing capacity; connection test; self-tapping screw; failure mode

# 0 引 言

随着大跨度钢结构建筑的快速发展,直立锁边金属屋面系统越来越广泛地被应用于工业厂房、体育场馆、交通站台等建筑<sup>[1-3]</sup>,但是在金属屋面系统被大量应用的同时,风揭事故也时有发生<sup>[4-7]</sup>。龙文志<sup>[8]</sup>对北京 T3 航站楼 3 次被风掀开的事故进行了原因分析,提出了屋面板强度不足、固定支座与檩条连接强度不足、支座处锁缝分离等是金属屋面系统发生破坏的原因。文献<sup>[9]</sup>进行了直立锁边金属屋面系统整体抗风揭试验和直立锁边金属屋面系统局部节点试验,指出固定支座与屋面板的连接节点是金属屋面系统抗风揭问题的最薄弱环节。王海涛等<sup>[10]</sup>通过对金属屋面的试验研究发现,金属屋面系统的破坏模式中存在自攻螺钉破坏的现象。曾祥新<sup>[11]</sup>对自攻螺钉固定的压型板金属屋面系统抗风承载力进行了分析,并对屋面板的峰值疲劳破坏进行了研究,发现金属屋面系统模型的疲劳危险点与现实中屋面板的破坏情况相近,屋面板的疲劳寿命与跨度、材料强度等因素相关。Baskaran 等<sup>[12]</sup>提出了一种金属屋面抗风设计简化方法,对 3 种常用的直立锁边金属屋面进行了试验研究,分析了对屋面抗风性能的影响因素,并提出了一种屋面抗风设计简化方法。刘军进等<sup>[13]</sup>通过对国内外直立锁边金属屋面抗风揭性能试验进行总结分析,指出了咬合部位是薄弱点。王宏斌等<sup>[14]</sup>研究了直立锁边铝镁锰板屋面系统的支座与屋面板锁边处的抗风揭性能。

目前对于自攻螺钉抗拉承载力研究较少,李元齐等<sup>[15]</sup>对《冷弯薄壁型钢结构技术规范》中自攻螺钉抗拉承载力公式是否适用于 LQ550 高强超薄壁钢板与抗拉脱设计公式是否适用于板厚大于 1.5 mm 的钢板进行了试验研究,建议了适用于 LQ550 钢板的自攻螺钉抗拉承载力折减系数。段圣杰<sup>[16]</sup>研究了筑巢轻钢结构节点的自攻螺钉抗拉性能,发现单颗自攻螺钉抗拉刚度随着螺钉数量的增加而下降。曾滨等<sup>[17]</sup>对于幕墙系统中自攻螺钉与槽型铝

合金型材的抗拔承载力进行了研究,提出了抗拔承载力建议公式。

固定支座与檩条的连接节点作为金属屋面系统的抗风薄弱环节之一,其受力性能严重影响着屋面系统的抗风性能。目前该种连接节点抗拉性能的研究相对较少,已有承载力计算方法还不完善。为此,本文以檩条翼缘板厚、檩条材质、自攻螺钉直径、自攻螺钉数量以及固定支座底板厚度为变量,共设计 92 个节点试件进行了抗拉承载力试验研究,通过对试验现象、破坏特征及试验结果的分析,为合理计算连接节点的抗拉承载力提供依据。

# 1 试验概况

## 1.1 节点试件设计

根据实际工程中常用的檩条材质、固定支座尺寸及自攻螺钉使用情况共设计 5 组试验,每组参数变量设计 4 个相同试件,共计 92 个试件。节点试件设置 T 形连接件固定衬檩,衬檩与 T 形连接件提前打孔,并由螺栓固定。固定支座通过自攻螺钉与几字形衬檩连接。试验试件连接构造如图 1 所示。

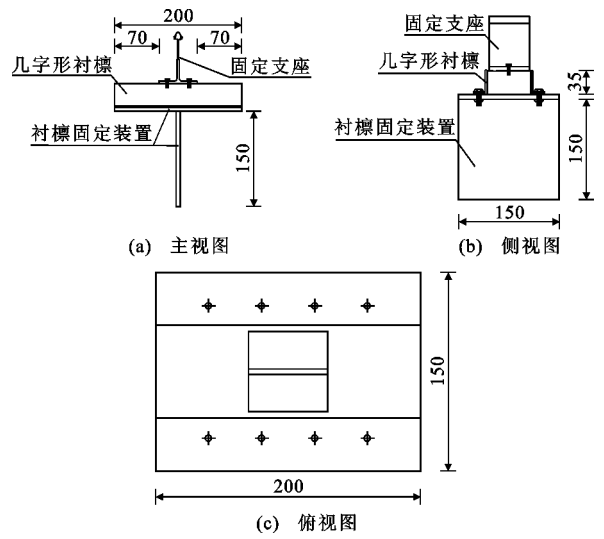


图 1 固定支座与檩条连接节点试件(单位:mm)

**Fig.1 Connection of Fixed Support and Purlin (Unit:mm)**

为对固定支座与檩条的连接节点进行系统研究分析,对檩条翼缘板厚、檩条材质、自攻螺钉直径、自

攻螺钉数量以及固定支座底板厚度进行了变参数试验研究,试件参数设置及分组如表 1 所示。

表 1 试件设计参数

Tab. 1 Design Parameters of Specimens					
试件 组号	檩条翼缘 板厚/mm	檩条 材质	螺钉直径/ mm	螺钉 数量/个	固定支座底 板厚度/mm
A1	2.75	Q345	5.5	2	4.3
A2	1.80	Q345	5.5	2	4.3
A3	2.00	Q345	5.5	2	4.3
A4	2.30	Q345	5.5	2	4.3
A5	2.50	Q345	5.5	2	4.3
A6	3.00	Q345	5.5	2	4.3
B1	2.75	Q345	5.5	2	4.3
B2	2.75	Q345	4.2	2	4.3
B3	2.75	Q345	4.8	2	4.3
B4	2.75	Q345	6.3	2	4.3
C1	2.75	Q345	5.5	2	4.3
C2	2.75	Q345	5.5	4	4.3
C3	2.75	Q345	5.5	6	4.3
D1	2.75	Q345	5.5	2	4.3
D2	2.75	Q345	5.5	2	4.8
D3	2.75	Q345	5.5	2	5.3
D4	2.75	Q345	5.5	2	5.5
E1	2.75	Q235	5.5	2	4.3
E2	1.80	Q235	5.5	2	4.3
E3	2.00	Q235	5.5	2	4.3
E4	2.30	Q235	5.5	2	4.3
E5	2.50	Q235	5.5	2	4.3
E6	3.00	Q235	5.5	2	4.3

试验中每批钢板根据《金属材料拉伸试验:第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)<sup>[18]</sup>制备 3 个试样进行拉伸试验。表 2 为钢板材性试验平均结果。

表 2 钢板材性试验结果

Tab. 2 Test Results of Material Properties of Steel Sheets			
钢材型号	板厚/mm	屈服强度 $f_y$ /MPa	抗拉强度 $f_u$ /MPa
Q235	2.75	294.3	380.4
Q235	1.80	316.7	415.2
Q235	2.00	311.3	389.1
Q235	2.30	285.5	375.9
Q235	2.50	283.8	368.1
Q235	3.00	296.7	406.9
Q345	2.75	365.7	470.6
Q345	1.80	433.4	531.4
Q345	2.00	424.6	510.3
Q345	2.30	364.2	462.8
Q345	2.50	371.8	453.4
Q345	3.00	385.7	480.3

## 1.2 试验加载方案

节点试件竖向抗拉承载力试验通过万能试验机进行加载。试验过程中采用力加载模式,为保证在试验过程中能充分观察试验现象,同时提高试验速度,首先采用已有计算方法对试验各组试件的承载力进行计算,根据各组试件的承载力理论计算值,对不同组试验试件采用不同的加载速率进行加载。其中,承载力计算值小于 8 kN 的试件采用的加载速率为  $20\text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ ,承载力计算值为 8~15 kN 的试件采用的加载速率为  $40\text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 破坏模式

试验过程中,试件共出现 3 种典型破坏模式:自攻螺钉被拉出;固定支座底板被拉弯,自攻螺钉被拉出;固定支座底板被拉弯,自攻螺钉在螺帽处被拉断。试件典型破坏模式如图 2 所示。

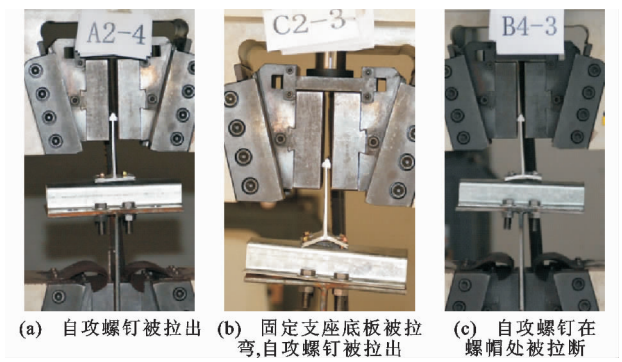


图 2 试件典型破坏模式

Fig. 2 Typical Failure Modes of Specimens

(1)自攻螺钉被拉出:在加载前期,试验无明显现象,当加载到极限承载力的 75%~80%时,试件开始出现“咔咔”响声;当试件达到极限承载力时,发出“嘭”的一声,两侧或者某一侧的自攻螺钉被拉出,试件破坏。

(2)固定支座底板被拉弯,自攻螺钉被拉出:在荷载初期,无明显现象;随着荷载增大,固定支座底板开始被拉弯;随着荷载继续加大,底板拉弯越来越明显,并出现“咔咔”响声;当荷载达到极限承载力时,出现“嘭”的一声,试件破坏,此时底板弯曲严重,试件的螺钉被拉出,螺钉均未拉断。

(3)固定支座底板被拉弯,自攻螺钉在螺帽处被拉断:在荷载前期,无明显现象;随着荷载增大,固定支座底板开始被拉弯;随着荷载继续加大,底板拉弯越来越明显,并出现“咔咔”响声;当荷载达到极限承载力时,发出“嘭”的一声,试件破坏,此时底板弯曲

严重,试件的部分螺钉在螺帽处被拉断。

自攻螺钉数量不足时,固定支座底板不发生弯曲,自攻螺钉突然被拉出。2 种破坏模式出现了固定支座底板被严重拉弯的情况,这是由于底板刚度不足造成的。螺钉在螺帽处被拉断的情况均出现在固定支座严重弯曲的情况下,此时螺钉既受拉力作用,又受到底板变形引起的撬力作用,在双重受力作用下,螺帽被拉断。

从试件破坏模式可以发现,T 形固定支座承载力相对较大,试验中未出现螺帽从固定支座中拉脱的破坏模式。C 组采用 6 个自攻螺钉的 4 个相同试件中,C3-4 试件在固定支座立板处被拉断,如图 3 所示,其余 3 个试件为螺钉被拉出破坏模式。

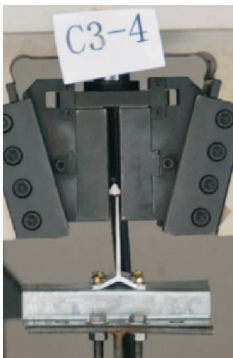


图 3 固定支座立板拉断破坏

Fig. 3 Breaking Failure of Fixed Support Plate

因此,对于直立锁边金属屋面固定支座节点计算,应进行螺钉抗拉承载力计算及固定支座底板抗拉计算。为了防止固定支座底板被严重拉弯,螺钉在螺帽处被拉断的情况,应对固定支座底板的刚度进行验算,但目前相关规范中计算方法均未涉及,应补充相关验算。

## 2.2 试验结果分析

### 2.2.1 檩条翼缘板厚对节点承载力的影响

由表 1 中 A(Q345),E(Q235)两组试验数据得出了节点承载力与檩条翼缘板厚关系曲线,如图 4 所示。从图 4 可以看出,不同檩条材质下,试件的节点承载力与檩条翼缘板厚基本呈正比关系。对于 Q235 材质的檩条,当翼缘板厚从 1.8 mm 增加到 3.0 mm 时,节点承载力从 5.95 kN 增加到了 12.23 kN;对于 Q345 材质的檩条,当翼缘板厚从 1.8 mm 增加到 3.0 mm 时,节点承载力从 8.37 kN 增加到了 14.78 kN。

### 2.2.2 檩条材质对节点承载力的影响

从图 4 还可以看出:节点承载力与檩条材质有关,檩条材料的抗拉强度越高,节点承载力越大。当

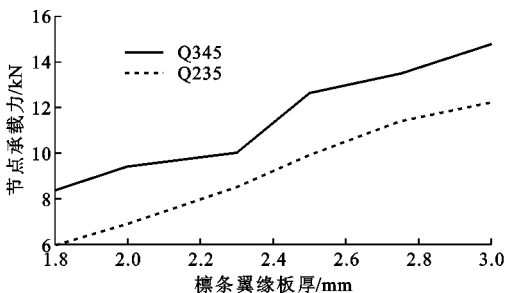


图 4 节点承载力与檩条翼缘板厚关系曲线  
Fig. 4 Relation Curve of Bearing Capacity vs Purlin Flange Thickness

檩条翼缘板厚从 1.8 mm 提高到 3.0 mm 时,2 种材质檩条的节点承载力均随板厚的增加而提高。同时,在檩条翼缘板厚相同的条件下,檩条采用 Q345 材质试件与采用 Q235 材质试件的承载力比值与材料性试验中檩条钢板屈服强度比值接近。

### 2.2.3 自攻螺钉直径对节点承载力的影响

表 1 中 B 组试件包含了直径为 4.2~6.3 mm 的 4 种自攻螺钉,节点承载力与自攻螺钉直径关系曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出,节点承载力与自攻螺钉直径基本呈正比关系。当自攻螺钉直径为 4.2 mm 时,节点承载力为 8.013 kN;自攻螺钉直径为 6.3 mm 时,节点承载力提高到 14.141 kN。

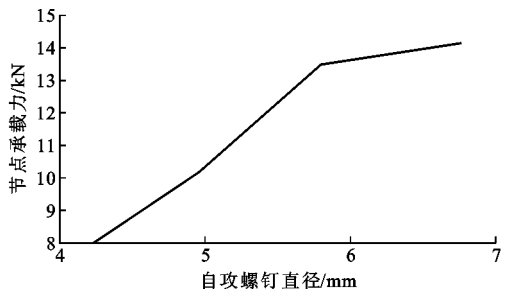


图 5 节点承载力与自攻螺钉直径关系曲线  
Fig. 5 Relation Curve of Bearing Capacity vs Diameter of Self Tapping Screw

### 2.2.4 自攻螺钉数量对节点承载力的影响

节点承载力与自攻螺钉数量关系曲线如图 6 所示。

当螺钉为 2 个时,节点承载力为 13.49 kN;当螺钉为 4 个时,节点承载力为 20.144 kN;当螺钉为 6 个时,节点承载力为 26.691 kN。由图 6 可以看出:节点承载力与自攻螺钉的数量呈正比关系,因此螺钉数量的增加,不会影响单个螺钉的承载力。

### 2.2.5 固定支座底板厚度对节点承载力的影响

节点承载力与固定支座底板厚度关系曲线如图 7 所示。

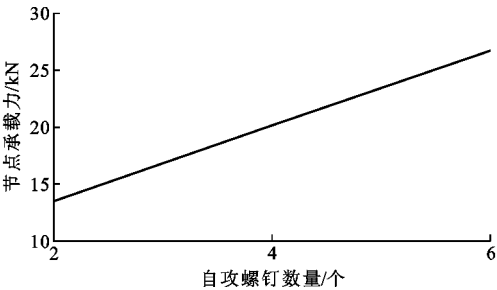


图 6 节点承载力与自攻螺钉数量关系曲线  
Fig. 6 Relation Curve of Bearing Capacity vs Number of Self Tapping Screws

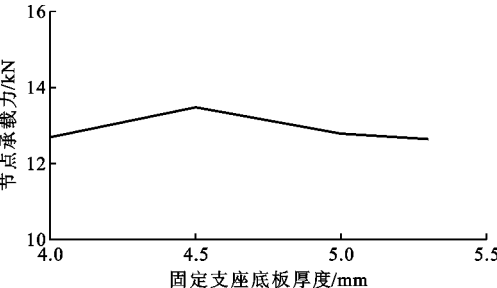


图 7 节点承载力与固定支座底板厚度关系曲线  
Fig. 7 Relation Curve of Bearing Capacity vs Plate Thickness of Fixed Support

D1 组节点承载力试验平均值为 13.49 kN,其他 3 组平均值分别为 12.70,12.79,12.65 kN。由图 7 可知:固定支座底板厚度从 4.3 mm 到 5.5 mm,4 组试件的节点承载力试验值比较接近。固定支座底板厚度在 4.3~5.5 mm 范围内,节点受力性能与固定支座底板厚度基本无关。

3 节点承载力计算方法修正

3.1 自攻螺钉抗拉承载力计算方法对比分析

对中国规范<sup>[19]</sup>、澳洲规范<sup>[20]</sup>、英国规范<sup>[21]</sup>、欧洲规范<sup>[22]</sup>的自攻螺钉抗拉承载力计算方法进行对比,结果如表 3 所示。

由于螺钉数量与节点承载力呈正比关系,将试件节点承载力除以该节点所用自攻螺钉数量得到单个自攻螺钉抗拉承载力,并与国内外相关规范计算结果进行对比,如表 4 所示,其中,国内外规范计算公式中钢板抗拉强度采用钢板材性屈服强度实测值(表 2)。C 组试件存在非典型破坏模式的情况,因此仅对 A,B,D,E 四组试件进行计算分析。图 8 给出了不同试验变量下单个自攻螺钉抗拉承载力试验值与规范计算值对比。中国规范 GB 50018—2002 中的计算方法所得计算值与试验值的平均相对误差为-31.54%,按澳洲规范的计算方法得出的计算值

表 3 国内外规范自攻螺钉抗拉承载力计算方法  
Tab. 3 Calculation Method of Anti-pulling Capacity of Self-tapping Screws of Codes at Home and Abroad

规范	计算公式
GB 50018—2002	$N_t^d=0.75t_cdf$
AS/NZS 4600:2005	$N_t^d=0.85\varphi t_cdf$
BS 5950-5:1998	$N_t^d=0.65t_cdf$
DD ENV 1993-1-3:2001	$N_t^d=\begin{cases} \frac{0.45t_cdf}{\gamma} & \frac{t_c}{s}<1 \\ \frac{0.65t_cdf}{\gamma} & \frac{t_c}{s}\geq 1 \end{cases}$

注: $N_t^d$  为抗拉承载力设计值; $d,f$  分别为自攻螺钉直径和基材抗拉强度设计值; $\varphi$  为折减系数,取 0.5; $t_c$  为钉杆的圆柱状螺纹部分钻入基材中的深度; $\gamma$  为分项系数,取 1.25; $s$  为螺纹间距。

最小,计算值与试验值的平均相对误差达到-61.21%,欧洲规范次之,平均相对误差为-52.54%,英国规范计算值较为接近试验值,平均相对误差为-40.67%。

由图 8 可知:国内外相关规范中的自攻螺钉抗拉承载力计算方法所得计算值与试验值相差均较大,并且均偏于保守。中国规范 GB 50018—2002 中的计算值最为接近试验值,其后依次为英国规范、欧洲规范、澳洲规范。现有计算方法误差较大,需要对自攻螺钉的抗拉承载力设计值计算公式进行修正。

3.2 自攻螺钉抗拉承载力计算方法修正

由第 2.2 节分析可知,自攻螺钉的抗拉承载力与檩条翼缘板厚、檩条材质的抗拉强度、自攻螺钉直径基本呈正比关系,此规律与国内外相关规范中的计算方法相一致。因此,可以假设自攻螺钉的抗拉承载力设计值计算公式为

$$N=\varphi tdf \tag{1}$$

式中: $N$  为自攻螺钉的抗拉承载力; $t$  为自攻螺钉进入基材的深度,此处为檩条翼缘板厚。

为求解公式(1)中的  $\varphi$  值,首先对破坏模式为自攻螺钉被拉出试件的单个螺钉抗拉承载力试验值进行计算,得出相应的  $tdf$  值,并求出各试件抗拉承载力试验值与相应的  $tdf$  值的比值  $\varphi_i$ 。通过对 70 个试件的数据进行处理分析,计算得  $\varphi_i$  的平均值  $u=1.216$ ,方差为 0.026,标准差  $\sigma=0.162$ 。

按照极值分布服从正态分布的方法<sup>[23-24]</sup>对  $\varphi$  值进行求解,并取 0.05 分位值,即满足 95% 保证率,进而求得  $\varphi$  的标准值  $\varphi_k$  为

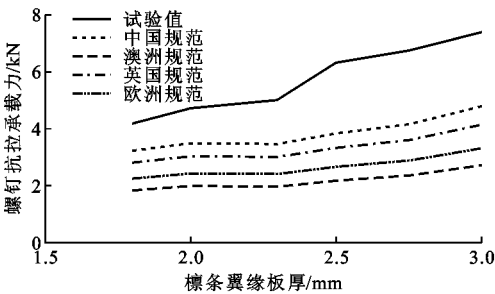
$$\varphi_k=u-1.645\sigma=0.950$$

因此,根据试验值所得到的自攻螺钉抗拉承载

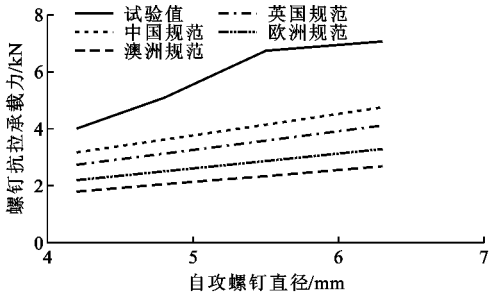
表 4 单个自攻螺钉抗拉承载力

Tab. 4 Tension Bearing Capacity of Single Self Tapping Screw

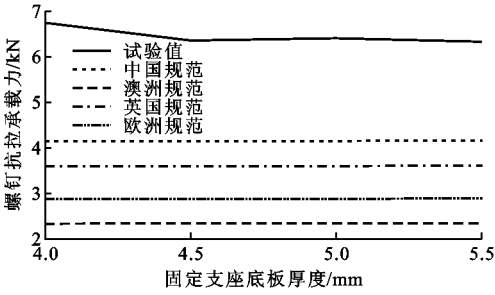
试件 组号	单个自攻螺钉 抗拉承载力 试验值/kN	规范计算单个螺钉抗拉承载力设计值/kN				规范计算值与试验值相对误差/%			
		GB 50018— 2002	AS/NZS 4600:2005	BS 5950-5: 1998	DD ENV 1993-1-3:2001	GB 50018— 2002	AS/NZS 4600:2005	BS 5950-5: 1998	DD ENV 1993-1-3:2001
A1	6.75	4.15	2.35	3.60	2.88	−38.50	−65.15	−46.70	−57.36
A2	4.19	3.22	1.82	2.79	2.23	−23.12	−56.43	−33.37	−46.69
A3	4.72	3.50	1.99	3.04	2.43	−25.73	−57.91	−35.63	−48.51
A4	5.02	3.46	1.96	2.99	2.40	−31.11	−60.96	−40.30	−52.24
A5	6.32	3.83	2.17	3.32	2.66	−39.30	−65.60	−47.39	−57.91
A6	7.39	4.77	2.70	4.14	3.31	−35.43	−63.41	−44.04	−55.23
B2	4.01	3.17	1.80	2.75	2.20	−20.93	−55.19	−31.47	−45.18
B3	5.09	3.62	2.05	3.14	2.51	−28.90	−59.71	−38.38	−50.70
B4	7.07	4.75	2.69	4.12	3.29	−32.79	−61.92	−41.75	−53.40
D2	6.35	4.15	2.35	3.60	2.88	−34.68	−62.99	−43.39	−54.71
D3	6.40	4.15	2.35	3.60	2.88	−35.16	−63.26	−43.81	−55.04
D4	6.33	4.15	2.35	3.60	2.88	−34.44	−62.85	−43.18	−54.54
E1	2.98	2.35	1.33	2.04	1.63	−21.06	−55.27	−31.59	−45.27
E2	3.46	2.57	1.46	2.23	1.78	−25.74	−57.92	−35.64	−48.51
E3	4.26	2.71	1.53	2.35	1.88	−36.42	−63.97	−44.89	−55.92
E4	4.95	2.93	1.66	2.54	2.03	−40.93	−66.53	−48.80	−59.04
E5	5.70	3.34	1.89	2.89	2.31	−41.46	−66.83	−49.27	−59.41
E6	6.11	3.67	2.08	3.18	2.55	−39.94	−65.97	−47.95	−58.36
平均相对误差/%						−31.54	−61.21	−40.67	−52.54



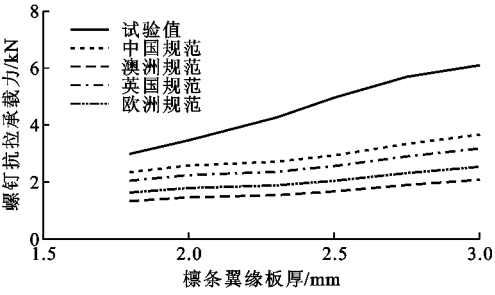
(a) A组试验值与规范计算值对比



(b) B组试验值与规范计算值对比



(c) C组试验值与规范计算值对比



(d) E组试验值与规范计算值对比

图 8 螺钉抗拉承载力试验值与规范计算值对比

Fig. 8 Comparison of Test Values of Screw Tension Bearing Capacity vs Calculation Values of Relevant Norms

力标准值  $N_k$  计算公式为

$$N_k=0.95tdf \tag{2}$$

考虑到实际工程中材料误差及环境影响,在直

立锁边金属屋面工程设计中采用《冷弯薄壁型钢结  
构技术规范》中自攻螺钉抗拉承载力  $N_t^f$  计算公式  
 $N_t^f=0.75t_cdf$  可保证一定安全度。

### 3.3 固定支座底板抗弯刚度补充验算

由第 2.1 节分析可知,在 C 组试件中,出现固定支座底板被拉弯,产生较大变形的现象。固定支座底板出现的较大变形与螺钉作用,在螺帽处产生弯矩,使螺钉受拉力与弯矩的共同作用,最后在螺帽处被拉断或者螺钉被拉出。因此有必要对固定支座底板刚度进行验算,防止底板出现较大变形。根据《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)<sup>[25]</sup>,固定支座底板刚度应满足下式

$$w \leq [w_T] \quad (3)$$

$$w = \frac{Fl^3}{48EI} \quad (4)$$

式中: $w$  为固定支座板底最大挠度; $[w_T]$  为挠度容许值,参考铝合金荷载规范,取  $[w_T] = l/90$ ,  $l$  为固定支座底板两侧螺栓孔的间距; $F$  为单个固定支座在风吸作用下所受竖向力; $E$ ,  $I$  分别为固定支座底板弹性模量和惯性矩。

## 4 结 语

(1) 直立锁边金属屋面系统的固定支座与檩条连接节点存在 3 种典型破坏模式:自攻螺钉被拉出;固定支座底板被拉弯,自攻螺钉被拉出;固定支座底板被拉弯,自攻螺钉在螺帽处被拉断。

(2) 自攻螺钉的抗拉承载力与檩条翼缘板厚、檩条抗拉强度、自攻螺钉直径、螺钉数量等因素基本呈正比关系。当固定支座底板厚度大于 4 mm 时,螺钉抗拉承载力与固定支座底板厚度无关。

(3) 中国规范、澳洲规范、英国规范、欧洲规范中的自攻螺钉抗拉承载力计算值与试验值相差均较大,均偏于保守,其中按中国规范 GB 50018—2002 求得的计算值与试验值最为接近,平均相对误差为 -31.54%。

(4) 针对已有计算方法误差较大的问题,采用概率统计的计算方法对 70 个破坏模式为自攻螺钉拉出的试件进行分析,提出了修正后的自攻螺钉抗拉承载力计算方法,可为工程设计计算提供参考。

### 参考文献:

### References:

- [1] 蔡昭昀. 我国金属屋面工程现状和发展趋势[J]. 中国建筑防水, 2010(22): 34-38.  
CAI Zhao-yun. Current Situation and Development Trend About Metal Roofing in China[J]. China Building Waterproofing, 2010(22): 34-38.
- [2] 陈 辉. 直立锁边金属屋面的抗风构造性能试验研究

[J]. 钢结构, 2018, 33(8): 20-23, 78.

CHEN Hui. Experimental Research on the Wind-resistance Performance of Standing Seam Metal Roof [J]. Steel Construction, 2018, 33(8): 20-23, 78.

- [3] 于敬海, 李路川, 蒋智宇, 等. 天津理工大学体育馆屋面设计要点分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(增): 32-35.  
YU Jing-hai, LI Lu-chuan, JIANG Zhi-yu, et al. Analysis on the Design and Construction Technology of the Gymnasium Roof in Tianjin University of Technology[J]. Industrial Construction, 2018, 48(S): 32-35.
- [4] 应晓捷, 钟俊浩. 琼台师专体育馆金属屋面破坏原因分析及其加固[J]. 中国建筑防水, 2015(11): 14-17.  
YING Xiao-jie, ZHONG Jun-hao. Analysis on Damage Cause of the Metal Roof for the Stadium of Qiongtai Normal College & Its Reinforcement[J]. China Building Waterproofing, 2015(11): 14-17.
- [5] 陈婷婷. 吉图珥车站站台雨棚加固方案研究[J]. 工程建设与设计, 2015(8): 44-46.  
CHEN Ting-ting. Scheme of Kyrgyzstan Hun Station Platform Canopy Reinforcement[J]. Construction & Design for Engineering, 2015(8): 44-46.
- [6] 薛秋生. 西安北站雨棚屋面抗风技术探讨[J]. 高速铁路技术, 2014, 5(3): 59-62, 71.  
XUE Qiu-sheng. Discussion on Wind-resistance Technology for Canopy Roof of Xi'an North Railway Station[J]. High Speed Railway Technology, 2014, 5(3): 59-62, 71.
- [7] 张 庭. 大型金属屋面围护系统风掀与渗漏问题的分析与解决[J]. 中国建筑防水, 2018(15): 10-14.  
ZHANG Ting. Analysis and Solution of Wind Lift and Leakage Problems in Large Metal Roof Enclosure System[J]. China Building Waterproofing, 2018(15): 10-14.
- [8] 龙文志. 提高金属屋面抗风力技术探讨(下)——从首都机场 T3 航站楼金属屋面三次被风掀谈起[J]. 中国建筑防水, 2013(19): 10-13, 18.  
LONG Wen-zhi. Investigation into the Technology of Strengthening Wind Resistance for Metal Roof (Part II) — A Talking About Three Times Breakage of T3 Terminal Metal Roof of BCIA by Wind[J]. China Building Waterproofing, 2013(19): 10-13, 18.
- [9] 于敬海, 李路川, 盖 力, 等. 直立锁边金属屋面系统抗风承载力节点试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(17): 83-86.  
YU Jing-hai, LI Lu-chuan, GAI Li, et al. Node Test Study on Wind Resistance Bearing Capacity of the Standing Seam Metal Roof System[J]. Building Struc-



- ture, 2015, 45(17): 83-86.
- [10] 王海涛,王静峰.大跨度空间结构金属屋面板抗风揭性能试验研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版, 2016, 39(1): 115-121.
- WANG Hai-tao, WANG Jing-feng. Experimental Study of Wind Resistance of Metal Roofing Panels of Large-span Spatial Structure [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2016, 39(1): 115-121.
- [11] 曾祥新.自攻螺钉固定压型板金属屋面抗风承载力及风致疲劳破坏研究[D].广州:华南理工大学, 2015.
- ZENG Xiang-xin. Study of the Wind-uplift Resistance Capacity and Wind-induced Fatigue Damage of the Self-trapping Screw-fastened Metal Roofing Plate [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [12] BASKARAN A, HAM H, LEI W. New Design Procedure for Wind Uplift Resistance of Architectural Metal Roofing Systems[J]. Journal of Architectural Engineering, 2006, 12(4): 168-177.
- [13] 刘军进,崔忠乾,李建辉.直立锁边金属屋面抗风揭性能研究现状及展望[J].建筑科学, 2018, 34(5): 118-124.
- LIU Jun-jin, CUI Zhong-qian, LI Jian-hui. Research Status and Prospect of the Performance of Standing Seam Metal Roof Under Wind Uplift Load[J]. Building Science, 2018, 34(5): 118-124.
- [14] 王宏斌,贾占坤,冯绍攀,等.直立锁边铝镁锰板屋面系统抗风揭试验研究[J].工业建筑, 2018, 48(9): 176-180.
- WANG Hong-bin, JIA Zhan-kun, FENG Shao-pan, et al. Experimental Research on the Wind Uplift Capacity of Alumin-magnesium-manganese Alloy with Standing Seam [J]. Industrial Construction, 2018, 48(9): 176-180.
- [15] 李元齐,帅逸群,沈祖炎,等.冷弯薄壁型钢自攻螺钉连接抗拉性能试验研究[J].建筑结构学报, 2015, 36(12): 143-152.
- LI Yuan-qi, SHUAI Yi-qun, SHEN Zu-yan, et al. Experimental Study on Tension Behavior of Self-drilling Screw Connections for Cold-formed Thin-walled Steel Structures [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 143-152.
- [16] 段圣杰. 筑巢轻钢结构体系节点自攻螺钉抗拉性能及节点模型化研究[D].重庆:重庆大学, 2014.
- DUAN Sheng-jie. Study on Tensile Properties of Self-tapping Screw and a Modeling Approach of Joints in Nested Light-gauge Steel System [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [17] 曾滨,惠存,韩维池,等. S60 框架幕墙系统自攻螺钉抗拉拔性能试验研究和计算方法分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(11): 176-180.
- ZENG Bin, HUI Cun, HAN Wei-chi, et al. Experimental Study and Calculation Method Analysis of Pull-out Resistance Performance for Self-tapping Screws in S60 Frame Curtain Wall System [J]. Industrial Construction, 2015, 45(11): 176-180.
- [18] GB/T 228.1—2010,金属材料拉伸试验:第1部分:室温试验方法[S].
- GB/T 228.1—2010, Metallic Materials — Tensile Testing — Part 1: Method of Test at Room Temperature [S].
- [19] GB 50018—2002,冷弯薄壁型钢结构技术规范[S].
- GB 50018—2002, Technical Code of Cold-formed Thin-wall Steel Structures [S].
- [20] AS/NZS 4600: 2005, Cold-formed Steel Structures [S].
- [21] BS 5950-5: 1998, Structural Use of Steelwork in Building — Part 5. Code of Practice for Design of Cold Formed Thin Gauge Sections [S].
- [22] DD ENV 1993-1-3: 2001, Euro Code 3: Design of Steel Structures: Part 1-3: General Rules: Supplementary Rules for Cold-formed Members and Sheeting [S].
- [23] 曹宏,李秋胜,李桂青,等.抗风结构安全度的计算方法[J].土木工程学报, 1994, 27(1): 40-48.
- CAO Hong, LI Qiu-sheng, LI Gui-qing, et al. Calculation of Wind-resistant Structure Safety [J]. China Civil Engineering Journal, 1994, 27(1): 40-48.
- [24] GB 50068—2001,建筑结构可靠度设计统一标准[S].
- GB 50068—2001, Unified Standard for Reliability Design of Building Structures [S].
- [25] GB 50429—2007,铝合金结构设计规范[S].
- GB 50429—2007, Code for Design of Aluminium Structures [S].