

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.02.015

冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚承载力 试验研究

马 辉, 刘喜洋, 强佳琪, 张国恒, 刘方达

(西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为研究冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚连接的受力性能, 分别进行了 8 个柱脚抗拔和 8 个柱脚抗压力学性能试验研究, 重点分析了光伏支架柱脚连接部位的破坏特征、极限承载力及变形等性能指标。结果表明: 在光伏支架柱脚抗拔试验中, 连接件自攻螺钉首先发生破坏, 柱脚底端圆钢管的内部混凝土被拉出 2~3 cm, 导致柱脚丧失承载力而失效; 在光伏支架柱脚抗压试验中, 自攻螺钉首先达到极限承载力继而被剪断, 随后柱脚上端连接件翼缘与圆钢管壁发生挤压, 造成连接件型钢翼缘挤压撕裂破坏, 最终导致柱脚丧失承载力而失效。在此基础上, 提出了适用于冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的抗拔和抗压承载力的修正计算公式, 可为该光伏支架的柱脚设计提供技术参考。

关键词: 冷弯薄壁型钢; 高强度合金钢; 光伏支架; 柱脚; 极限承载力

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2022)02-0263-08

Experimental study of the bearing capacity of photovoltaic support column foots with cold-formed thin-walled high-strength alloy steel

MA Hui, LIU Xiyang, QIANG Jiaqi, ZHANG Guoheng, LIU Fangda

(Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To study the mechanical properties on the connection of photovoltaic support column foots with cold-formed thin-walled high-strength alloy steel, the experiments on the mechanical properties of 8 tensile specimens and 8 compressive specimens of photovoltaic support column foots were carried out; the performance indexes such as the connection failure characteristics, ultimate bearing capacity and deformation of photovoltaic support column foots were analyzed emphatically. The results show that when the photovoltaic support column foots were subjected to pull-out test, the self-tapping screw of connector was damaged first, with the concrete in the circular steel tube at the bottom of column foot pulled out by 2~3 cm, resulting in the loss of bearing capacity and failure of column foot. When the compression test of the photovoltaic support column foots, the self-tapping screw was cut off after it reached the ultimate bearing capacity. Then the flange of connector at the upper end of the column base was squeezed with the wall of circular steel tube, resulting in the extrusion and tear damage to the flange of section steel of connector, which eventually led to the loss of bearing capacity and failure of column base. On this basis, the calculation methods for the pull-out and compression bearing capacities of photovoltaic support column foots with cold-formed thin-wall high-strength alloy steel were given, which can provide technical references for the design of the photovoltaic support column foots.

收稿日期: 2021-08-04; **网络出版日期:** 2022-03-22

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220321.1934.006.html>

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JM-193)

通信作者: 马辉, 男, 博士, 副教授, 研究方向为钢与混凝土组合结构及混合结构。E-mail: mahuiwell@163.com

Key words: cold-formed thin-walled steel; high-strength alloy steel; photovoltaic support; column foot; ultimate bearing capacity

随着我国经济的快速发展,能源短缺问题变得尤为突出。自然界的一次能源(如煤炭、石油、天然气等)储量有限,能源危机迫在眉睫,若不尽早找出一代能源的替代能源,将面临燃料枯竭的危险。太阳能作为一种清洁、无污染、可再生的能源,受到了各国政府的高度重视,因而应用前景十分广阔。我国幅员辽阔,太阳能资源十分丰富,截至 2020 年,我国累计光伏并网装机容量达到 253GW,新增光伏并网装机容量达到 48.2GW,总机量及新增装机容量均为全球第一^[1],这有效地支撑了我国社会经济的发展。当前,我国太阳能光伏支架结构的材质多种多样,其中冷弯薄壁型钢光伏支架因其性能稳定、承载力高、耐腐蚀、美观大方、成本较低且安装方便等优点,被广泛应用(见图 1)。



图 1 冷弯薄壁型钢太阳能光伏支架

Fig. 1 Solar photovoltaic bracket with cold-formed thin-walled steel

冷弯薄壁型钢在建筑结构中的应用已有 60 多年的历史,美国、澳大利亚等国家在居民住宅中广泛使用了冷弯薄壁型钢^[2-3]。国内张雪娇^[4]采用理论分析、数值模拟等方法,对冷弯薄壁型钢结构的抗震性能进行了研究,提出了冷弯薄壁型钢构件的计算方法。沈祖炎、李元齐等^[5-6]采用二阶矩概率法对冷弯薄壁型钢轴心受压构件进行了可靠度分析,结果表明,现行《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018—2002^[7]中,考虑板组约束计算截面有效宽厚比的方法对构件轴压承载力的计算是可靠的。国外 Fülöp 等^[8]对两层冷弯薄壁型钢住宅的动力特性进行了现场测量,提出低层冷弯薄壁型钢结构住宅的阻尼比宜取 5%。Dubina^[9]通过振动台试验分析了冷弯薄壁型钢结构在地震作用下的自振频率、阻尼比和地震反应,结果表明冷弯薄壁型钢结构具有较好的抗震性能。文献^[10]提出了一种提高冷弯型钢梁强度的新方法,并对不同的冷弯型钢组合梁在四点荷载作用下的简支端条件进行了试验研究,结果表明该

冷弯型钢组合梁具有良好的结构性能和经济性。

目前,国内外对冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚连接承载力的研究鲜见报道,且缺乏相关设计方法,国内规范虽提出了关于冷弯薄壁型钢各构件的承载力计算方法,但该方法只适用于结构单个构件的承载力计算,而对于冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的抗拔与抗压极限承载力计算,目前还没有相应的方法。鉴于此,本次试验分别设计了 8 个柱脚抗拔和 8 个柱脚抗压试件,并进行了抗拔和抗压试验研究,重点分析支架柱脚的破坏形态、荷载-位移曲线及承载力等;基于现有规范和理论研究,提出了适合于冷弯薄壁高强度合金钢柱脚的极限承载力修正计算公式,可为冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架的工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件的设计与制作

考虑到冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架的工程应用可能会出现受拉和受压两种情况,本次试验分别设计了 8 个柱脚抗拔和 8 个柱脚抗压试件,抗拔试件编号为 C-T-1~C-T-8,抗压试件编号为 C-C-1~C-C-8。试件长度均为 350 mm,翼缘宽度均为 52 mm。柱脚结构为上端带有连接钢板的圆钢管混凝土构件,连接钢板下端伸入钢管内混凝土,上部通过螺栓和自攻螺钉与光伏支架连接,螺栓规格为 M8×1,自攻螺钉规格为 ST4.8 级。试件采用强度等级为 G550 的冷弯薄壁型钢,钢板厚度均为 2 mm,型钢屈服强度为 550 MPa,极限抗拉强度为 610 MPa,弹性模量为 205 GPa,断裂伸长率为 14%。试件如图 2 所示。

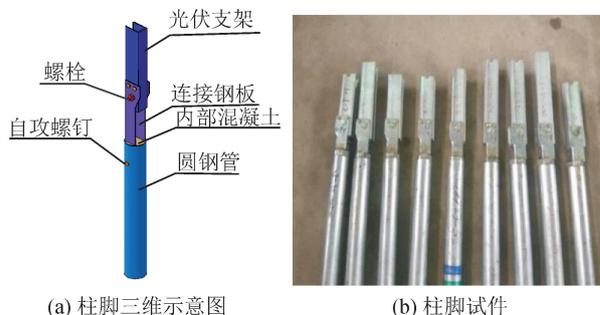


图 2 冷弯薄壁型钢光伏支架柱脚

Fig. 2 Cold-formed thin-walled steel photovoltaic support column feet

1.2 试验装置及加载制度

本次光伏支架柱脚承载力试验在西安理工大学结构工程实验室进行,采用 MTS 电液伺服仪进行轴向静力加载,如图 3 所示。试件安装后首先对中,然后进行预加载以消除试件与夹具之间的滑移,并检查试验设备及仪表等是否正常;试验采用位移控制加载,试验数据由计算机自动采集,待水平承载力下降至极限承载力的 85% 时停止加载。采用近距离观测、拍照及现场记录等方法对试件的试验过程及试验现象进行观察记录。



图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test loading devices

2 光伏支架柱脚承载力试验结果分析

2.1 破坏过程及破坏形态

冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚抗拔与抗压的破坏形态及特征如图 4~5 所示。主要描述如下:①柱脚受拉的破坏形态:自攻螺钉被剪断后,下部柱脚圆钢管内混凝土被拉出 2~3 cm,试件发生破坏,整个试验过程中上部连接件和下部柱脚圆钢管均未发生破坏;②柱脚受压的破坏特征:自攻螺钉内部混凝土在压力作用下产生一定的压缩变形,上部连接件翼缘与底部钢管壁之间产生挤压变形,最终连接件翼缘挤压屈服且自攻螺钉被剪断,从而导致试件发生破坏。

通过冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的抗拔试验,发现钢板连接件与混凝土之间有较好的粘结力,故试件破坏的原因是自攻螺钉抗剪承载力较弱,圆钢管内部混凝土与钢管内壁之间粘结力较差,从而导致连接件与混凝土从底部圆钢管中拔出,致使试件最终破坏。通过冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的抗压试验发现,试件最终破坏的原因仍然是自攻螺钉抗剪承载力较弱,最终钢板连接件翼缘被压弯发生撕裂破坏,并且钢管发生轻微鼓起。

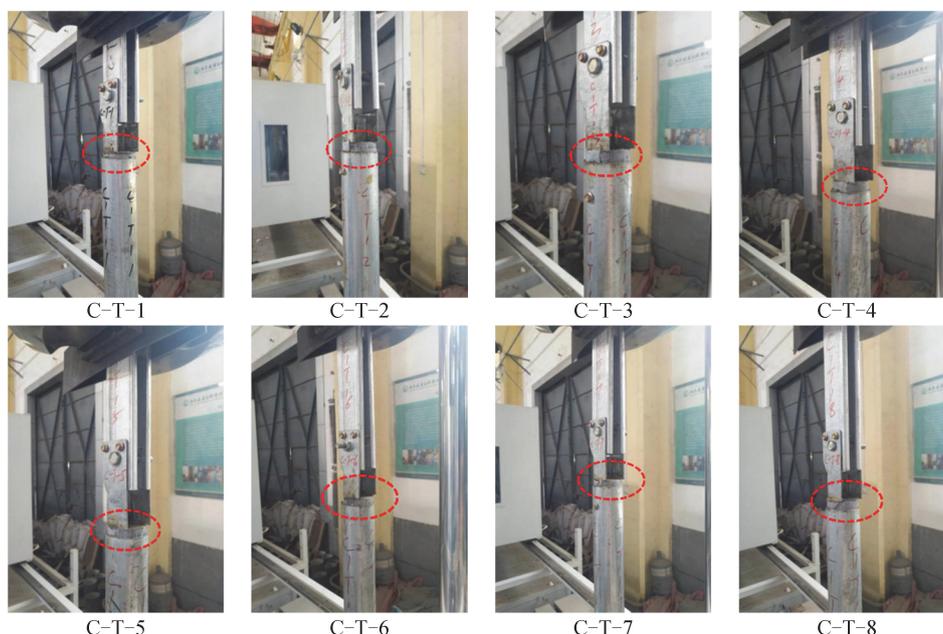


图 4 冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的抗拔破坏现象

Fig. 4 Anti-pull failure phenomenon of cold-formed thin-walled high-strength alloy steel photovoltaic support column feet



图 5 冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的抗压破坏现象

Fig. 5 Compression failure phenomenon of cold-formed thin-walled high-strength alloy steel photovoltaic support column feet

2.2 柱脚抗拔试验结果分析

通过 MTS 测得冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的荷载-位移曲线,如图 6 所示。表 1 列出了每个试件的抗拔极限承载力,各个试件的抗拔极限承载力大小存在一定差距,这可能是由于:①试件制作存在误差,特别是对于这类薄壁型钢构件,构件的尺寸精度及

质量要求相对较高;②试件的材料性能存在不均匀性;③柱脚的抗拔及抗压承载力相对较小,对加载装置及设备精度要求较高等。本文为减少不利因素对试件极限承载力的影响,在计算时去除了极限承载力的最大值和最小值,由此求得试件极限承载力的平均值为 12.93 kN(特征值 $P_{0.1}$)。此极限承载力均值可为冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的设计应用提供参考。

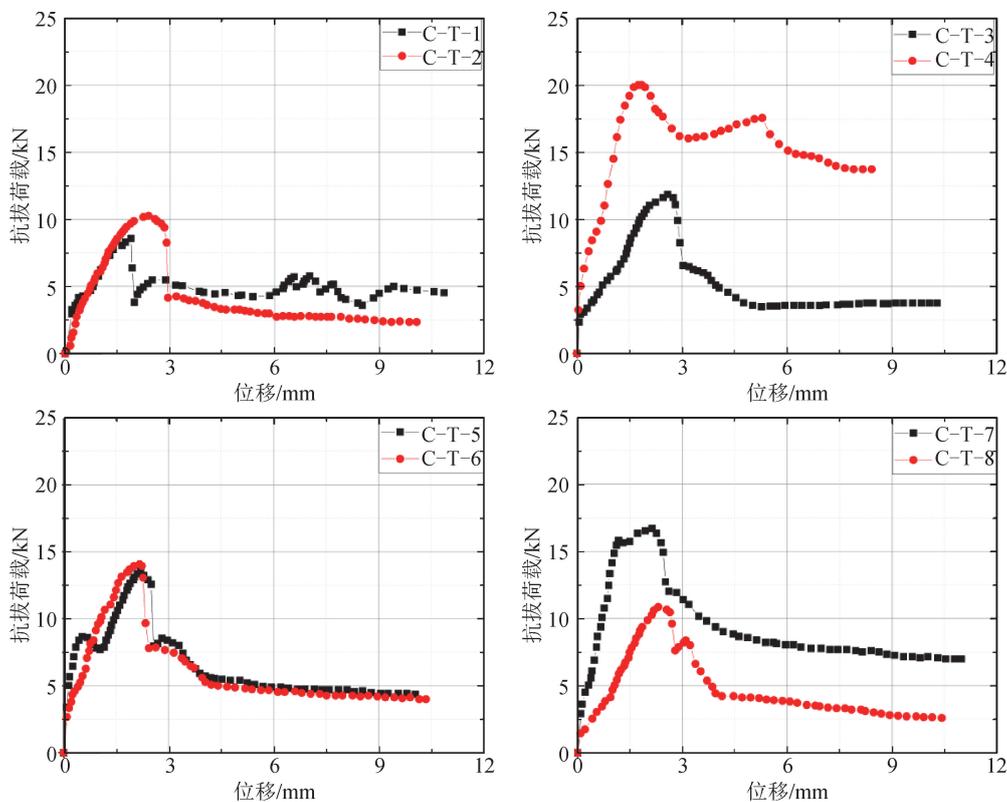


图 6 冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的抗拔荷载-位移曲线

Fig. 6 Uplift load-displacement curves of cold-formed thin-walled high-strength alloy steel photovoltaic support column feet

表1 冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的抗拔试验极限承载力

Tab.1 Ultimate uplift bearing capacity of cold-formed thin-walled high-strength alloy steel photovoltaic support column foots

试验类型	试件编号	试件长度/mm	翼缘宽度/mm	极限承载力/kN	特征值 $P_{0.1}$ /kN
柱脚 抗拔	C-T-1	350	52	8.5	12.93
	C-T-2	350	52	10.3	
	C-T-3	350	52	11.9	
	C-T-4	350	52	20.2	
	C-T-5	350	52	13.6	
	C-T-6	350	52	14.2	
	C-T-7	350	52	16.7	
	C-T-8	350	52	10.9	

由图6可知,各试件荷载-位移曲线的走势基本一致,说明其受力较为相似。加载前期,试件处于弹性阶段,荷载-位移曲线基本呈线性相关,此时荷载较小,柱脚钢管与内部混凝土之间并未产生相对滑移;随着荷载的增大,混凝土与钢管之间产生相对滑移,峰值荷载后承载力急剧下降随后又趋于稳定,这

是由于自攻螺钉达到极限承载力后被剪断,柱脚内壁与混凝土之间的摩擦力不足所致,最后圆钢管内部混凝土被拔出,试件破坏。

2.3 柱脚抗压试验结果分析

冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的抗压试验与抗拔试验一样,是检验冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚承载力的重要试验之一。试验过程中,通过MTS实测了冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的荷载-位移曲线,如图7所示。各试件的实测抗压极限承载力如表2所示,同理,可求得试件极限抗压承载力的平均值为27.50kN(特征值 P_{12})。由图7可知,对冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架进行柱脚抗压时,各试件荷载-位移曲线的走势基本一致,呈现出周期性增长的现象。在加载初期,抗压试验与抗拔试验一致,此时荷载与位移线性相关;随着荷载的持续增加,自攻螺钉达到极限承载力继而剪断,承载力急剧下降,随后连接件翼缘与圆钢管壁接触后,承载力继续上升至第二次峰值荷载;随着荷载的增加,最终连接件型钢翼缘发生挤压撕裂破坏,导致荷载-位移曲线逐渐下降。

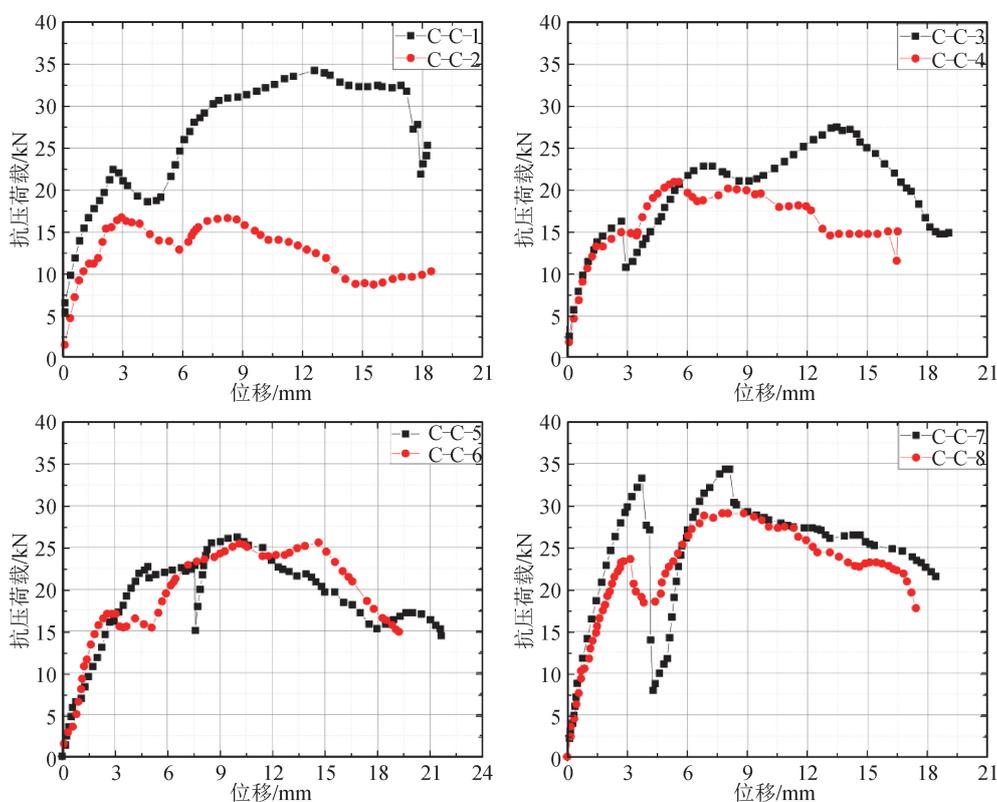


图7 冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的抗压荷载-位移曲线

Fig.7 Compressive load-displacement curves of cold-formed thin-walled high-strength alloy steel photovoltaic support column foots

表 2 冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的
抗压试验极限承载力

Tab. 2 Ultimate compression bearing capacity
of cold-formed thin-walled high-strength alloy steel
photovoltaic support column foots

试验 类型	试件 编号	试件长 度/mm	翼缘宽 度/mm	极限承载 力/kN	特征值 P_{12}/kN
柱脚 抗压	C-C-1	350	52	34.4	27.50
	C-C-2	350	52	16.8	
	C-C-3	350	52	27.7	
	C-C-4	350	52	21.2	
	C-C-5	350	52	26.5	
	C-C-6	350	52	25.9	
	C-C-7	350	52	34.5	
	C-C-8	350	52	29.3	

3 承载力计算分析

3.1 柱脚抗拔承载力计算

由试件破坏过程可以看出,自攻螺钉达到极限承载力后先被剪断,而后钢管内部混凝土被拔出,螺钉剪断后荷载-位移曲线也开始下滑直至最终破坏。因此,在进行柱脚抗拔承载力计算时,应考虑自攻螺钉的受剪破坏以及混凝土与柱脚钢管内壁之间的摩擦力,即:

$$P_{ul} = N_v + f_u \quad (1)$$

式中: P_{ul} 为柱脚的抗拔承载力计算值; N_v 为自攻螺钉的抗剪承载力计算值; f_u 为混凝土与柱脚钢管内壁之间的滑动摩擦力。

目前,对于自攻螺钉的抗剪承载力设计方法,各国规范各有不同,对比中国、美国以及英国规范中自攻螺钉的抗剪承载力设计方法,如表 3 所示。

表 3 不同国家规范中自攻螺钉抗剪承载力的设计方法

Tab. 3 Design methods for shear capacity of self tapping screws in different national codes

规范	计算公式	说明
中国规范 GB 50018—2002 ^[7]	$t_1/t = 1$ $N_v = 3.7 \sqrt{t^3} df$ $N_v \leq 2.4tdf$	N_v 为一个自攻螺钉的抗剪承载力设计值(N); d 为螺钉的直径(mm); t 为较薄板的厚度(mm); t_1 为较厚板的厚度(mm); f 为连接钢板抗拉强度设计值(N/mm ²)。
	$t_1/t \geq 2.5$ $N_v = 2.4tdf$	
	当 t_1/t 介于 1 和 2.5 之间时, N_v 由上式插值计算	
美国规范 AISI S100 - 12 ^[11]	$t_2/t_1 \leq 1.0$ $N_v = 4.2 \sqrt{t_2^3} df_1$ $N_v \leq 2.7t_1df_1$ $N_v \leq 2.7t_2df_2$	N_v 为单颗螺钉的额定抗剪强度(N); d 为自攻螺钉直径(mm); t_1 为与螺钉头接触的板件厚度(mm); t_2 为不与螺钉头接触的板件厚度(mm); f_1 为与螺钉头接触的板件抗拉强度(N/mm ²); f_2 为不与螺钉头接触的板件抗拉强度(N/mm ²)。
	$t_2/t_1 \geq 2.5$ $N_v = 2.7t_1df_1$ $N_v \leq 2.7t_2df_2$	
	当 t_2/t_1 介于 1 和 2.5 之间时, P_{ns} 由上式插值计算	
英国规范 BS 5950 - 5:1998 ^[12]	$t_2/t_1 = 1.0$ $N_v = 3.2 \sqrt{t_1^3} df$ $N_v \leq 2.1t_1df$	N_v 为单颗螺钉连接件的抗剪强度(N); t_1 为与螺钉头相邻的钢板厚度(mm); t_2 为与螺钉头不相邻的钢板厚度(mm); d 为螺钉名义直径(mm); f 为钢板的设计强度(N/mm ²)。
	$t_2/t_1 \geq 2.5$ $N_v = 2.1t_1df$	
	当 t_2/t_1 介于 1 和 2.5 之间时, P_s 由上式插值计算	

另外,计算钢管内壁与混凝土之间的滑动摩擦力时,可根据弹性理论中的拉梅公式^[13],推导混凝土与钢管的紧箍力:

$$p = \frac{v_c - v_s}{-2v_c v_s - v_c + 1 - \frac{2}{an} v_s (1 + v_c)} \cdot \sigma_{cl} \quad (2)$$

式中: p 为紧箍力(kN); v_s 为钢材的泊松比; v_c 为混凝土的泊松比; n 为弹性模量; a 为含钢率; σ_{cl} 为核心混凝土上产生的拉压应力(Pa)。

国内外学者就混凝土与钢板的摩擦系数进行了一些研究,本文为简便计算,直接参考现有研究成果。徐有邻^[14]为研究钢材与混凝土的胶结摩擦阻性

能,进行了不同钢材与混凝土的胶结剪切试验,研究表明:钢材与混凝土之间的摩擦系数 f 根据钢材表面的粗糙程度可大致取为 $0.20 \sim 0.60$,故本文钢管内壁与混凝土之间的滑动摩擦系数取 0.60 。

$$f_u = 0.60p \quad (3)$$

3.2 柱脚抗压承载力计算

由试件的破坏状态可以看出,由于自攻螺钉达到极限承载力被剪断后,连接件翼缘与圆钢管壁接触,承载力继续升高,当连接件型钢翼缘被撕裂破坏后,柱脚彻底失去承载能力。因此,在进行柱脚抗压承载力计算时,应考虑自攻螺钉的受剪破坏以及连接件翼缘的压弯破坏。即:

$$P_{u2} = N_v + f_n \quad (4)$$

式中: P_{u2} 为柱脚的抗压承载力计算值; N_v 为自攻螺钉的抗剪承载力计算值; f_n 为连接件型钢翼缘的抗压承载力计算值。

根据《钢结构设计标准》GB 50017—2017^[15],考虑到连接件钢板在轴向压力作用下容易发生失稳破坏,以及在轴向压力作用下钢板局部鼓曲后承载力有所下降,本文提出修正系数 $k = 1.05$,于是得到连接件钢板压弯破坏时承载力的修正公式:

$$\frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}} \leq \frac{f_n}{k} \quad (5)$$

式中: N 为轴心压力设计值(N); M_x 、 M_y 分别为同一截面处对 x 轴、 y 轴的弯矩设计值(N·mm); A_n 为构件的净截面面积(mm²); W_n 为构件的净截面模量(mm³); γ_x 、 γ_y 为截面的塑性发展系数,均取 1.0 。

3.3 承载力计算比较与修正公式

通过式(1)和式(4)并结合表 3,对比各国规范下的柱脚承载力计算值与试验值,如表 4 所示。由

表中计算结果可知,中国规范 GB 50018—2002 设计计算的极限承载力与试验结果比较相近,美国规范 AISI S100—12 计算得到的极限承载力偏于保守,而英国规范 BS 5950—5 计算得到的极限承载力偏于不安全。由此可见,中国规范规定的自攻螺钉抗剪承载力设计方法更适用于此类冷弯薄壁光伏支架柱脚的极限承载力计算,且偏于安全。

另外,由于柱脚钢材采用高强度合金钢,考虑到高强钢的强度较高而且刚度较大,受力时变形较小,破坏时类似于脆性破坏,为保证柱脚承载力的安全可靠,需要对冷弯薄壁高强度合金钢的材料强度性能指标进行修正,引入修正系数 α 对其进行修正,则自攻螺钉的抗剪承载力修正公式为:

$$N_v^t = 3.7\alpha \sqrt{t^3 d} f \quad (6)$$

式中: N_v^t 为单个自攻螺钉的抗剪承载力计算值; α 为冷弯薄壁高强度钢的强度修正系数,取 0.95 ; t 为连接钢板厚度; d 为自攻螺钉直径; f 为连接钢板的抗拉强度设计值。

将修正后的中国规范计算结果与试验结果进行对比,如表 4 所示。由对比结果可知,修正后柱脚承载力的计算值与试验值较为接近,吻合较好。

上述试验结果表明,自攻螺钉被剪断是冷弯薄壁光伏支架柱脚发生破坏的主要标志,基于此,本文建立了柱脚承载力的修正计算公式,该方法可以较好地定量分析柱脚的承载力,可为实际工程中柱脚的设计与承载力计算提供理论依据。在实际应用中,可根据柱脚在服役时可能遭受的各类荷载效应,利用该公式来选择自攻螺钉的设计参数,从而保证柱脚满足承载力设计要求。

表 4 光伏支架柱脚承载力计算值与试验值的比较

Tab. 4 Comparison between calculated and experimental values of bearing capacity of column base of photovoltaic support

试验类型	中国规范 GB 50018—2002			美国规范 AISI S100—12			英国规范 BS 5950—5:1998			修正后中国规范的 计算值			
	N_v^t	f_u	P_{u1}	P_{ns}	f_u	P_{u1}	P_s	f_u	P_{u1}	N_v^t	f_u	P_{u1}	P_{u1}/P_t
柱脚抗拔	12.61	0.80	13.41	14.27	0.80	15.07	10.91	0.80	11.71	11.98	0.80	12.78	0.988
柱脚抗压	N_v^t	f_n	P_{u2}	P_{ns}	f_n	P_{u2}	P_s	f_n	P_{u2}	N_v^t	f_n	P_{u2}	P_{u2}/P_t
	12.61	15.71	28.32	14.27	15.71	29.98	10.91	15.71	26.62	11.98	15.71	27.69	1.007

注: P_n 和 P_t 分别为柱脚极限承载力的计算值与试验值, P_u/P_t 无量纲,其他量的单位均为 kN。

4 结 论

本文对冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚连接进行了抗拔和抗压受力性能试验,分析了柱脚连

接在极限承载力作用下的破坏形态、极限承载力及变形特征,主要得出以下结论:

1) 冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚抗拔极限承载力平均值为 12.93 kN,破坏时,自攻螺栓

首先发生剪断破坏,上部连接件保持较好的性能并未发生破坏,柱脚下端圆钢管内部混凝土与圆钢管之间发生相对滑移;

2) 冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚抗压极限承载力平均值为 27.50 kN,破坏时,自攻螺钉首先发生剪断破坏,上部连接件翼缘与下端圆钢管壁发生挤压,造成连接件的翼缘挤压撕裂破坏;

3) 无论是柱脚抗拔还是柱脚抗压,柱脚连接破坏均系自攻螺钉被剪断,导致钢管内混凝土被拔出或连接件翼缘挤压撕裂破坏所致,因此,在进行冷弯薄壁高强度合金钢柱脚设计时,应加强自攻螺钉的承载力设计;

4) 考虑到自攻螺钉的抗剪承载力、混凝土与钢管壁的摩擦力以及连接件钢板的抗压承载力,提出了适用于冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚的抗拔和抗压承载力的修正计算公式,试验结果表明,计算值与试验值吻合良好,验证了该公式的有效性。

参考文献:

- [1] 刘方旭. 中国光伏产业现状与发展策略研究[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(30):16-17.
- [2] YU C. Distortional buckling of cold-formed steel members in bending [M]. Baltimore: John Hopkins University, 2005: 1-386.
- [3] DAVIES J M. Recent research advances in cold-formed steel structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 55(1-3):267-288.
- [4] 张雪娇. 轻钢龙骨体系住宅抗震性能分析[D]. 南京:南京工业大学, 2005.
ZHANG Xuejiao. Researches on seismic performance of light gauge steel framed residences [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2005.
- [5] 姚行友,李元齐,沈祖炎. 高强冷弯薄壁型钢卷边槽形截面轴压构件畸变屈曲性能研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(11):1-9.
YAO Xingyou, LI Yuanqi, SHEN Zuyan. Distortional buckling behavior of high-strength cold-formed thin-walled steel lipped channel columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(11):1-9.
- [6] 李元齐,王树坤,沈祖炎,等. 高强冷弯薄壁型钢卷边槽形截面轴压构件试验研究及承载力分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(11):17-25.
LI Yuanqi, WANG Shukun, SHEN Zuyan, et al. Experimental study and load-carrying capacity analysis of high-strength cold-formed thin-walled steel lipped channel columns under axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(11):17-25.
- [7] 湖北省发展计划委员会. 冷弯薄壁型钢结构技术规范: GB 50018—2002 [S]. 北京:中国计划出版社, 2002.
- [8] FÜLÖP L A, DUBINA D. Design criteria for seam and sheeting-to-framing connections of cold-formed steel shear panels [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(4): 582-590.
- [9] DUBINA D. Structural analysis and design assisted by testing of cold-formed steel structures [J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46(7-9):741-764.
- [10] ADIL DAR M, SUBRAMANIAN N, ANBARASU M, et al. Structural performance of cold-formed steel composite beams[J]. Steel and Composite Structures, 2018, 27(5): 545-554.
- [11] American Iron and Steel Institute. North American specification for the design of cold-formed steel structural members: AISI S100-12 [S]. Washington DC: American Iron and Steel Institute, 2012.
- [12] British Standard Institution. Structural use of steelwork in building-Part 5: Code of practice for design of cold formed thin gauge sections: BS 5950-5: 1998 [S]. London: British Standard Institution, 1998.
- [13] 徐芝伦. 弹性力学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [14] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京:清华大学, 1990.
XU Youlin. An experimental study of bond-anchorage properties of bars in concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.

(责任编辑 周 蓓)