

文章编号:0254-0096(2020)04-0007-07

固定式光伏支架承载能力试验研究

黄 华, 张 梅, 何银涛

(特变电工新疆新能源股份有限公司, 西安 710119)

摘 要: 为研究固定式光伏支架的承载能力及破坏形态,对足尺钢结构支架进行静力试验及有限元分析。结果表明:支架结构的破坏特征主要为挠度变形破坏,支架结构的承载能力主要由挠度变形控制。试验结果与有限元分析结果吻合较好,可为太阳能光伏电站的工程设计提供参考。

关键词: 钢结构; 冷弯薄壁型钢; 静力试验; 承载力; 破坏特征; 光伏支架

中图分类号: TK514

文献标志码: A

0 引 言

随着全球光伏发电市场的持续升温,截至 2019 年底,中国累计光伏并网装机容量达到 204.3 GW,新增光伏并网装机容量达到 30.1 GW,总装机量及新增装机量均为全球第一。在光伏电站建设中,固定式光伏支架的应用最为广泛,因此固定式光伏支架的结构可靠性直接影响光伏电站的安全。国内学者针对光伏支架在结构承载力仿真^[1]、结构稳定性^[2-3]方面进行了研究;国外学者针对光伏支架在光伏阵列风荷载^[4-5]、独立光伏结构风荷载实验^[6]方面研究较多。国内鲜有针对光伏支架足尺模型承载能力试验的研究。

因此,为了解固定式光伏支架结构的极限承载能力、构件共同工作机理及结构破坏形态,本文通过光伏支架足尺模型的结构静力试验以及数值仿真的方法,研究光伏固定式支架结构的实际承载能力,探寻影响其承载性能的控制参数,为固定式光伏支架的结构可靠性设计提供依据。

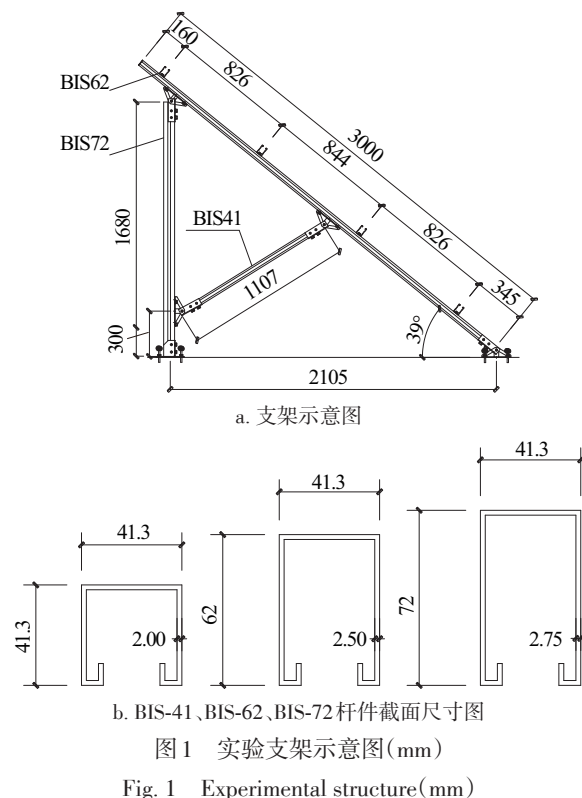
1 固定式光伏支架结构静力试验

本研究依托于特变电工新疆新能源股份有限公司“十二五”国家高技术研究发展(863)计划“百兆瓦级光伏系统设计集成技术研究及关键设备研制”项目,以该项目试验电站中的固定式光伏支架为试验对象,以电站所在地哈密地区的基本风压、基本雪压及光伏组件的自重为荷载输入条件,进行固定式光伏支架结构静力荷载

试验。试验在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点实验室中进行。

1.1 试验系统设计

如图 1 所示,固定式光伏支架结构一般由横向三角支架及纵向檩条构成。因此,光伏固定式支架结构静力实验足尺模型包含 2 个试件:试件 1(代号为 TS)为 2



收稿日期: 2017-09-22

基金项目: 国家高技术研究发展(863)计划(2011AA05A305)

通信作者: 黄 华(1983—), 男, 硕士、工程师, 主要从事光伏发电工程应用方向的研究。ice_68@qq.com

榑足尺三角支架;试件 2(代号为 TSB)为 2 榑足尺三角支架+4 根檩条。两试件各部件的截面尺寸及连接件均相同,区别在于 TSB 是在 TS 的基础上安装 4 根纵向檩条,从而组成完整(即由间距为 2.8 m 的 2 榑三角支架和 4 根檩条组成)的支架结构体系,支架及各杆件截面如图 1 所示。

1.2 试验加载装置

第 1 阶段试验研究 TS 的承载性能。设计并制作专用加载反力架和分配梁,TS 试验系统如图 2 所示。该试验支架为自平衡系统。支架实际所受风荷载简化为等效集中荷载,通过 1 个液压千斤顶及分配梁体系传递给试验支架,采用专用 3 t 液压千斤顶+5 t 荷载传感器液压加载系统分级施加荷载。千斤顶位置根据实际风荷载线性分布确定。加载采用荷载控制,直至三角架丧失承载能力。通过在杆件上布置应变片,监测杆件应变;在杆件、节点处布置位移计,监测杆件、支架的变形情况。数据采集装置使用日本东京测器公司的 TDS-602 数据采集仪。第 2 阶段试验研究 TSB 的承载性能,TSB 试验系统如图 3 所示。采用第 1 阶段试验所用分配梁,荷载加载方式、加载点、应力应变监测点等同第 1 阶段。

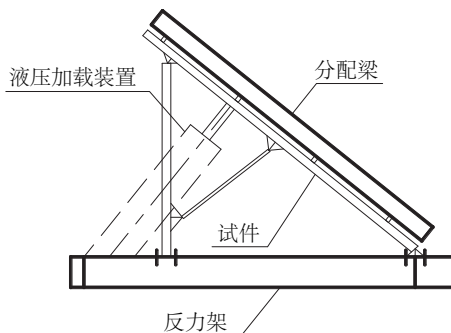


图2 TS试验示意图

Fig. 2 Experiment system of TS

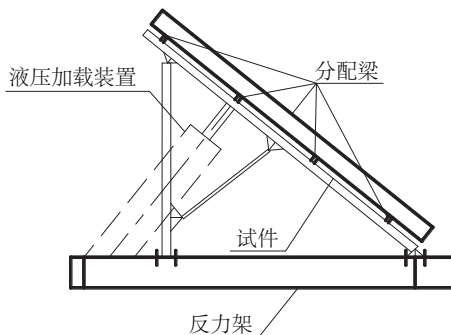


图3 TSB试验示意图

Fig. 3 Experiment system of TBS specimen

1.3 加载方案

加载方法采用荷载控制方法,直至结构丧失承载能力。试件屈服前采用分级加载,接近屈服荷载前减小荷载级差。在杆件上布置应变片,监测杆件应变;在支架杆件、节点处布置位移计,监测杆件、支架的变形情况。

TS、TSB 预估极限承载力为 9.2 和 2.8 kN。采用油泵控制台,通过荷载控制进行预加载,预加荷载为预估极限承载力的 10%~20%。预加荷载完成后卸载,然后正式加载。加载开始每级荷载 0.4 kN,实时采集数据。每级荷载加载完毕,维持荷载约 2 min,然后施加下一级荷载。每级荷载至少打点记录数据 1 次,当某级荷载下试件的位移、应变变化较大时,表明支架进入非线性状态,缓慢加载并对荷载、应变、位移等数据进行连续采集。

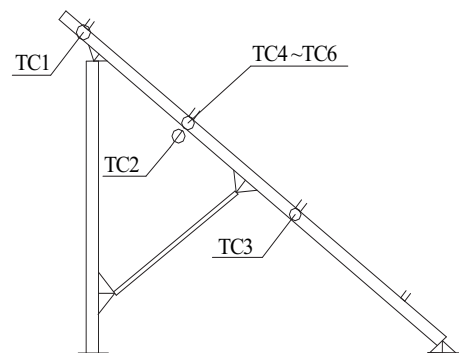
1.4 测量方案

本试验主要测试结构极限承载力、典型位置的位移、典型位置的应变、加载过程中试件的变形及破坏形态。试验数据采集系统由传感器、数据采集仪和计算机 3 个部分组成。位移、应变、荷载等指标均用电测传感器测量,数据采集采用全自动静态采集仪和相配套的数据采集系统。

1.4.1 位移测量

1)三角架挠度测量:采用 3 个量程为 ± 100 mm (TC1~TC3)的百分表架设于斜梁受荷点相应位置以测定三角架斜梁的挠度,测量方法及仪表布置如图 4 所示。

2)横梁挠度测量:采用 3 个量程为 ± 150 mm 的位移计沿千斤顶加载方向布置,以测定横梁挠度 (TC4~TC6),测量方法及仪表布置如图 5 所示。



a. 侧视图

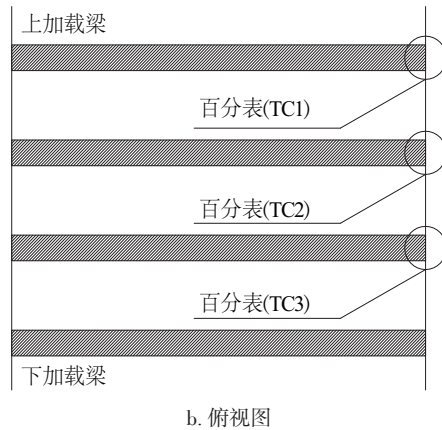


图4 位移计布置示意图

Fig. 4 Location of displacement meters

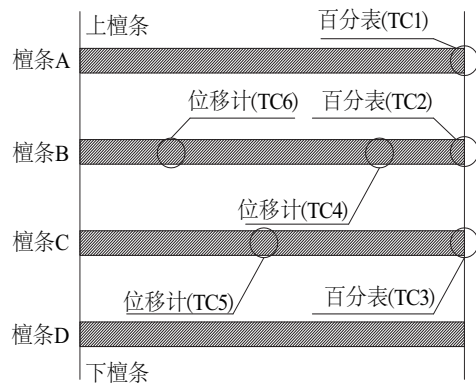


图5 位移计布置示意图(俯视图)

Fig. 5 Location of displacement meters (top view)

1.4.2 应变测量

1) 三角架应变: 为了解三角架在加载过程中的内力(轴力、弯矩、剪力)变化情况, 在三角架的节点连接点等关键位置布置应变片。

2) 檩条应变: 为了解檩条在加载过程中内力变化情况, 在檩条的关键位置布置应变片, 如图6、图7所示。

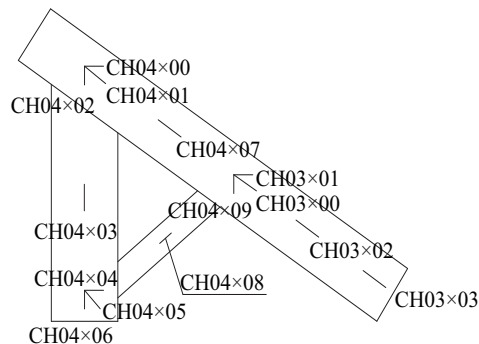


图6 TSB试件位移计布置示意图(侧视图)

Fig. 6 Location of displacement meters (side view)

CH05×06	CH05×09
CH05×07	CH01×08
CH05×08	CH01×09
CH05×00	CH05×03
CH05×01	CH05×04
CH05×02	CH05×05
CH08×04	CH08×07
CH08×05	CH08×08
CH08×06	CH08×09
CH03×04	CH03×07 (上翼缘, 余同)
CH03×05	CH03×08 (腹板, 余同)
CH03×06	CH03×09 (下翼缘, 余同)

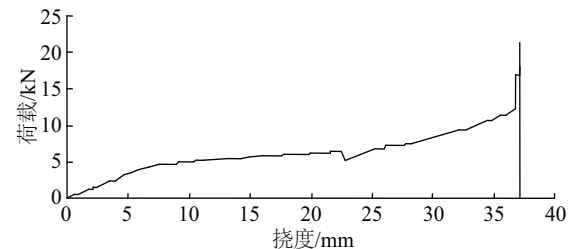
图7 试件TSB檩条应变片布置示意图

Fig. 7 Location of strain gages

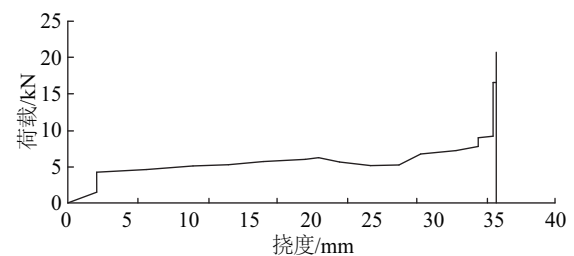
1.5 试验结果

1.5.1 TS 试验结果

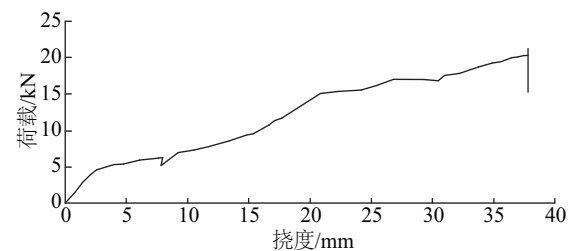
TS 的斜梁荷载-挠度曲线如图8所示。结构受力过程分为弹性阶段、弹塑性阶段和下降阶段3个阶段。由图8可知, 弹性阶段, 截面处于弹性状态, 螺栓连接无滑移, 荷载-挠度曲线基本为直线; 弹塑性阶段, 截面部



a. 1号百分表(CH00×06)



b. 2号百分表(CH00×05)

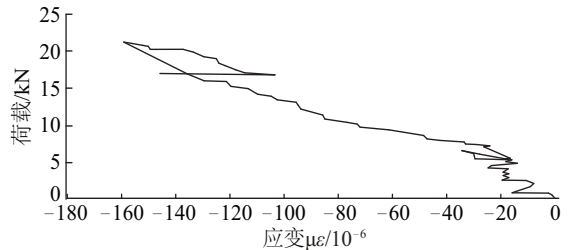


c. 3号百分表(CH00×04)

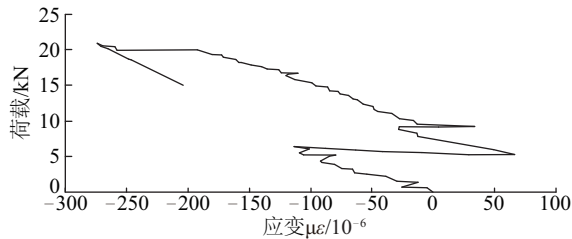
图8 斜梁荷载-挠度曲线

Fig. 8 Load-deflection curves

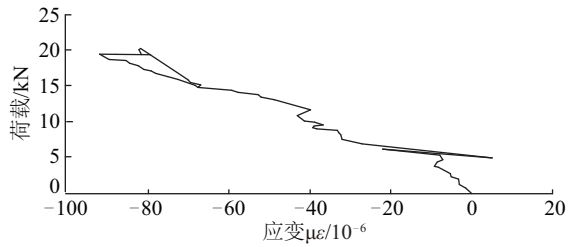
分进入塑性,斜梁螺栓连接部分出现滑移,但荷载仍呈上升趋势,曲线斜率发生明显变化,表现出非线性,刚度降低,挠度增加较快;斜梁变形严重,荷载呈下降趋势。檩条连接处荷载-应变曲线如图 9 所示。



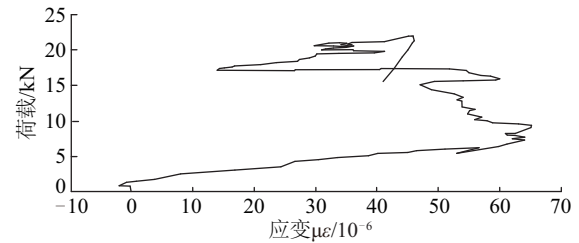
a. 檩条 A



b. 檩条 B



c. 檩条 C



d. 檩条 D

图 9 檩条连接处荷载-应变曲线

Fig. 9 Load-strain curves

由图 9 可知,斜梁的应变随荷载的增加基本呈线性发展。檩条 A、C 连接处的应变比檩条 B、D 处大,并且檩条 A、B、C 连接处均受压,而檩条 D 连接处受拉,均未发生屈服。

1.5.2 TSB 试验结果

TSB 的斜梁和檩条荷载-挠度曲线如图 10 所示。由图 10 可知,斜梁在挠度达到 25 mm 之前,荷载基本保持不变;之后随着位移的逐渐增加,荷载逐渐增大并且基本保持线性关系,表明此时结构处于弹性阶段。荷载继续增加,由于连接螺栓的滑脱,导致变形急剧增加而荷载有一定程度的下降,此时百分表达到量程上限并与试件脱离。由檩条荷载-位移曲线可知,整个加载过程,荷载与位移基本呈线性关系,即整个结构处于弹性阶段。由斜梁的荷载-位移曲线对比可知,檩条的位移量远大于斜梁的。最终,由于檩条的变形过大而导致整个结构达到承载能力极限状态。

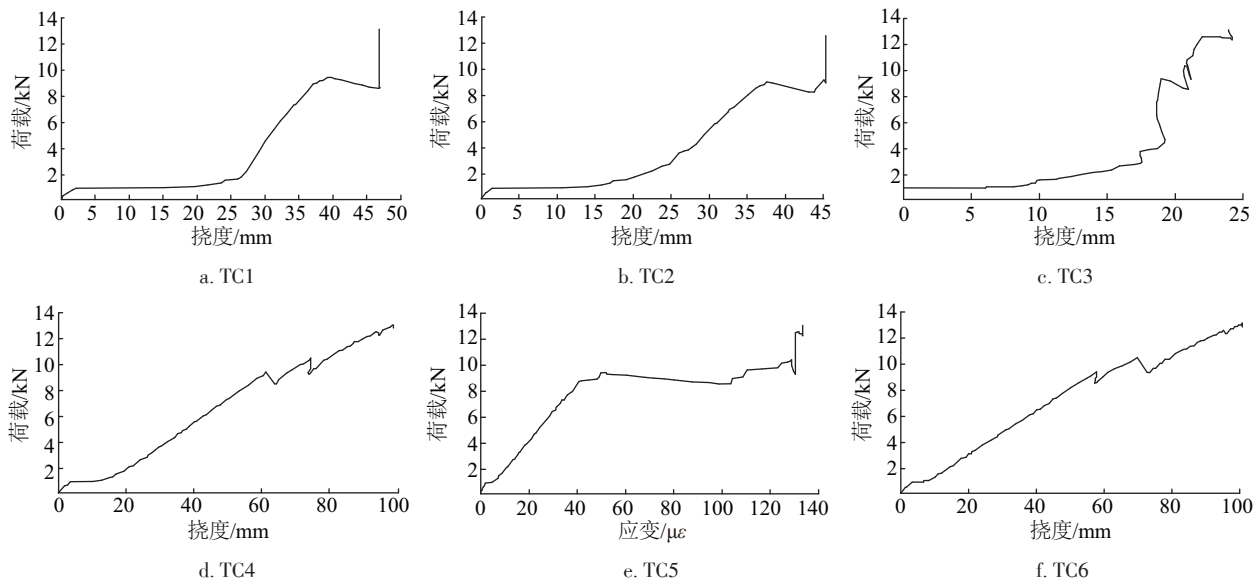
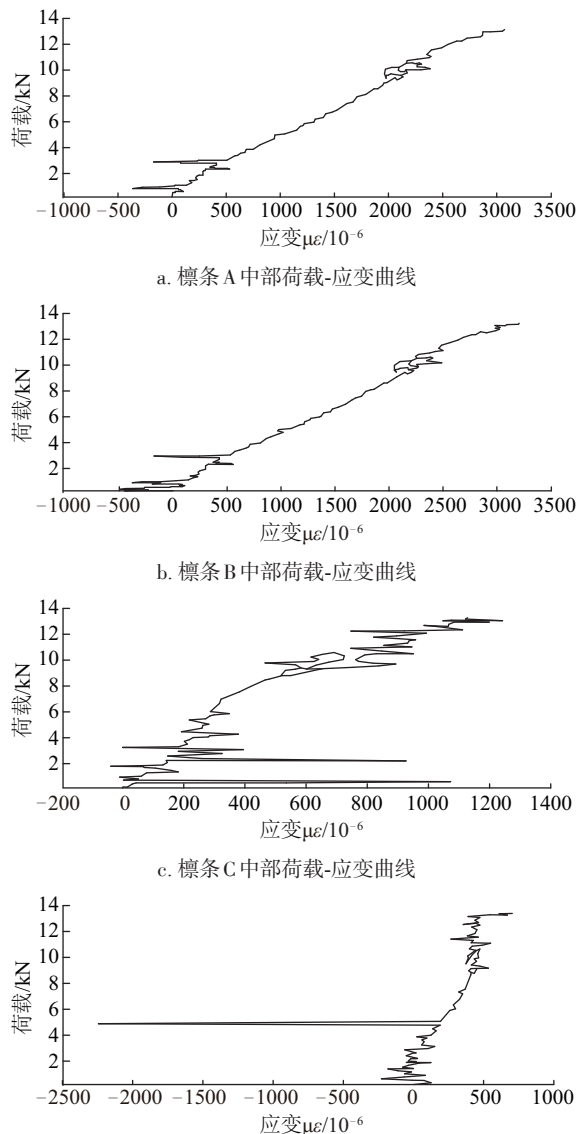


图 10 斜梁荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load - deflection curves

TCB 荷载-应变曲线如图 11 所示。由图 11 可知, TSB 的应变随荷载的增加基本呈线性发展且应变较小, 表明构件处于弹性阶段。4 根檩条中部应变随荷载的增加基本呈线性发展趋势, 但檩条 A、B 翼缘的应变远大于檩条 C、D 翼缘处; 由应变值可知, 檩条 A、B 的翼缘已进入塑形阶段, 而檩条 C、D 仍处于弹性阶段。



a. 檩条 A 中部荷载-应变曲线
b. 檩条 B 中部荷载-应变曲线
c. 檩条 C 中部荷载-应变曲线
d. 檩条 D 中部荷载-应变曲线
图 11 檩条荷载-应变曲线

Fig. 11 Load - strain curves

1.6 试验结论

结构的极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态。当结构构件或连接节点因材料强度不够而破坏, 或因过度变形而不适于继续承载时, 认为结构

达到其承载能力极限状态。在试验过程中, 试件构件或连接节点未发生明显强度破坏, 但荷载达到峰值, 其原因在于光伏支架的檩条或斜梁在达到极限荷载时变形过大而不适于继续承载, 即结构达到正常使用极限状态。

根据规范^[7-8], 在正常使用荷载下, 受弯构件的挠度允许值为: 主梁挠度不大于 $l/400$; 次梁挠度不大于 $l/250$; 檩条挠度不大于 $l/200$, 其中 l 为跨度。本试验中 2 个试件的跨度均为 2800 mm, 因此檩条最大允许挠度为 14 mm; 斜梁最大允许挠度为 7 mm。

2 固定式光伏支架结构有限元分析

采用国际通用结构分析与设计软件 SAP2000 对固定式光伏支架结构进行有限元仿真分析, 并将其结果与试验结果对比。有限元计算结果如表 1 所示, 试验与有限元对比结果如表 2 所示。

表 1 有限元计算结果

Table 1 Calculation result of finite element

试件编号		试验极限 位移/mm	有限元计算 位移/mm	试验极限 荷载/kN
TS	斜梁位移	37.2	30.6	21.22
TSB	檩条位移	100.0	81.8	13.16
	斜梁位移	47.0	38.1	

由表 1 可知, 有限元计算结果与试验结果吻合较好, 有限元分析达到预期要求。有限元计算结果与试验结果的比较表明, 在极限状态下, 有限元计算的位移比试验值偏小。其原因主要是因为, 在组装光伏支架结构时采用螺栓连接, 螺栓连接时拧紧程度不一, 导致试验结果偏大; 另一方面, 有限元计算未考虑试件几何缺陷的影响; 最后, 由于实际构件腹板开孔致使构件刚度降低, 变形增大, 而有限元计算未考虑试件开孔的影响。

表 2 试验与有限元对比结果

Table 2 Comparison of experiment and finite element

试件编号	试验 荷载/kN	有限元计算 荷载/kN	檩条 变形/mm
TSB	2.05	3.3	14

由表 2 可知, 当檩条达到变形限值 $l/200=14$ mm 时, 有限元计算荷载比试验值高约 61%, 由此可见, 有限元模型的刚度比实际刚度大很多。有限元计算结果如图 12 所示。由图 12 可知, 有限元分析得到的变形形态与试验结果吻合较好。柱子、斜撑和斜梁应力较小,

处于弹性阶段;4根檩条从上往下受力逐渐减小,上部2根檩条部分进入塑性阶段。试件最终破坏为檩条变形过大而不能继续承载。

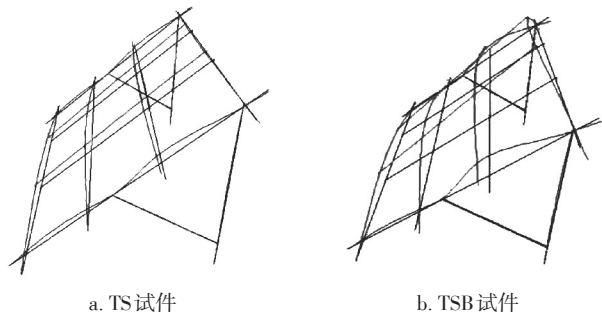


图 12 有限元计算结果图

Fig. 12 Calculation result of finite element

3 结 论

通过对 2 个试件(TS、TSB)的承载力试验研究和 SAP2000 有限元分析,得到以下主要结论:

1)试验结果表明,2 个试件未达到强度和稳定性的承载能力极限状态,但是由于变形过大而达到正常使用极限状态。

2)有限元分析结果表明,试验结果与有限元结果吻合较好,满足工程求。相比有限元分析结果,试验得到的结构承载力偏大,刚度偏小。试验试件正常使用极限状态的变形为 20 mm,按照规范^[7-8]要求换算的正常使用极限状态的变形为 14 mm,有限元分析结果高估结构刚度约 30%。原因在于:首先支架安装节点处的变形和滑动导致试验试件变形偏大;其次,实际杆件截面的开孔导致杆件刚度降低;最后,试验试件中的檩条为简支檩,其变形大于实际工程中支架连续檩条的变形。

3)综合试验和有限元分析结果,从结构变形的正常使用极限状态角度考虑,建议实际工程中,檩条截面应根据有限元设计结果适当增大结构构件截面,以满足结构正常使用极限状态下的刚度变形要求。

[参考文献]

- [1] 黄华,张梅,何银涛.基于SAP2000的光伏固定支架结构承载力分析[J].太阳能,2015(6):47-49.
HUANG H, ZHANG M, HE Y T. The analysis of bearing capacity of fixed solar bracket based on SAP 2000[J]. Solar energy, 2015(6): 47-49.
- [2] 明杰,刘志璋,王平.无地基状态下光伏支架的稳定性测试[J].太阳能学报,2012,33(12):2068-2073.
MING J, LIU Z Z, WANG P. Exploration of PV bracket without foundation[J]. Acta energiae solaris sinica, 2012, 33(12): 2068-2073.
- [3] 郭小农,王昆,赵宪忠,等.光伏支架柱平面内有侧移失稳计算长度系数研究[J].力学季刊,2015(3):502-508.
GUO X N, WANG K, ZHAO X Z, et al. The study for effective length coefficient of in-plane sway buckling of the lateral displacement of the PV column[J]. Chinese quarterly of mechanics, 2015(3): 502-508.
- [4] WARSIDO W P, BITSUAMLAK G T, BARATA J, et al. Influence of spacing parameters on the wind loading of solar array[J]. Journal of fluids & structures, 2014, 48: 295-315.
- [5] KOPP G A, SURRY D, CHEN K. Wind loads on a solar array[J]. Wind & structures, 2002(5): 393-405.
- [6] ABIOLA-OGEDENGBE A, HANGAN H, SIDDIQUI K. Experimental investigation of wind effects on a standalone photovoltaic (PV) module[J]. Renewable energy, 2015, 78: 657-665.
- [7] GB 50797—2012, 光伏电站设计规范[S].
GB 50797—2012, Code for design of photovoltaic power station[S].
- [8] GB 50009—2012, 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2012, Load code for design of building structure[S].

EXPERIMENTAL STUDY ON LOAD-CARRYING CAPACITY OF FIXED PHOTOVOLTAIC BRACKET

Huang Hua, Zhang Mei, He Yintao

(Tbea Xinjiang Sunoasis Co., Ltd., Xi'an 710119, China)

Abstract: To investigate the bearing capacity and failure characteristic of the fixed photovoltaic bracket, the static tests and the finite element simulation of the full-size brackets were conducted. The results indicate that the failure characteristic of the fixed photovoltaic bracket is mainly the deflection deformation, which shows that the bearing capacity is controlled by the deflection deformation. The experimental data agree well with the predicted results of finite element analysis which can supply references for engineering design of solar energy station.

Keywords: steel structure; cold-formed thin-walled steel section; static test; load-carrying capacity; failure characteristic; PV bracket