

# 双剪拼接角钢主材的轴心受压试验研究

李杰<sup>1</sup>, 何松洋<sup>2\*</sup>, 李正良<sup>3</sup>, 王锐<sup>1</sup>, 蒲劭彤<sup>1</sup>, 黄兴<sup>2</sup>, 鄢秀庆<sup>2</sup>

(1. 陕西送变电工程有限公司, 西安 710003; 2. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 成都 610056; 3. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 通过10组轴压试验对双剪拼接角钢主材的轴心受力性能进行了研究, 探究了不同节点螺栓连接长度(120 mm、180 mm、240 mm)和包钢面积比(1.08、1.22、1.31)对拼接角钢主材轴心受力性能的影响, 从试验构件的受压极限破坏模式、极限承载力和荷载-位移曲线三个方面展开了对比分析, 研究表明: 当角钢主材无拼接节点时, 其轴压极限破坏模式表现为跨中截面处发生绕主轴的弯扭屈曲破坏, 平面外变形最大, 扭转变形小; 当角钢主材采用双剪拼接节点时, 其轴压极限破坏模式分为两种情况: 当双剪拼接节点处螺栓连接长度不大于120 mm或包钢面积比为1.08时, 拼接角钢主材的受压破坏模式以跨中截面弯扭屈曲为主, 且伴随有拼接节点破坏; 当双剪拼接节点处螺栓连接长度大于120 mm且包钢面积比大于1.08时, 拼接角钢主材的受压破坏模式为跨中靠近节点处弯扭屈曲与斜材处局部屈曲的耦合破坏。结合试验结果对规范现有计算方法进行了论证分析, 给出了L125×10角钢主材的构造设计建议, 该研究结论有利于推动输电线路结构设计技术的发展, 为输电线路结构设计规范的编制完善奠定了技术基础。

**关键词:** 输电塔结构; 角钢主材; 双剪拼接节点; 包钢面积比; 试验研究; 计算方法

中图分类号: TU391; TM75

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)05-0048-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231122001

## Experimental Study on Axial Compression Behavior of Angle Steel Main Members with Double-Shear Splicing Joints

LI Jie<sup>1</sup>, HE Songyang<sup>2\*</sup>, LI Zhengliang<sup>3</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, PU Shaotong<sup>1</sup>,  
HUANG Xing<sup>2</sup>, YAN Xiuqing<sup>2</sup>

(1. Shaanxi Power Transmission and Transformation Engineering Co., Ltd., Xi'an 710003, China; 2. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610056, China;  
3. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

\*Corresponding author: 2667448642@qq.com

**Abstract:** The mechanical properties of the axial compression members of the double-shear splicing main members were studied through 10 sets of axial compression tests. The effects of different bolt connection lengths (120 mm, 180 mm and 240mm) and steel-clad area ratios (1.08, 1.22 and 1.31) were investigated. The ultimate failure mode, ultimate bearing capacity and load-displacement curve of the test members were compared and analyzed. The experimental results show that the ultimate failure mode of the angle steel main members without splicing joints is the flexural-torsional buckling failure around the main axis at the mid-span section, and the out-of-plane deformation is the largest

收稿日期: 2023-11-22

基金项目: 国家自然科学基金(51508054)

作者简介:

李杰(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事输电线路施工及技术管理的研究。E-mail: 66175035@qq.com。

通信作者:

何松洋(1995—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事输电塔结构计算理论和结构设计方面的研究。E-mail: 2667448642@qq.com。

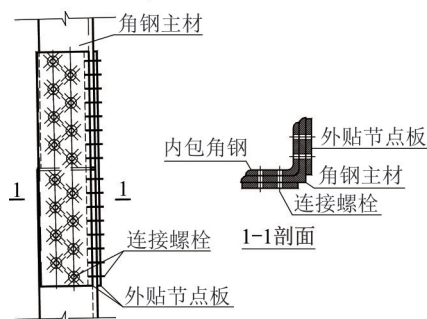
and the torsional deformation is small. When the angle steel main member adopts the double-shear splicing joint, the axial compression ultimate failure mode is divided into two cases: when the bolt connection length at the double-shear splicing joint is not more than 120 mm or the steel-clad area ratio is 1.08, the compression failure mode of the main member is mainly mid-span cross-section flexural-torsional buckling, accompanied by the failure of the splicing joint. When the bolt connection length is greater than 120 mm and steel-clad area ratio is greater than 1.08, the compression failure mode of the splicing main member is the coupling failure of the flexural-torsional buckling at the mid-span near the joint and the local buckling at the inclined member. Combined with the test results, the existing calculation methods of the standards are demonstrated and analyzed, and the structural design suggestions of L125×10 angle steel main member are given. The research conclusions are conducive to promoting the development of transmission line structure design technology and laying a technical foundation for the compilation and improvement of transmission line structure design specifications.

**Keywords:** transmission tower structure; main member of angle steel; double-shear splicing joint; steel-clad area ratio; experimental study; calculation method

电力是关系到国家发展与人民生活的重要资源,保证电力运行的安全稳定对我国的经济和社会发展具有重要意义。输电塔作为电网输送的核心支撑结构,其重要性不言而喻,对于超高压、特高压输电塔,其塔身往往可以达到几十米高甚至上百米高,角钢主材的长度较长。但受限于现有的运输条件和构件自身的抗弯刚度,工程中单个塔身节间的长度一般不大于12 m,角钢主材通常要采用双剪拼接节点才能实现塔身主材的连接(如图1所示),且节点数量十分庞大,双剪拼接节点作为输电塔主要受力构件的连接节点,主要由角钢主材、内包角钢和外贴节点板共同组成,是一种双剪连接,也是支撑输电塔的关键核心节点,具有较高的研究价值。



a) 现场示意图



b) 构造示意图

图1 输电塔主材的双剪拼接节点

Fig. 1 Double-shear splicing joint for main members of transmission tower

目前,学者们在输电线路角钢主材的承载力领域做了一些研究,主要集中在单角钢受压承载力计算<sup>[1-4]</sup>、十字形和T形组合角钢受压承载力计算<sup>[5-9]</sup>、交叉斜材承载力计算<sup>[10-12]</sup>、角钢主材的转换节点受压承载力计算<sup>[13]</sup>和双剪拼接节点的螺栓受剪承载力计算<sup>[14]</sup>等方面,提出了角钢构件在不同约束条件下的承载力计算方法、承压型转换节点承载力计算方法和双剪拼接节点不均匀受剪计算方法等理论算法,推动了输电线路结构设计技术的进步,但均没有对角钢主材采用双剪拼接节点时的承载力进行研究,规程规范<sup>[15]</sup>也没有给出明确的条文说明,工程设计中多通过构造设计对其安全性进行控制,其轴压承载力的可靠性无法得到有效评价,存在较大的局限性。

因此,本文通过试验对角钢主材采用双剪拼接节点时的轴压受力性能进行了研究,对比分析了不同节点螺栓连接长度和包钢面积比对其受力性能的影响,结合试验结果对现有规范轴压承载力算法进行了论证分析,给出了双剪拼接角钢主材的构造设计建议。(为了便于理解,后文中“双剪拼接角钢主材”简称为“拼接角钢主材”,“不含双剪拼接节点的主材”简称“无拼接角钢主材”)

## 1 试验方案

### 1.1 试验设计

选取某典型角钢塔的一个塔身节间作为研究对象,如图2所示。

选取30根Q355 L125×10角钢主材构件进行试验,为了保证斜材对主材的有效支撑,依据规范<sup>[15]</sup>第5.1.6条按照3%的主材承载力对斜材最小轴失稳强度进行验算,计算得到斜材选用Q355 L63×5角钢构件可以保证对主材的支撑效果,连接螺栓采用6.8级M20螺栓。

单肢连接螺栓数量分别选取3颗、4颗和5颗,螺旋间距取标准间距60 mm,对应的螺栓连接长度分别为

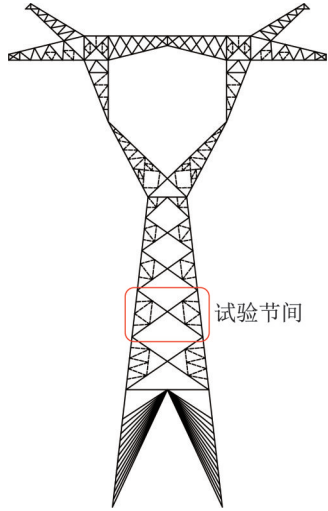


图2 典型角钢塔节间示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the section of a typical angle steel tower

和1.31,具体试验工况信息如表1所示。

双剪拼接节点的包钢面积比 $\eta$ 按照下式进行计算:

$$\eta = \frac{A_1 f_{y1} + A_2 f_{y2}}{A f_y} \quad (1)$$

式中: $A_1$ 为内包角钢的截面面积; $f_{y1}$ 为内包角钢的屈服强度; $A_2$ 为外贴节点板的截面面积; $f_{y2}$ 为外贴节点板的屈服强度; $A$ 为角钢主材的截面面积; $f_y$ 为角钢主材的屈服强度。

为了模拟角钢主材受斜材的双向支撑约束,在试验中设置两个正交方向上的斜材支撑,加载示意如图3所示。

### 1.2 材性试验

试验主材、包钢、外贴节点板、斜材均采用Q355材质,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>[16]</sup>将试样加工成标准件并进行拉伸试验,材性试验如图4所示。

120 mm、180 mm、240 mm,包钢面积比分别为1.08、1.22

表1 试验工况信息

Table 1 Test load case information

序号	试件编号	材质	主材规格	斜材规格	内包角钢规格	外贴节点板	长细比	L/mm	包钢面积比	螺栓间距/mm	单肢螺栓数量	构件数量
1	A1	Q355	└125×10	L63×5	L100×7	-6×105	55	1 364	—	—	—	3
2	A2	Q355	└125×10	L63×5	L100×7	-6×105	55	1 364	1.08	50	3	3
3	A3	Q355	└125×10	L63×5	L110×8	-6×105	55	1 364	1.22	50	3	3
4	A4	Q355	└125×10	L63×5	L110×7	-8×105	55	1 364	1.31	50	3	3
5	A5	Q355	└125×10	L63×5	L100×7	-6×105	55	1 364	1.08	50	4	3
6	A6	Q355	└125×10	L63×5	L110×8	-6×105	55	1 364	1.22	50	4	3
7	A7	Q355	└125×10	L63×5	L110×7	-8×105	55	1 364	1.31	50	4	3
8	A8	Q355	└125×10	L63×5	L100×7	-6×105	55	1 364	1.08	50	5	3
9	A9	Q355	└125×10	L63×5	L110×8	-6×105	55	1 364	1.22	50	5	3
10	A10	Q355	└125×10	L63×5	L110×7	-8×105	55	1 364	1.31	50	5	3

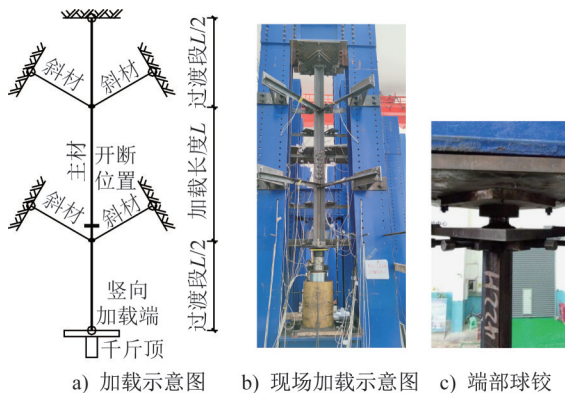


图3 试验加载示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental loading setup

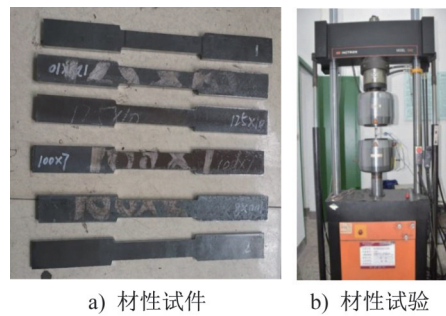


图4 材性试验现场

Fig. 4 Material property test site

各试验工况下的材性试验结果平均值如表2所示。

表2 材性试验结果

Table 2 Material test results

试件编号	$E/MPa$	$f_y/MPa$	$f_u/MPa$	$\delta/\%$
A1	191 658.43	403.32	564.07	13.64
A2	195 905.39	387.48	572.23	13.08
A3	194 488.33	385.53	584.15	14.89
A4	200 873.65	399.36	574.07	15.71
A5	197 855.67	395.78	545.17	14.42
A6	208 731.47	411.08	565.07	13.49
A7	196 445.58	397.44	559.72	14.46
A8	206 869.91	400.28	559.37	15.04
A9	203 003.41	378.65	538.19	14.91
A10	201 409.92	397.88	552.18	14.29
斜材	202 798.48	403.32	564.07	13.64
包钢 L100×7	194 735.94	391.41	563.42	14.65
包钢 L100×8	203 654.17	403.27	571.01	14.82
包钢 L110×8	199 195.06	397.34	567.22	14.74

材性试验表明,各构件钢材具有明显的屈服台阶,屈服后强化阶段较明显,其弹性模量与名义弹性模量接近,屈服强度、抗拉强度均比名义强度高。

### 1.3 测点布置

采用位移计和应变片测定加载过程中角钢主材的位移和应变,主材的测定截面设置在主材的跨中截面和2/3跨截面;在主材跨中截面处布置4个位移计,分别是距肢边20 mm处和距肢背40 mm处;在2/3跨截面处分别布置两个位移计,布置在角钢形心位置,测得控制截面的平面外变形。同时,在千斤顶加载位置布置一个位移计,用于测定角钢主材的轴向变形,位移测点布置示意图如图5所示。

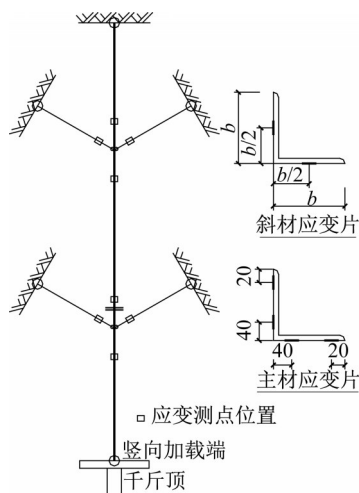


图5 位移测点布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of displacement measurement arrangement

在主材的跨中截面和2/3跨截面处,以及两端延伸段的1/3跨截面处分别设置4个应变测点,每肢各两个,设置位置跟位移测点一致,以获得其轴向应变。在每根斜撑距主材1/4跨位置设置两个应变片,每肢各一个,应变测点布置图如图6所示。

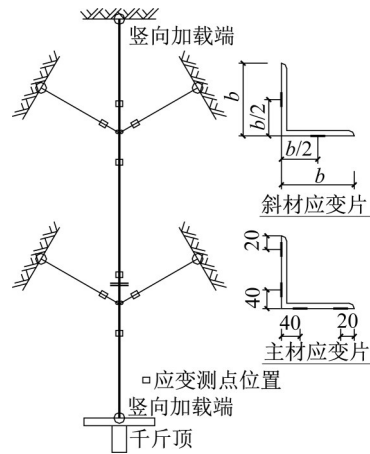


图6 应变测点布置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of strain measurement point arrangement

### 1.4 试验结果

从试验构件的受压极限破坏模式、极限承载力和荷载-位移曲线三个方面对试验结果进行说明。

#### 1.4.1 极限破坏模式

##### 1) 无拼接角钢主材的极限破坏模式

构件无拼接时,L125×10角钢的受压极限破坏情况如图7所示。

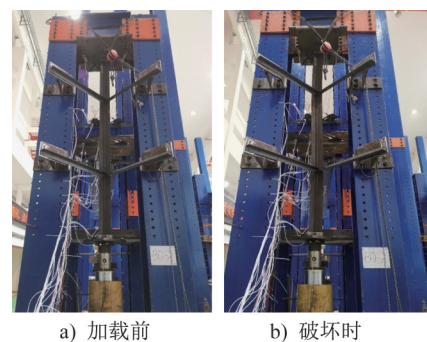


图7 L125×10角钢无拼接情况下受压极限破坏情况  
Fig. 7 Ultimate failure of L125×10 angle steel under compression without broken

图7表明,L125×10构件无拼接时,受压极限破坏时,主材在接近跨中截面处发生了绕截面最小轴的弯扭屈曲破坏,平面外变形较大,由于存在斜材的约束,跨中截面处的扭转变形较小。

## 2) 拼接角钢主材的极限破坏模式

拼接角钢主材的受压破坏模式与无拼接时的破坏模式不同,主要与双剪拼接节点的连接刚度有关,当双剪拼接节点的螺栓连接长度较短、包钢面积比较小时,拼接节点的刚度小于等于主材构件的整体刚度,其破坏模式与无拼接构件受压破坏相似,破坏发生在跨中截面附近,主要表现为跨中截面弯曲,同时伴随有局部扭转,同时由于拼接节点变成了整根构件的最薄弱点,因此拼接节点也会发生破坏,如图8所示。

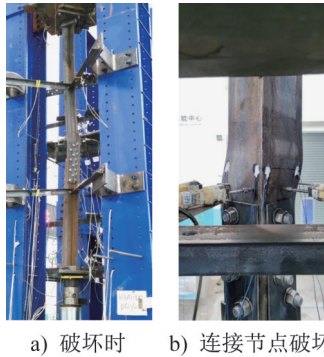


图8 L125×10角钢跨中截面处弯扭屈曲破坏

Fig. 8 Bending and torsional buckling failure at the mid span section of L125×10 angle steel

当双剪拼接节点的螺栓连接长度较长、包钢面积比较大时,拼接节点的刚度将会大于构件的整体刚度,会提高主材整体的抗弯能力,理论上其弯扭变形主要发生在跨中截面上部,但由于拼接节点在受压时,螺栓孔处会发生滑移,更容易变形,所以最后受压破坏时,跨中截面靠近拼接节点处会发生弯扭屈曲,进而导致斜材约束处也发生了局部屈曲,形成一种耦合破坏,如图9所示。

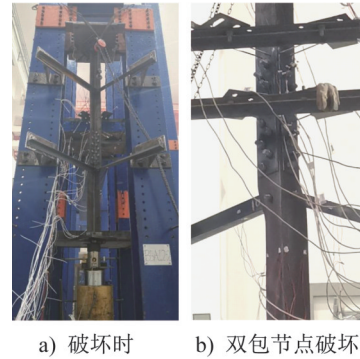


图9 L125×10角钢受压耦合破坏

Fig. 9 Coupling failure of L125×10 angle steel under compression

试验构件的破坏模式如表3所示。

表3 试件破坏模式汇总

Table 3 Summary of failure modes of specimens

序号	试件编号	单肢螺栓数	包钢面积比	破坏模式
1	A1	—	—	跨中弯曲屈曲
2	A2	3	1.08	跨中弯扭屈曲,拼接节点破坏
3	A3	3	1.22	跨中弯扭屈曲,拼接节点破坏
4	A4	3	1.31	跨中弯扭屈曲,拼接节点破坏
5	A5	4	1.08	跨中弯扭屈曲,拼接节点破坏
6	A6	4	1.22	跨中靠近节点处弯扭屈曲、斜材处局部屈曲
7	A7	4	1.31	跨中靠近节点处弯扭屈曲、斜材处局部屈曲
8	A8	5	1.08	跨中弯扭屈曲,拼接节点破坏
9	A9	5	1.22	跨中靠近节点处弯扭屈曲、斜材处局部屈曲
10	A10	5	1.31	跨中靠近节点处弯扭屈曲、斜材处局部屈曲

表3表明,当双剪拼接节点处螺栓连接长度不大于120 mm或包钢面积比为1.08时,由于节点的整体刚度相对较小,拼接角钢主材的受压破坏模式以跨中截面弯扭屈曲为主,且伴随有拼接节点破坏;当螺栓连接长度大于120 mm且包钢面积比大于1.08时,拼接角钢主材的受压破坏模式表现为跨中靠近节点处弯扭屈曲与斜材处局部屈曲的耦合破坏模式。

## 1.4.2 极限承载力

30根试件的极限承载力如表4所示。

从表4可以看出,拼接角钢主材的极限承载力随着螺栓连接长度和包钢面积比的增加而增加;当螺栓连接长度小于180 mm或包钢面积比不大于1.22时,拼接角钢主材的受压极限承载力较无拼接角钢主材小;当螺栓连接长度不小于180 mm且包钢面积比达到1.31时,拼接角

表4 试件极限承载力汇总  
Table 4 Ultimate bearing capacity summary of specimens

工况序号	试件编号	螺栓连接长度/mm	包钢面积比	$N_0$ /kN	$N_{0,avg}$ /kN	$N_l$ /kN	$\beta$
1	A1-1	—	—	803.74			
	A1-2	—	—	780.17	796.14	709.15	1.12
	A1-3	—	—	804.50			
2	A2-1	120	1.08	687.46			
	A2-2	120	1.08	703.57	705.58	709.50	0.99
	A2-3	120	1.08	725.71			
3	A3-1	120	1.22	735.43			
	A3-2	120	1.22	715.39	713.63	709.50	1.01
	A3-3	120	1.22	690.07			
4	A4-1	120	1.31	714.43			
	A4-2	120	1.31	715.89	715.39	709.50	1.01
	A4-3	120	1.31	715.84			
5	A5-1	180	1.08	709.79			
	A5-2	180	1.08	769.51	748.62	709.50	1.06
	A5-3	180	1.08	766.57			
6	A6-1	180	1.22	792.26			
	A6-2	180	1.22	783.16	784.94	709.50	1.11
	A6-3	180	1.22	779.39			
7	A7-1	180	1.31	813.21			
	A7-2	180	1.31	798.68	803.66	709.50	1.13
	A7-3	180	1.31	799.08			
8	A8-1	240	1.08	776.47			
	A8-2	240	1.08	769.37	767.18	709.50	1.08
	A8-3	240	1.08	755.70			
9	A9-1	240	1.22	783.37			
	A9-2	240	1.22	815.83	795.19	709.50	1.12
	A9-3	240	1.22	786.36			
10	A10-1	240	1.31	815.68			
	A10-2	240	1.31	821.40	820.54	709.50	1.16
	A10-3	240	1.31	824.53			

注: $N_0$ 为主材破坏时试验极限承载力; $N_{0,avg}$ 为每组构件3根试验构件极限承载力均值; $N_l$ 为构件按照2.1节计算得到的理论承载力; $\beta = N_{0,avg}/N_l$ 。

钢主材的受压极限承载力较无拼接角钢主材大。主材的极限承载力随螺栓连接长度和包钢面积比的变化规律如图10~11所示。

#### 1.4.3 荷载-位移曲线

试验得到主材加载过程中的荷载-位移曲线如图12

所示。

图12表明,不同试验工况下主材的荷载-位移曲线发展规律相似,加载前期,不同工况下主材的轴向位移都有一段平滑爬升段,这主要是由于加载装置的机械间隙产生的;与无拼接角钢主材相比,拼接角钢主材屈服前的荷载-位移曲线存在斜率变化,主要是由于拼接节点处的

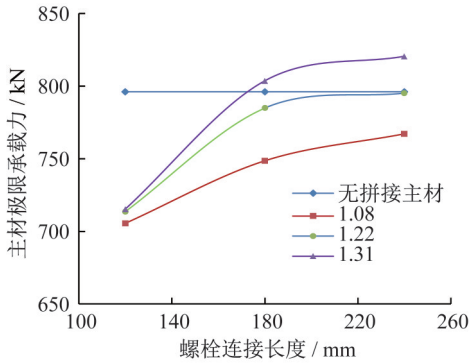


图 10 主材极限承载力随螺栓连接长度变化

Fig. 10 The ultimate bearing capacity of the main members varying with the bolt connection length

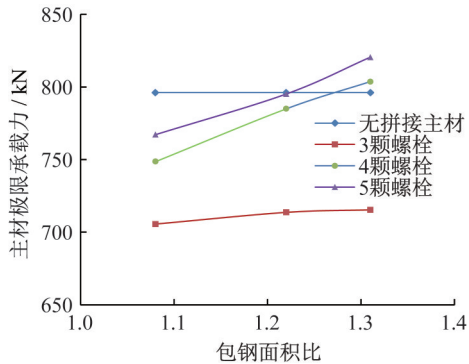


图 11 主材极限承载力随包钢面积比变化

Fig. 11 The variation pattern of the ultimate bearing capacity of the main members with the steel-clad area ratio

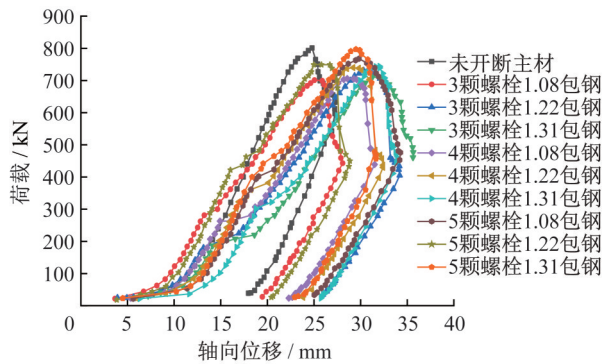


图 12 主材荷载-位移曲线

Fig. 12 Load-displacement curves of main components

螺栓发生了滑移,进而导致斜率发生变化;但无拼接角钢主材和拼接角钢主材在受压时的轴向位移变形整体发展规律相似,均在加载到极限破坏后,轴向位移会继续增加,但由于此时构件已经破坏,荷载无法提升,直至最后卸载,拼接角钢主材的最终轴向位移比无拼接角钢主材要大,主要是由于构件在破坏后,其双剪拼接节点处的螺栓仍存在滑移和二次变形,进而导致其轴向位移变形较无拼接角钢主材更大。

## 2 轴压稳定承载力计算方法

### 2.1 理论计算方法

结合《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》(DL/T 5154—2012)<sup>[15]</sup>第6节的角钢受压稳定承载力的相关要求,拼接角钢主材的轴压稳定承载力可以按照下式进行计算:

$$\frac{N}{\varphi A} \leq \frac{m_N f_y}{\gamma_R} \quad (2)$$

式中: $N$ 为构件承受的轴压力; $\varphi$ 为构件的稳定系数,按照b类截面进行计算; $A$ 为构件的毛截面面积; $\gamma_R$ 为材料分项系数,Q355取1.15,Q420取1.125; $f_y$ 为屈服强度; $m_N$ 为压杆稳定强度折减系数,按照下式进行计算:

$$\text{当 } \frac{w}{t} \leq \eta_c \text{ 时:}$$

$$m_N = 1.0 \quad (3)$$

$$\text{当 } \frac{w}{t} > \eta_c \text{ 时:}$$

$$m_N = 1.677 - 0.677 \frac{w}{t \eta_c} \quad (4)$$

对受压构件:

$$\eta_c = 13 \sqrt{\frac{235}{\varphi f_y}} \quad (5)$$

式中: $w$ 为角钢构件单肢自由外伸宽度; $t$ 为角钢肢厚; $\eta_c$ 为角钢宽厚比判断系数。 $w$ 按照下式进行计算:

$$w = b - r - t \quad (6)$$

式中: $b$ 为角钢肢宽; $r$ 为角钢r弧半径。

### 2.2 计算方法验证

结合式(2)~(6)对10组试验构件的轴压稳定承载力进行计算,由于要与试验同条件对比,在此不考虑式(2)中的材料分项系数,计算结果如表4所示。

由表4对比得出,采用规范计算方法得到的理论承载力与试验承载力的比值在0.99~1.16区间,故该计算方法能够较好地预测无拼接角钢主材和拼接角钢主材的轴压稳定承载力;当螺栓连接长度不小于180 mm且包钢面积比达到1.31时,规范计算方法较试验结果具有10%以上的承载力裕度。

由此可以得到角钢主材采用双剪拼接节点时的构造设计建议:L125×10角钢主材采用双剪拼接节点时,要保证其受压承载力不低于无拼接状态,螺栓连接长度不应低于180 mm,且包钢面积比不应低于1.31。

## 3 结论

本文通过10组角钢主材的轴心受压试验对拼接角钢主材的轴压性能进行了研究,结合试验结果论证了规范理论算法的有效性,并给出了L125×10角钢主材采用双剪拼接节点的构造建议。具体研究结论如下:

(1) 角钢主材无拼接节点时,其轴压极限破坏模式表现为跨中截面处发生绕主轴的弯扭屈曲破坏,平面外变形最大,扭转变形小;当角钢主材采用双剪拼接节点时,其轴压极限破坏模式分为两种情况:当双剪拼接节点处螺栓连接长度不大于120 mm或包钢面积比为1.08时,由于节点的整体刚度相对较小,拼接角钢主材的受压破坏模式以跨中截面弯扭屈曲为主,且伴随有拼接节点破坏;当螺栓连接长度大于120 mm且包钢面积比大于1.08时,拼接角钢主材的受压破坏模式表现为跨中靠近节点处弯扭屈曲与斜材处局部屈曲的耦合破坏。

(2) 不同试验工况下主材的荷载-位移曲线发展规律相似,与无拼接角钢主材相比,拼接角钢主材的最终轴向位移比无拼接角钢主材大。

(3) 拼接角钢主材的极限承载力随着螺栓连接长度和包钢面积比增加而增加,当螺栓连接长度小于180 mm或包钢面积比不大于1.22时,拼接角钢主材的受压极限承载力较无拼接角钢主材的受压极限承载力小;当螺栓连接长度不小于180 mm且包钢面积比达到1.31时,拼接角钢主材的受压极限承载力较无拼接角钢主材的受压极限承载力大;L125×10角钢主材采用双剪拼接节点时,要保证其受压承载力不低于无拼接状态,螺栓连接长度不应低于180 mm,且包钢面积比不应低于1.31。

## 参考文献

- [1] 李军阔, 郜帆, 刘春城, 等. 输电塔倒塌失效模式和主材角钢加固方法研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(5): 139-148. DOI:10.13577/j.jnd.2023.0514.
- LI Junkuo, GAO Fan, LIU Chuncheng, et al. Study on failure modes and retrofitting method for leg members of transmission tower[J]. Journal of Natural Disasters, 2023, 32(5): 139-148. DOI:10.13577/j.jnd.2023.0514. (in Chinese)
- [2] 谭晓哲, 宋卓彦, 金瑶, 等. 局部锈蚀单角钢轴心受压稳定承载力分析[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2022, 25(5): 13-19. DOI:10.3969/j.issn.1008-3162.2022.05.004.
- TAN Xiaozhe, SONG Zhuoyan, JIN Yao, et al. Analysis of stability capacity of locally corroded single angle members under axial compression [J]. Journal of Shandong Electric Power College, 2022, 25(5): 13-19. DOI:10.3969/j.issn.1008-3162.2022.05.004. (in Chinese)
- [3] 杨瑾晖. 输电塔角钢构件极限承载力与计算方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- YANG Jinhui. Research on ultimate bearing capacity and calculation method of angle steel members of transmission tower [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021. (in Chinese)
- [4] 江文强, 陈欣阳, 刘景立, 等. 含螺栓连接输电铁塔主材的承载性能研究[J]. 中国工程机械学报, 2021, 19(6): 471-476. DOI:10.15999/j.cnki.311926.2021.06.004.
- JIANG Wenqiang, CHEN Xinyang, LIU Jingli, et al. Study on bearing capacity of transmission tower main leg with bolted joints[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2021, 19(6): 471-476. DOI: 10.15999/j.cnki.311926.2021.06.004. (in Chinese)
- [5] 梁刚, 李桂花, 耿娜娜, 等. 基于新型夹具的双角钢十字组合构件偏压承载力研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(6): 113-124. DOI:10.13577/j.jnd.2022.0612.
- LIANG Gang, LI Guihua, GENG Nana, et al. Study on eccentric bearing capacity of double-angle steel cross compression member with innovative clamp[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(6): 113-124. DOI:10.13577/j.jnd.2022.0612. (in Chinese)
- [6] 冯勇, 肖兵, 黎亮, 等. 真型输电塔无填板十字型组合角钢构件的受力性能研究[J]. 特种结构, 2022, 39(2): 51-56. DOI:10.19786/j.tzjg.2022.02.008.
- FENG Yong, XIAO Bing, LI Liang, et al. Mechanical properties of the cross-shaped multiple angle steel members without filler plate based on full-scale test[J]. Special Structures, 2022, 39(2): 51-56. DOI:10.19786/j.tzjg.2022.02.008. (in Chinese)
- [7] 王智飞, 苏京伟, 张遨宇, 等. 输电铁塔十字组合角钢主材稳定承载力研究[J]. 钢结构, 2015, 30(2): 22-25, 56. DOI:10.13206/j.gjg.201502005.
- WANG Zhifei, SU Jingwei, ZHANG Aoyu, et al. Research on compression stability bearing capability of cross combined angle steel of transmission tower[J]. Steel Construction, 2015, 30(2): 22-25, 56. DOI:10.13206/j.gjg.201502005. (in Chinese)
- [8] 刘云贺, 辛振科, 梁刚, 等. 角钢T形组合截面压弯构件受力性能试验研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(24): 57-63. DOI:10.19701/j.jzjg.20201381.
- LIU Yunhe, XIN Zhenke, LIANG Gang, et al. Experimental study on mechanical behavior of angle steel T-shaped composite area press-bending members [J]. Building Structure, 2022, 52(24): 57-63. DOI:10.19701/j.jzjg.20201381. (in Chinese)
- [9] 王智飞, 苏京伟, 张遨宇, 等. 输电铁塔十字组合角钢主材稳定承载力研究[J]. 钢结构, 2015, 30(2): 22-25, 56. DOI:10.13206/j.gjg.201502005.
- WANG Zhifei, SU Jingwei, ZHANG Aoyu, et al. Research on compression stability bearing capability of cross combined angle steel of transmission tower[J]. Steel Construction, 2015, 30(2): 22-25, 56. DOI:10.13206/j.gjg.201502005. (in Chinese)
- [10] 李佳遥. 考虑节点扭转约束的输电角钢塔交叉斜材承载力试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- LI Jiayao. Experimental study on the stability capacity of cross-bracing considering the torsional stiffness of joints on transmission tower [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)
- [11] 黄祖林. 输电塔交叉斜材子结构稳定承载力试验与理论研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- HUANG Zulin. Experimental and theoretical study on stability bearing capacity of cross bracing substructures in transmission towers [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)

- [12] 屈可明,李正良,黄祖林.输电塔交叉斜材承载力试验及有限元分析[J].特种结构,2021,38(4):73-84.DOI:10.19786/j.tzjg.2021.04.015.  
QU Keming, LI Zhengliang, HUANG Zulin. Experiment and finite element analysis on bearing capacity of cross-bracing in transmission towers[J]. Special Structures, 2021, 38(4): 73-84. DOI:10.19786/j.tzjg.2021.04.015. (in Chinese)
- [13] 徐再根,刘正伟,刘文棚,等.输电塔单双角钢过渡节点计算方法[J].山东大学学报(工学版),2021,51(1):87-93.DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2020.437.  
XU Zaigen, LIU Zhengwei, LIU Wenpeng, et al. Calculation method of the single-double angle joints in transmission towers [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(1): 87-93. DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2020.437. (in Chinese)
- [14] 何松洋,马海云,鄢秀庆,等.输电塔主材双包连接节点螺栓不均匀受剪研究[J].武汉理工大学学报,2021,43(3):49-57.  
HE Songyang, MA Haiyun, YAN Xiuqing, et al. Study on uneven shear of double-clad shear connection joint bolts of transmission tower[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2021, 43(3): 49-57. (in Chinese)
- [15] 国家能源局.架空输电线路杆塔结构设计技术规程:DL/T 5486—2020[S].北京:中国计划出版社,2020.  
National Energy Administration. Technical Specification for the Design of Steel Supporting Structures of Overhead Transmission Line: DL/T 5486—2020[S]. Beijing: China Planning Press, 2020. (in Chinese)
- [16] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials-Tensile Testing-Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)