

输电塔斜材 T 形双拼角钢加固构件 承载力数值模拟及试验研究

谢文平¹, 张琳琳², 聂铭¹, 谢强², 罗啸宇¹, 雷旭¹

1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州, 510080;

2. 同济大学建筑工程系, 上海杨浦区四平路 1239 号, 200092.

NUMERICAL SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDY ON THE LOAD BEARING CAPACITY OF T SHAPED REINFORCEMENT ANGLE STEEL OF TRANSMISSION TOWER

Xie Wenping¹, Zhang Jian², Nie ming¹, Xie Qiang², Luo XiaoYu¹, Lei Xu¹

1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou, 510080;

2. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China.

ABSTRACT: In order to improve the load bearing capacity of transmission tower under strong wind, this paper presents a strengthen method of T shaped double angle steel for oblique component. Under the premise of avoiding the welding and drilling to the original angle steel, the T shaped angle section is formed by the way of clamp connection. By comparing the bearing capacity and failure mode of the component before and after the reinforcement, it is known that the reinforcement component in the T shaped double spelling angle steel has a restraining effect on the unstable deformation of the original angle steel, and the failure mode of the components changes from the bending instability in the elastic range to the elastoplastic bending and torsional instability, and the bearing capacity is increased by more than 1 times that of the reinforcement before .

KEY WORD: transmission tower;reinforce;T shaped angel steel ; load bearing capacity

摘要: 为了提高输电塔在强风作用下的承载能力, 本文提出一种针对斜材构件的 T 形截面双拼角钢加固方法。在避免原材角钢焊接、打孔的前提下, 采用夹具连接的方式双拼角钢形成 T 形截面。通过数值模拟分析及试验研究对比加固前后构件的承载力及破坏模式可知, T 形截面双拼角钢中加固材对原材的失稳变形有约束作用, 构件的破坏模式由弹性范围内的弯曲失稳变为弹塑性弯扭失稳, 承载力较加固前提高 1 倍以上。

关键词: 输电塔; 加固; T 形双拼角钢; 承载力

1 引言

架空输电线路是电网运行的重要基础设施,

在我国的经济建设中作为生命线工程起着至关重要的作用。由于输电塔具有轻质、高柔、小阻尼的特性, 在强风作用下其结构会产生比较剧烈的风致响应^[1], 引起杆件断裂或者产生残余变形, 整个结构也有可能发生倒塌。如今, 输电塔在强风作用下的风毁事故时有发生^[2], 如何确保在风荷载作用下格构式塔架的安全性和可靠性, 是结构设计者应该重视的问题。

与重新设计结构并进行原址修复相比, 进行原塔加固既能优化输电塔的抗风性能, 还能大大减少因停电施工带来的经济和社会损失。

增大构件截面法是已有的主要加固方法之一, 常用的加固形式有填板连接的十字形双拼角钢等^[3-8], 但在实际工程中实现的难度大, 且需要在原塔上进行焊接、打孔等操作。

本文提出一种施工简便的 T 形截面组合角钢构件加固方法, 并通过数值模拟、承载力试验论证了该加固方法的加固效果, 分析了加固构件的破坏机理。

2 构件设计

参考输电铁塔的斜材规格, 设计斜材原材单角钢 LDO、T 形截面组合角钢 LDM 两组对比构件, 每组构件数量为 3 根。具体试件信息如表 1 所示。

表 1 试件信息

构件 分组	编号	规格	加固材 规格	长度
单角钢	LDO1	L63X5	—	3000
	LDO2	L63X5	—	3000
	LDO3	L63X5	—	3000
T形 组合角钢	LDM1	L63X5	L63X5	3000
	LDM2	L63X5	L63X5	3000
	LDM3	L63X5	L63X5	3000

T形截面双拼角钢加固的操作方法为：原有斜材与辅助角钢左右并排设置形成T型结构，加固夹具紧箍于T型结构的外轮廓。

具体的加固构件构成如图2.1所示，图中1为原有斜材，2为辅助角钢，3为V形卡，4为钢板，5为螺母。V形卡与钢板的数量为1:2，其中V形卡尺寸与构件T形截面轮廓尺寸相适，再根据V形卡尺寸在钢板上打孔。原有斜材1与辅助角钢背靠背形成截面为T形的构件，V形卡包裹构件外围，由螺纹的端部穿过钢板孔，安装螺母使钢板与V形卡组成的夹具紧箍于构件外侧。

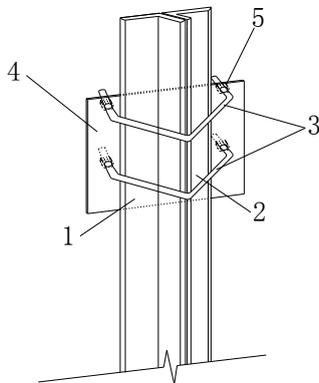


图 2.1 T形截面双拼角钢加固方式

本文中的LDM构件全长共布置七个构件，将构件六等分。

3 构件数值模拟屈曲分析

3.1 屈曲分析数值模拟方法

屈曲分析是结构分析的一个重要组成部分，研究特定形式的结构（薄板、薄壳及杆系结构）对特定形式的外荷载的响应特征。

特征值屈曲分析用于预测一个理想弹性结构的理论屈曲强度，基于初始有限变形及线弹性假设，但未考虑结构受载后的大变形和几何初始缺陷对平衡状态的影响。

非线性屈曲分析包括几何非线性、材料非线性及结构的初始缺陷，结构在失稳前的刚度矩阵是载荷幅值 P 和位移向量 u 的非线性函数。该分析过程通过逐步递增载荷和平衡迭代的方式求解，一直进行到结构的限制载荷或最大载荷。

本文中采用有限元软件进行结构的非线性屈曲分析。首先，根据特征值屈曲分析模型取线性组合赋予结构初始缺陷，一般为 $L/1000$ 、 $L/500$ （其中 L 为构件长度）等。然后，在打开大变形开关（ $NIgeom on$ ）的情况下采用弧长法（ $Riks Method$ ）进行平衡迭代，得到结构的极限荷载。

3.2 有限元建模方法

LDO构件建模如图3.1所示，通过壳单元中的拉伸操作，得到如图所示角钢构件的主体部分。两端的方形端板由Tie约束与角钢两肢相连接，相当于刚性连接，角钢肢与端板不发生相对运动和变形。

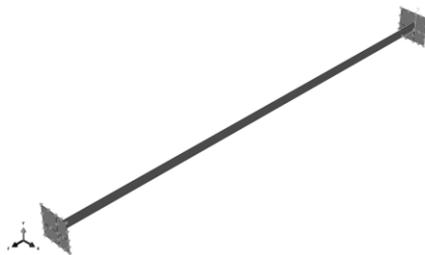


图 3.1 LDO 构件建模形式

LDM构件建模如图3.2所示，在实际构件夹具对应的角钢肢位置进行面的分割，如图所示，共七处分割，对应实际构件中的七组夹具。

将两支规格相同的角钢相并，形成T字形截面，如图所示。其中一只角钢作为原材与上下端板进行tie连接，其形心与端板形心重合。另外一只角钢作为辅材，通过tie将其与原材相并肢的七组分割面相连，不与端板相连。



图 3.2 LDM 构件建模形式

两构件的边界条件相同，下部端板 x 、 y 、 z

方向的平动位移均被约束，上部端板的 x、y 方向平动位移被约束。

3.3 数值模拟结果

3.3.1 单角钢斜材 (LDO) 计算结果分析

斜材原材 LDO 构件的前三阶振型如图所示。第一、三阶振型为弯曲形态，在第二阶中出现扭转与弯曲耦合的振型。

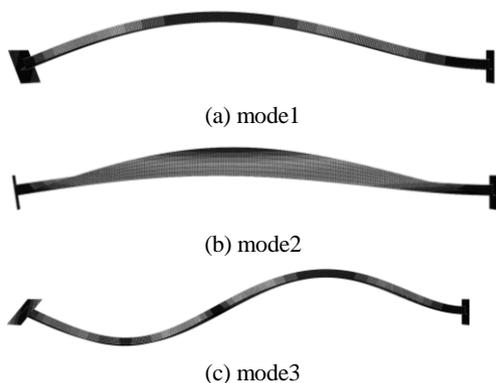


图 3.2 LDO 构件前三阶振型

以第一阶振型的形态赋予构件 L/1000、L/500、L/100 的初始缺陷，再进行 Riks 弧长法的运算，构件的稳定承载力如表 3.1 所示。

表 3.1 不同初始缺陷对应构件承载力

初始缺陷大小	L/1000	L/500	L/100
稳定承载力 (kN)	64.0	61.1	41.2

如图 3.3 为 LDO 构件失稳后的应力云图，其失稳形态为绕角钢截面弱轴、朝向开口处的弯曲失稳，构件跨中部位屈曲。



图 3.3 LDO 失稳破坏形态

3.3.1 T 形截面加固斜材 (LDM) 计算结果分析

LDM 构件模型坐标轴方向及截面测点分布如图 3.4 所示。

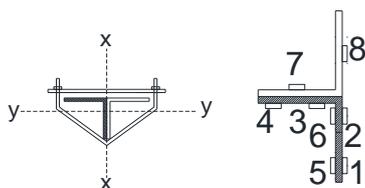


图 3.4 坐标轴方向及截面测点分布

LDM 构件的前三阶振型如图所示。第一振型

为 x、y 方向耦合的弯曲形态，第二阶中为扭转与弯曲耦合的振型，第三阶为扭转振型。

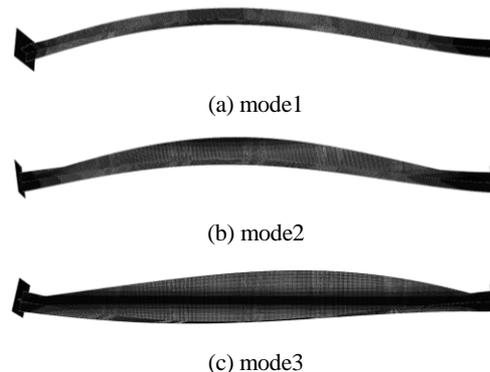


图 3.5 LDM 构件前三阶振型

如图 3.6 为 LDM 构件破坏后形态。由图可知，主要是绕 x 轴方向的弯曲，且跨中夹具上侧出现局部屈曲。



图 3.6 LDM 构件破坏形态

4 构件试验研究

4.1 加载方式与制度

加载装置如图 2 所示，采用 100t 反力架，配合带球铰的 20t 千斤顶进行加载。



图 4.1 加载装置

结合构件承载力的规范计算值^[9-10]、数值计算值，作为试验构件极限承载力参考值。试验采用先分级再连续加载制度，按照 5kN 的整数倍荷载为一级，直至荷载加至理论荷载的 60% 左右时，降低加载速率，开始采用连续加载的方式进行。

4.2 测点布置

单角钢斜材构件 (LDO) 的应变测点、位移计布置及横截面示意图如 4.2 所示。T 形截面双拼角钢斜材加固构件 (LDM) 的应变测点、位移计布置及横截面示意图如图 4.3 所示。

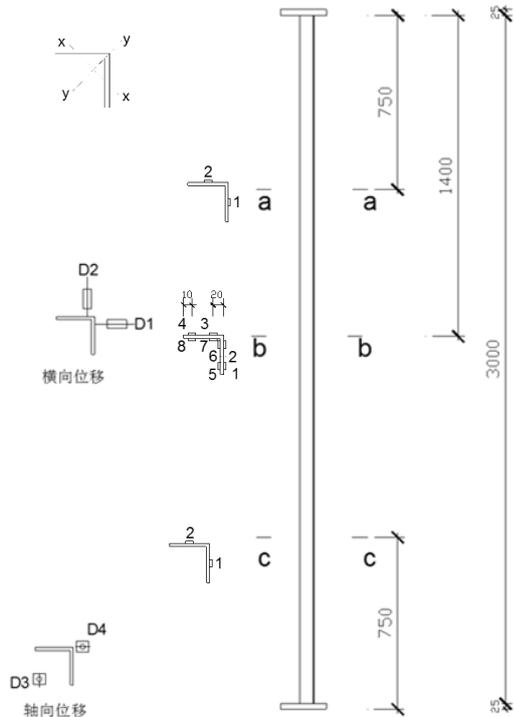


图 4.2 单角钢构件测点布置及横截面示意图

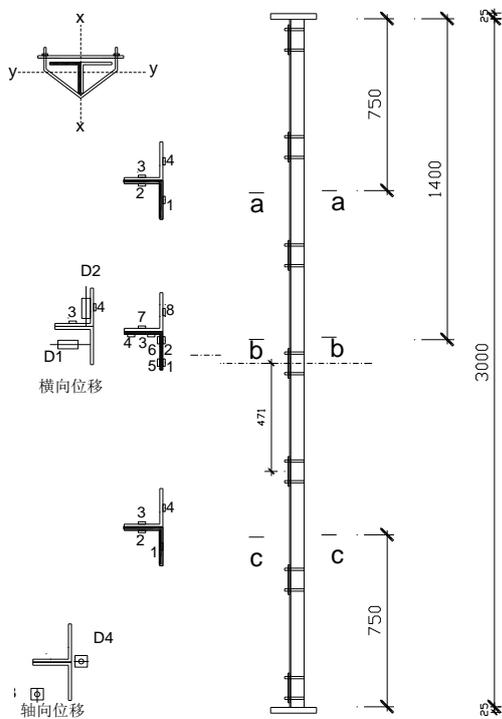


图 4.3 加固构件测点布置及横截面示意图

通过布置测点、仪器加载及数据采集测定试件的极限荷载、测量截面的位移,了解试件的破坏

特征、各控制截面的应变分布规律,得出试件的荷载—应变、荷载—位移关系曲线。

4.3 试验结果分析

文中主要以 LDO3、LDM1 构件为例进行试验现象描述及结果分析。

4.3.1 单角钢构件 LDO3 试验结果分析

单角钢构件 LDO3 破坏形式如图 4.4 所示。由图 4.4 可知, LDO3 是在跨中的位置发生朝向角钢开口方向的弯曲,即绕角钢截面弱轴 $x-x$ 的整体弯曲,角钢开口边缘受压、棱边受拉,构件跨中发生明显鼓曲。由于构件长细比较大,在破坏前的加载过程中就已经发生了肉眼可以观察到的微弯曲,随着加载时间的增长弯曲变形逐渐显著。直至荷载达到构件的承载力极限值 65.6kN 时,构件发生绕弱轴的整体失稳。与球铰接触的构件端部发生明显的转动。



图 4.4 单角钢 LDO3 构件破坏形式

对发生大变形的 b 截面进行分析, b 截面测点布置如图 4.5 所示,其中 b_1 、 b_5 、 b_4 、 b_8 角开口边缘, b_2 、 b_6 、 b_3 、 b_7 靠近构件棱侧。

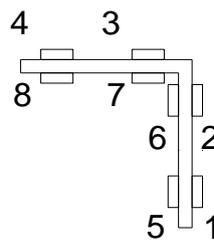
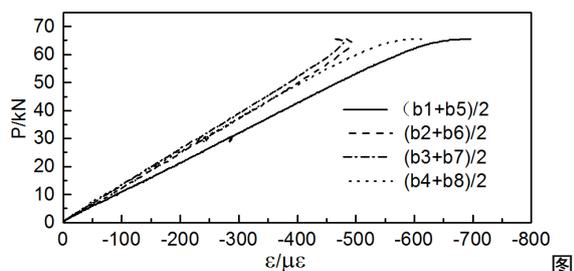


图 4.5 LDO 构件 b 截面测点布置

b 截面测点的荷载—应变曲线如图 4.6 所示, 其中应变取角钢壁厚两侧测点应变均值。由图可知, b 截面各个测点的荷载—应变曲线均为表现出线性到非线性的变化过程。b2-b8 测点在加载的初始阶段斜率接近, 由于加工初始缺陷、对中精度等原因 b1、b5 测点曲线斜率较其余测点偏小。当荷载值达到 45kN (极限承载力的 70%)、应变达到 $300\sim 400\mu\epsilon$ 错误!未找到引用源。时, 曲线的斜率开始发生明显的变化。随着荷载的增大, b1、b5、b4、b8 对应曲线的斜率减小, 应变的增长速率增大; b2、b6、b3、b7 对应测点曲线斜率增大, 应变增长速率减小。在荷载接近极限承载力时, 曲线出现平台。b1、b5、b4、b8 对应构件受压侧, 应变快速增大; b2、b6、b3、b7 对应构件受拉侧, 应变发生回缩。



4.6 LDO 构件 b 截面测点的荷载—应变曲线

构件跨中荷载—侧向位移曲线如图 4.7 所示, 当荷载值达到 45kN (极限承载力的 70%)、侧向位移达到 1.5mm 时, 位移增长速率增大; 在荷载接近极限承载力时, 曲线出现平台, 构件发生大变形。

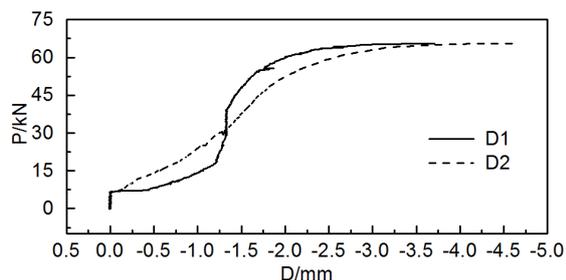


图 4.7 跨中荷载—侧向位移曲线

实验得到 LDO1、LDO2、LDO3 这三根规格相同的构件承载力分别为 37.7kN、36.6、65.6kN, 其中 LDO1、LDO2 构件承载力相近, 约为 LDO3 构件承载力的 1/2。由图 4.8 可知, LDO1、LDO2 构件 b3 测点随着荷载的增大由压应变向拉应变发展, 而 b4 测点在整个加载过程中均为压应变。

LDO1、LDO2 构件 b3、b4 测点荷载—应变曲线在加载初期均出现分叉。LDO3 构件的 b3、b4 测点在整个加载过程均为压应变, 且在 $P<35\text{kN}$ 范围内两测点应变曲线几近重合。LDO1、LDO2 构件 b3、b4 测点应变值绝对值均大于 LDO3 构件。结合在试验安装过程中发现 LDO1、LDO2 构件端板不平、需加垫片的现象可知, 端板的平整度加大了构件的对中难度, 并增大了构件的初始缺陷, 严重影响了这两根构件的试验结果。

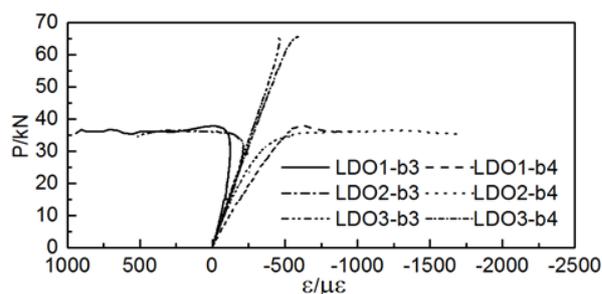


图 4.8 LDO1-3 构件 b 截面荷载—应变曲线

4.3.2 T 形截面组合角钢构件 (LDM) 试验结果分析

LDM1-3 构件的破坏形式及极限承载力均较为接近, 以 LDM1 为例进行斜材加固件的试验结果分析。如图 4.9 所示, 为 LDM1 构件的破坏形式。



图 4.9 T 形组合角钢构件 LDM1 破坏形式

根据试验现象可知, 荷载为 118.7kN 时, 构件发生弯扭破坏。其中弯曲为主要的破坏形式, 构件上端发生肉眼可观察到的轻微扭转。构件发生绕 T 形截面弱轴 x-x 的弯曲破坏, 弯曲朝向角钢原材开口处, 原材受压、辅助角钢受拉。构件跨中邻近卡子处发生局部鼓曲。

选取跨中 b 截面应变测点进行荷载—应变曲线的绘制, 如图 4.10 所示。其中 b1、b2、b5、b6

侧向位移值一直保持在较低水平。在荷载达到极限值后，位移值发生突变。而计算曲线中，在荷载达到峰值之前，跨中侧向位移值随着荷载的增大而逐渐增大。

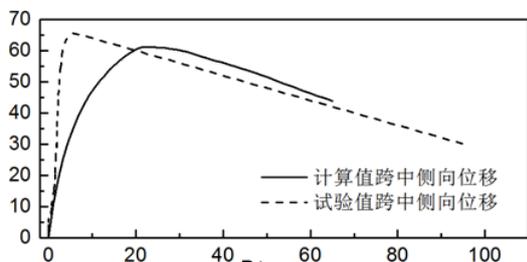


图 5.1 LDO 构件荷载—跨中侧向位移曲线计算与试验对比

如图 5.2 将计算所得 LDO 跨中截面测点荷载—应变值曲线与试验值对比。其中 b1、b5 靠近角钢肢边缘，b2、b6 靠近角钢棱边缘。由图可知，计算及试验所得的荷载—b1、b5 应变均值曲线较为接近。而计算所得的 b2、b6 均值应变小于计算所得。

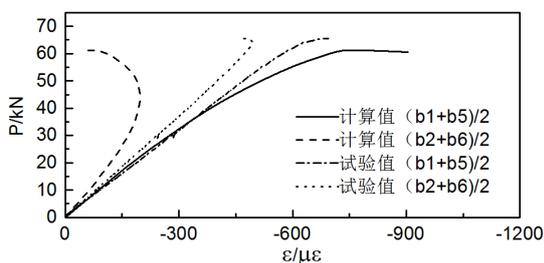


图 5.2 LDO 跨中截面荷载—应变值曲线计算与试验值对比

5.2 T 形截面组合角钢 (LDM) 构件计算与试验结果对比

由可知，计算及试验所得的 LDM 构件破坏形态均为绕 x 轴方向的弯曲，且跨中夹具上侧出现局部屈曲。

如图 5.3 为计算及试验所得 LDM 构件荷载—跨中侧向位移曲线对比，由图可知，构件承载力相近，但相同荷载下计算所得构件侧向位移值较大。

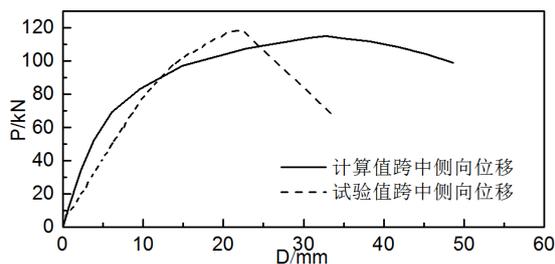
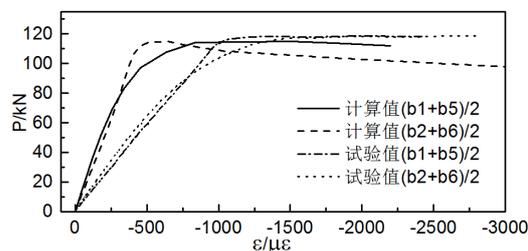
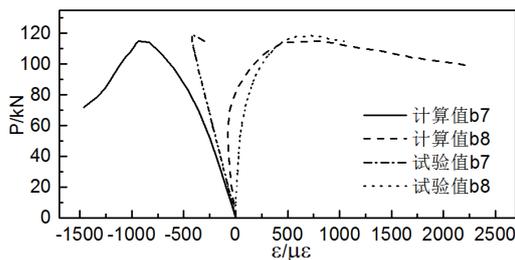


图 5.3 LDM 荷载—跨中侧向位移曲线计算与试验值对比
对比计算及试验所得的 b 截面荷载—应变曲线，如图 5.4 所示。



(a) LDM 构件 b1、b2、b5、b6 测点



(b) LDM 构件 b7、b8 测点

图 5.4 LDM 构件 b 截面荷载—应变曲线计算与试验值对比

由图 5.4 可知，计算与试验值 b7、b8 测点的发展趋势基本一致，测点 b8 的应变值在荷载达到 60-70kN 之后均加速发展。而测点 b7 应变值的计算值较试验值大，并进入塑性范围；测点 b7 的试验值在卸载后发生回缩，该点仍处于弹性范围。

计算值 b8 在加载之初呈负值，而试验值在加载之初就为正值，可能与连接件对构件的作用、组合焊的初始应力有关。

综上所述，LDM 数值模拟计算结果与试验较为相符，该种建模方法可行。

6 结论

本文针对输电塔斜材提出了具有较高操作性的 T 形截面双拼角钢加固方法。通过数值模拟分析及试验研究对比加固前后的承载性能及破坏模

式。得到如下几点结论:

(1) 斜材单角钢构件在加固前长细比大, 对于缺陷较为敏感, 加固后有所改善。

(2) 加固后 T 形构件的承载力较加固前提高了 80.9% 以上, 加固效果显著。

(3) T 形截面组合角钢构件的辅助角钢对原角钢的失稳变形有约束作用, 提高构件刚度, 从而有效提高承载力。

参 考 文 献

- [1] 谢文平, 陈波, 林介东, 聂铭. 干字型输电塔线体系风致响应研究[J]. 广东电力, 2015, 28(5):86-89.
- [2] 谢强, 李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4):126-131.
- [3] 黄兰兰, 李振宝, 唐贞云, 等. 扭转屈曲对十字截面轴心压杆承载力的影响[J]. 电力建设, 2010, 31(6):1-5.
- [4] 李振宝, 庄修伟, 韩军科, 等. 角钢加固输电铁塔十字型组合

截面主材承载力试验研究[C]. 全国现代结构工程学术研讨会, 2010.

- [5] 俞登科, 李正良, 杨隆宇, 等. Q420 双角钢组合截面偏压构件弹塑性弯曲屈曲[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(5):12-16.
- [6] 李茂华, 董建尧, 杨靖波, 等. 特高压双回路钢管塔真型试验[J]. 中国电机工程学报, 2009(34):102-107.
- [7] 郭勇, 沈建国, 应建国. 输电塔组合角钢构件稳定性分析[J]. 钢结构, 2012, 27(1):11-16.
- [8] 杨利容, 郑勇. 双角钢十字组合填板设计方法探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(3):32-35.
- [9] 钢结构设计规范 GB50017-2003[S]. 2003.
- [10] 架空送电线路杆塔结构设计技术规 DL/T5154-2012[S]. 2012.

收稿日期:

作者简介:

谢文平 (1986-), 男, 江西, 硕士研究生, 工程师, 电网设备防灾减灾