

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.059



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



输电铁塔角钢无损加固分析与计算方法

张亮¹, 唐亚可¹, 田利², 牛凯¹, 裴浩威¹, 杨萌², 孟祥瑞²

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 郑州 450052; 2. 山东大学土建与水利学院, 济南 250061)

摘要:对于运行时间较长或有扩容改建要求的服役输电铁塔,部分构件承载力不足将导致其无法满足更高的设计要求,有必要通过角钢构件加固来提升其承载性能。以输电铁塔中典型角钢为研究对象,提出输电铁塔无损加固方法,该方法采用螺栓与夹具使原构件与加固构件形成组合加固构件,组合构件对原构件不造成损伤,且结构简单、应用性强;建立细化的组合构件数值模型,研究原构件长细比、夹具间距(数量)、钢材特性对组合构件加固效果的影响,提出组合构件受压承载力计算方法。结果表明:提出的加固方法加固效果显著,加固水平最高达到 56.34%;原构件长细比对组合构件受压承载力提升水平影响明显,组合构件的提升效果随着原构件长细比的增大而逐渐显著;当夹具数量为奇数个且夹具间距小于 750 mm 时,组合构件的加固效果最佳;加固构件的钢材特性对组合构件受压承载力和延性影响较小;提出的组合构件受压承载力计算方法与有限元模拟结果吻合良好。

关键词:输电铁塔;角钢构件;无损加固;长细比;受压承载力

中图分类号:TU392.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)04-0094-09

Analysis and calculation method of nondestructive reinforcement for angle steel of transmission tower

ZHANG Liang¹, TANG Yake¹, TIAN Li², NIU Kai¹, PEI Haowei¹, YANG Meng², MENG Xiangrui²

(1. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, P. R. China)

Abstract: For the service transmission tower with long operation time or expansion and reconstruction requirements, the insufficient bearing capacity of certain components leads to the transmission tower unable to meet the higher design requirements. Therefore, it is necessary to study the reinforcement measures of angle steel components to effectively improve the bearing performance of transmission towers. Taking the typical angle steel in transmission tower as the research object, a non-destructive reinforcement method for transmission tower was proposed. In this method, bolts and fixtures are used to form a composite reinforcement

收稿日期:2022-03-16

基金项目:国家自然科学基金(52178489)

作者简介:张亮(1986-),男,高级工程师,主要从事高压输电线路的设计和研发,E-mail:550599894@qq.com。

田利(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:tianli@sdu.edu.cn。

Received: 2022-03-16

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52178489);

Author brief: ZHANG Liang (1986-), senior engineer, main research interest: transmission tower-line system, E-mail: 550599894@qq.com.

TIAN Li (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: tianli@sdu.edu.cn.

component by combining the original component and the reinforcement component. The composite component does not cause damage to the original component, and the structure is simple while the application is wide. A more detailed numerical model of composite members was established to study the influence of slenderness ratio of original members, fixture spacing (number) and steel properties on the reinforcement effect of composite members, and the calculation method of compressive bearing capacity of composite members was deduced. The results show that the proposed reinforcement method has remarkable effect, and the reinforcement level is up to 56.34%. The slenderness ratio of the original component has obvious influence on the lifting level of the composite component, and the lifting effect of the composite component is gradually obvious with the increase of the slenderness ratio of the original component. When the number of fixtures is odd and the spacing of fixtures is less than 750 mm, the reinforcement effect of composite members is optimal. Steel properties of reinforced members have marginal effect on compressive bearing capacity and ductility of composite members. The proposed calculation method of compression bearing capacity of composite members is in good agreement with finite element simulation.

Keywords: transmission tower; angle steel components; non-destructive reinforcement; slenderness ratio; bearing capacity

角钢构件具有优越的受力性能和连接性能,在输电铁塔中应用广泛。目前有大量现役输电铁塔是基于旧版本规程^[1]设计和建造的,面对自然灾害的威胁和扩容改建的要求,输电铁塔中许多构件存在承载力不足的问题^[2-5],角钢构件受压失稳后承载力显著削弱,导致输电铁塔无法满足更高的承载要求。因此,采用可靠的加固措施对输电铁塔角钢构件进行加固对于提升角钢构件的受压稳定性能、提高输电铁塔的承载能力具有重要意义。

当前,输电铁塔加固的思路主要有两类:第1类是采用焊接或螺栓连接等方式对输电铁塔薄弱构件进行加固,或直接采用更高规格的构件替换薄弱构件;第2类是通过在输电铁塔的节间增设横隔面来增强输电铁塔薄弱节间的抗剪能力和整体稳定性。近年来,学者们对两种加固思路开展了大量研究。夹具作为加固装置的主要连接部件,对加固后组合构件的承载性能有着重要影响。夹具的约束作用能使原构件和加固构件协同工作,但一味地增加夹具数量并不能取得理想的加固效果^[6-7],当夹具数量超出某一限值时,继续增加夹具数量对组合构件的受压承载力影响较小;当夹具数量相同时,在组合构件端部布置夹具可有效提高组合构件的抗扭转稳定性能^[8],当夹具沿组合构件轴向均匀布置时,可取得较好的加固效果^[9]。加固构件作为辅助构件,建议其长度不应小于原构件长度的 $1/2$ ^[10]。此外,加固构件与原构件之间的初始间隙^[11]和原构件的初始负载^[12]对组合构件的受压承载力也有一定影响。作为角钢构件加固常用的组合截面形式,同

等工况下,T形截面加固效果优于十字形和Z形截面^[13]。加固构件的强度和规格对传力效率和受压承载力提升幅度影响较大^[14],使用T形组合截面形式加固不仅可以有效提升组合构件的受压承载力^[15],还可以增大输电铁塔结构的抗侧向位移刚度^[16]。杨正等^[17]基于一种T型组合角钢加固方法,建立了T型加固形式的受压承载力分析方法,由计算方法得到的结果与数值分析基本一致。姚瑶等^[18]基于真型试验和有限元分析对加固后构件的受压承载力进行了分析,发现使用板的局部稳定公式可以准确预测组合构件的受压承载能力。使用螺栓连接的十字形组合截面形式加固时,预应力对组合截面受压稳定性的影响较小,加固后原构件的内力可以有效地转移到加固构件中^[19]。使用Alfa方法和Lambda方法推导十字形组合构件的受压承载力时,可比欧洲规范(EN1993-1-1)更全面地考虑构件的扭转效应^[20]。李文斌等^[21]针对输电铁塔构件Y字形加固方案开展了试验研究,构件内力通过夹具产生的摩擦力传递,在试验加载后期,截面传力效率仍可达40%以上,加固效果显著。Albermani等^[22]在长细比较大的斜材位置处增设横隔面对输电铁塔进行加固,结果表明,横隔支撑可显著提高输电铁塔的承载性能,并且给出了最有效的横隔类型。Yang等^[23]结合数值模拟分析了不同的横隔加固方案,结果表明,在输电塔中设置横隔不仅能够有效提高输电塔的整体刚度,还可以在一定程度上提高结构强度。楼文娟等^[24]通过增设横隔面开展了输电塔抗风加固设计研究,发现通过增设横隔面可以有效地抑制输电塔结

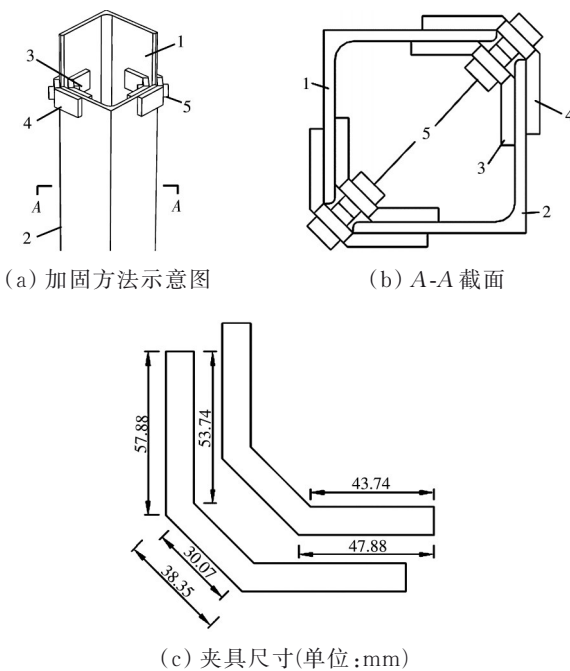
构局部阵型的提前出现。目前,关于输电铁塔的加固方法中常用的焊接或螺栓连接会严重削弱原构件的受压承载力,且实施过程中对输电铁塔的安全性存在一定的影响,而关于角钢构件无损加固方面的研究甚少,也未给出相应的受压承载力计算方法。

针对输电铁塔角钢的力学特性,笔者提出一种无损加固方法,利用ABAQUS建立较为细化的组合构件数值模型,研究原角钢长细比、夹具间距和钢材特性等参数对加固效果的影响规律,并建立组合构件受压承载力计算方法,对无损加固方法的设计进行指导。

1 输电铁塔角钢无损加固方法

输电铁塔角钢无损加固方法如图1所示,该方法由加固构件、内、外侧夹具和螺栓组成。该加固方法的具体实施方法为:首先对螺栓施加预紧力固定内侧夹具和外侧夹具的相对位置,然后通过拧紧螺栓实现原构件和加固构件之间的协同受力,夹具与原构件和加固构件之间的摩擦力可以通过螺栓进行调整。

与传统加固方法相比,该方法可以在实施过程



注:1.原构件;2.加固构件;3.内侧夹具;4.外侧夹具;5.螺栓。

图1 输电铁塔角钢无损加固方法

Fig. 1 Non-destructive reinforcement method for the angle steels of transmission towers

中避免对输电铁塔原构件的焊接或打孔,从而有效提升组合构件的受压稳定性能。使用夹具连接原构件和加固构件,可以避开输电铁塔的节点部位,实现对输电铁塔原构件的通长加固。

2 组合构件有限元模型的建立

2.1 有限元模型

利用ABAQUS有限元软件,建立较为细化的组合构件数值模型,如图2所示,模型中原构件截面尺寸为 $L125 \times 8$,长度分布范围为3~6 m,对应长细比为60~120。加固构件长度比原构件小200 mm,夹具的厚度和宽度分别为10、40 mm。模型中网格划分类别为六面体,网格的全局尺寸为10 mm,在螺栓孔位置处进行加密划分。材料属性分别为Q235、Q355和Q420钢,材料密度为 $7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$,泊松比为0.3,弹性模量为206 000 MPa,材料属性选用理想弹塑性模型。在构件端部与加载板连接位置处使用绑定接触模拟焊接,在夹具与角钢构件和螺栓接触位置定义接触,法向行为设置为“硬接触”,切向行为使用“罚函数”定义摩擦系数为0.3,为了考虑螺栓荷载施加对构件刚度的影响,在模型中设置4个分析步。分析步1,施加螺栓预紧力,使模型之间建立接触关系,预紧力大小设置为10 N;分析步2,调整螺栓荷载到工作荷载(90 kN);分析步3,将螺栓荷载的施加方式调整为固定在当前长度;分析步4,分析计算构件的受压稳定承载力。以组合构件4k-3为例,模型编号中4k表示组合构件使用4夹具进行加固,3表示原构件长度为3 m。S1~S7分别表示长细比为60~120的原构件。

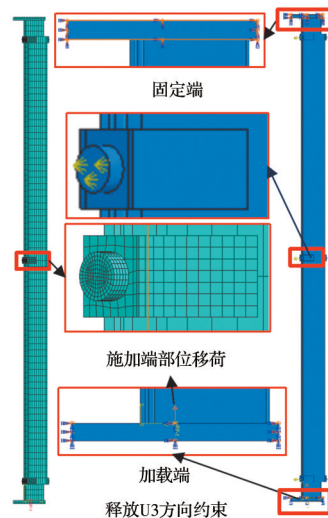


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

输电铁塔角钢构件中不可避免地存在初始缺陷,初始缺陷对构件的受压稳定性能有较大影响^[25],构件初始缺陷统一取为 $L/1\ 000$ (L 为构件的长度)。每个工况下均建立 I 和 II 两个模型,模型 I 用来进行 Buckling 分析,计算构件的典型屈曲模态。在模型 II 中导入构件的一阶屈曲模态,并进行 Riks 分析,计算构件的受压承载力。图 3 给出了部分组合构件的失稳模式,当组合构件受压屈曲时,构件跨中部位产生较大横向变形。可以看出,当在组合构件跨中位置布置夹具时,组合构件的典型屈曲模态与原构件基本相似,当未在组合构件跨中部位布置夹具时,组合构件的失稳模式仍是典型的受压屈曲失稳,但相比于其他构件,构件跨中部位曲率较小。



图 3 一阶屈曲模态

Fig. 3 First-order buckling mode

2.2 角钢构件有限元模拟与规范计算对比

在 ABAQUS 中使用弧长法分析原构件的承载力,并与规范^[26]计算结果进行对比,规范中原构件的承载力由式(1)计算。

$$N \leq \varphi A f_y \quad (1)$$

式中: φ 为轴心受压构件的稳定系数; A 为原构件的截面面积; f_y 为原构件材料的屈服强度。

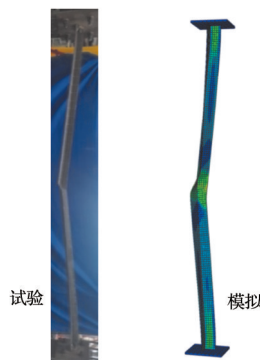


图 4 试验结果与模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental and simulation results

表 1 给出了有限元计算结果、原构件规范计算结果和试验结果的对比。可以看出,在不同长细比工况下,模型计算结果与规范计算结果和试验结果的误差均在 5% 以内,有限元模型能够准确地计算出原构件的受压承载力,且构件受压屈曲破坏时,有限元模型的破坏位置与试验结果相同,如图 4 所示,表明有限元模型具有较高的精度,可以进行后续参数化分析。

表 1 模拟与试验和规范计算结果对比

Table 1 Comparison of simulation with test and specification calculation results

构件编号	长细比	稳定系数 φ	模拟结果/kN	规范计算结果/kN	试验结果/kN
S1	60	0.73	508.25	514.77	503.26
S2	70	0.65	461.38	455.73	458.64
S3	80	0.56	402.90	394.17	408.55
S4	90	0.49	335.69	343.55	338.94
S5	100	0.42	302.76	295.17	297.31
S6	110	0.36	258.52	252.41	258.42
S7	120	0.32	216.00	221.70	213.11

3 输电铁塔无损加固参数化分析

为明确输电铁塔角钢无损加固装置的工作机理,选取原构件长细比、加固构件夹具间距和组合构件钢材特性等参数,研究其加固效果。

3.1 原构件长细比的影响

图 5 给出了原构件长细比与原构件和组合构件受压承载力的变化规律。可以看出,与原构件相比,组合构件能够显著提高原构件的受压承载力,且采用 5 夹具的组合构件受压承载力最大。原构件和组合构件的受压承载力随着长细比的增大而逐渐减小,当原构件长细比从 60 增大到 120 时,原构件和组合构件(以 5 夹具组合构件为例)受压承载力分别从 514.77、669.46 kN 减小到 221.70、347.11 kN。

原构件和组合构件受压达到屈曲临界力之前,轴力随轴向位移线性变化;发生屈曲后,原构件和

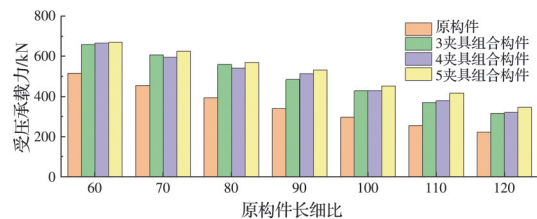


图 5 组合构件受压承载力对比

Fig. 5 Comparison of bearing capacity of composite members

组合构件的跨中出现横向变形,轴力与轴向位移关系呈非线性,且轴力随着轴向位移的增加而逐渐减小^[27]。因此,屈曲前轴向变形 Δd 可以反映原构件和组合构件的稳定性能。利用原构件长度 L 对屈曲前轴向变形 Δd 进行归一化,得到不同长细比下原构件和组合构件(以5夹具组合构件为例)归一化屈曲前的轴向变形 η 值($\eta=\Delta d/L$)的变化规律,如图6所示。可以看出,不同长细比下,组合构件的 η 值均高于原构件,表明组合构件能够有效改善原构件的稳定性能。原构件和组合构件的 η 值均随着长细比的增大而逐渐减小,且两种构件的 η 值差异逐渐显著,当原构件长细比为60和120时,原构件和组合构件的 η 值差异分别为13.87%和56.34%,表明随着长细比的增大,该无损加固方法的加固水平显著提升。

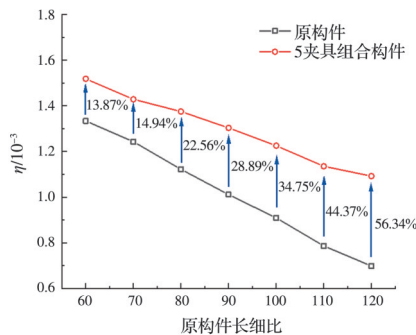


图6 η 值与原构件长细比的关系

Fig. 6 Relationship between η and slenderness ratio of original member

图7给出了组合构件受压承载力随原构件长细比的变化规律。组合构件受压承载力提升效果随着原构件长细比的增大而逐渐显著,且在原构件长细比为120时达到最大值,3、4、5夹具组合构件的受压承载力提升水平分别为46.06%、48.04%和

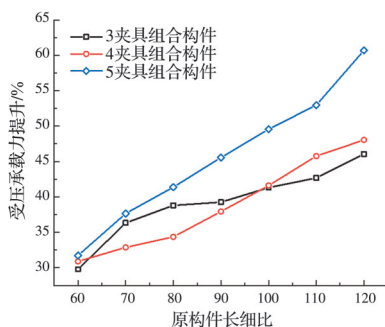


图7 组合构件受压承载力提升与长细比的关系

Fig. 7 Relationship between the increase of compressive bearing capacity of composite members and slenderness ratio

60.70%。同时,不同长细比下,相比于3夹具组合构件受压承载力的提升水平,4夹具组合构件差别较小,而5夹具组合构件更加显著,这可能是由于4夹具组合构件的跨中部位没有夹具约束,导致原构件与加固构件共同变形能力较差。

3.2 加固构件间距的影响

沿组合构件长度方向均匀布置多个夹具,夹具间距随着夹具数量的增加而减小。表2给出了不同夹具间距(数量)下组合构件受压承载力的对比,相比于原构件,采用不同夹具间距的组合构件受压承载力提升显著,提升水平均在29%以上。不同长细比下,夹具间距对组合构件的受压承载力有一定的影响。当原构件长细比范围为60~100时,夹具间距减小50%,组合构件受压承载力提升水平分别为1.50%、1.86%和5.84%;当原构件长细比为120,组合构件夹具间距由2880 mm变为1920、1440 mm时,组合构件受压承载力提升水平分别为1.36%和10.02%。可以看出,当原构件长细比范围为60~100时,夹具间距对组合构件的承载力影响较小,当原构件长细比范围为100~120时,夹具间距的变化对组合构件承载力有一定的影响。

由表2可以看出,相比于3夹具的组合构件,4夹具的组合构件受压承载力提升水平较低,最大提升水平仅为1.36%,而当原构件长细比为80时,4夹具的组合构件受压承载力略低于3夹具。图8给出了原构件长细比为80时3、4夹具组合构件达到受压承载力后的应力云图。使用3、4夹具组合构件的受压失稳模式均为跨中出现明显横向变形,且组合构件的两端和跨中处应力较为集中。相比于4夹具组合构件,在3夹具组合构件的跨中处布置夹具,当组合构件受压发生横向变形时,跨中处夹具发挥约束作用,原构件和加固构件的协同变形能力显著。因此,选用奇数个夹具对原构件进行加固时,能够取得良好的加固效果。

为了进一步明确组合构件受压承载力随夹具间距的变化规律,选取原构件长细比分别为100、110和120的组合构件,得到夹具间距对受压承载力的影响规律,如图9所示。可以看出,当夹具间距小于750 mm时,夹具间距对组合构件受压承载力影响较小且其受压承载力达到最大,原构件长细比分别为100、110和120时,组合构件受压承载力最大分别为515.7、449.3、396.2 kN;当夹具间距逐渐从750 mm增大到1700 mm时,组合构件受压承载力减小,原构件长细比为100、110和120的组合构件受压承载力分别减小了16.9%、14.9%和16.2%;

表 2 原构件和组合构件受压承载力对比

Table 2 Comparison of bearing capacity between original and composite members

构件编号	夹具数量	夹具间距/mm	原构件长细比	原构件受压承载力/kN	组合构件受压承载力/kN	提升率/%
3k-3	3	1 380			659.58	29.77
4k-3	4	920	60	508.25	665.30	30.90
5k-3	5	690			669.46	31.72
3k-4	3	1 880			559.24	38.80
4k-4	4	1 253	80	402.90	541.30	34.35
5k-4	5	940			569.64	41.38
3k-5	3	2 380			427.86	41.32
4k-5	4	1 587	100	302.77	428.74	41.61
5k-5	5	1 190			452.84	49.57
3k-6	3	2 880			315.50	46.06
4k-6	4	1 920	120	216.01	319.78	48.04
5k-6	5	1 440			347.11	60.69

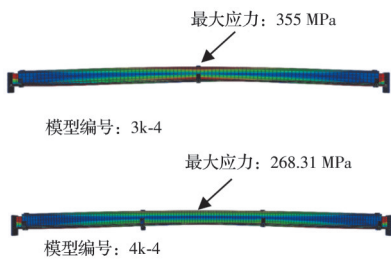


图 8 组合构件应力云图

Fig. 8 Stress cloud pattern of composite members

当夹具间距大于 1 700 时,组合构件受压承载力达到最小,且夹具间距对组合构件受压承载力的影响可以忽略。因此,为了保证加固效果,组合构件的夹具间距应小于 750 mm。

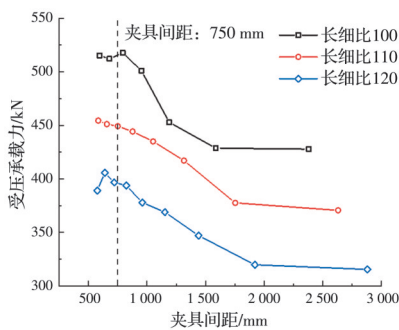
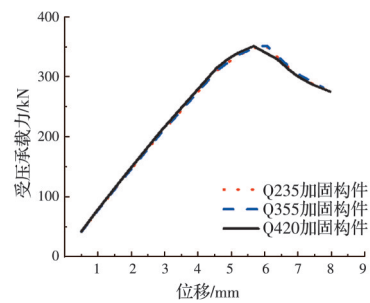


图 9 夹具间距与组合构件受压承载力关系

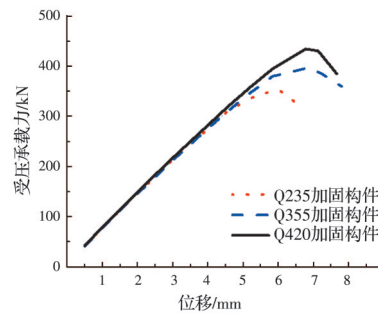
Fig. 9 Relationship between fixture spacing and bearing capacity of composite members

3.3 组合构件钢材特性的影响

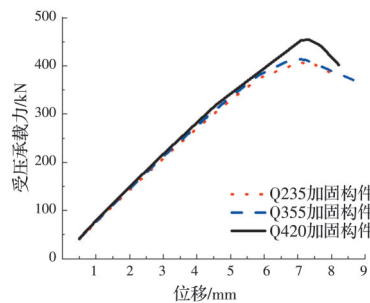
选取原构件长细比为 120 的组合构件,其夹具采用 Q355 钢材,原构件和加固构件分别采用 Q420、Q355 和 Q235 钢材,研究钢材特性改变时组合构件受压承载力的变化规律,如图 10 所示。



(a) 原构件-Q235 钢



(b) 原构件-Q355 钢



(c) 原构件-Q420 钢

图 10 组合构件受压承载力-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of composite members under compression

由图 10 可以看出,当原构件为 Q235 钢时,将加固角钢由 Q235 钢变为 Q355 和 Q420 钢后,组合构件受压承载力分别提升了 0.13% 和 0.26%,屈曲前轴向变形基本相同,约为 5.80 mm;当原构件为 Q355 钢时,将加固构件由 Q355 钢变为 Q235 和 Q420 钢后,组合构件受压承载力分别提升了 -11.67% 和 9.44%,屈曲前轴向变形分别增大了 -14.89% 和 4.09%;当原构件为 Q420 钢时,将加固构件由 Q420 钢变为 Q235 和 Q355 钢后,组合构件受压承载力分别提升了 -10.39% 和 -8.74%,屈曲前轴向变形分别增大了 -7.01% 和 -3.68%。因此,当原构件为 Q235 钢时,加固构件钢材特性变化对组合构件受压承载力和延性影响较小,当原构件为 Q355 和 Q420 钢时,组合构件的受压承载力和延性受加固构件钢材特性影响较大,随着加固构件屈服强度的提高,组合构件承载力和延性提升水平逐渐显著。

4 组合构件受压承载力计算方法

基于有限元分析结果,以 3 夹具组合构件为例,推导组合构件受压承载力计算方法。图 11 为组合

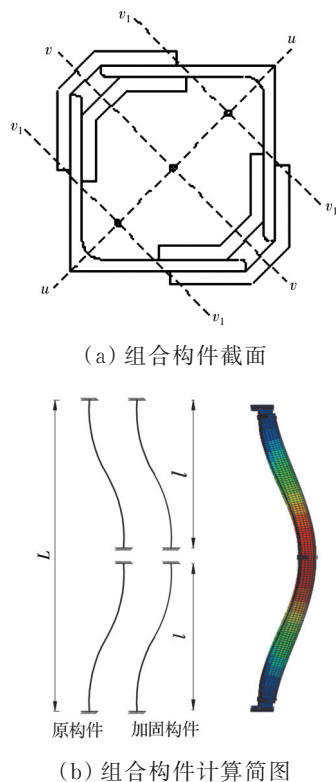


图 11 组合构件受压承载力计算简图

Fig. 11 Calculation diagram of compression capacity of the composite member

构件计算方法推导简图,可以看出,组合构件受压绕 v 轴发生失稳后,跨中出现较大的横向变形。由于跨中处夹具的约束作用,组合构件的加固构件和原构件能够协同变形,可将组合构件简化为两个对称的半结构进行计算,且半结构两端均为固定约束。

4.1 加固构件受弯承载力计算

加固构件受弯达到屈曲临界力后,跨中处产生较大横向变形,在主平面内加固构件抗弯强度可由式(2)^[26]计算。

$$M_{v1} \leq f_y \cdot W_{v1} \quad (2)$$

式中: W_{v1} 为加固构件绕 v_1 轴的截面模量; f_y 为材料屈服应力。

4.2 组合构件跨中横向变形限值计算

当加固构件半结构端部弯矩为 M_{v1} 时,组合构件跨中横向变形(即半结构端部横向位移)可由式(3)计算。

$$x = \frac{M_{v1} l^2}{6EI_{v1}} \quad (3)$$

式中: l 为半结构的长度; E 为弹性模量; I_{v1} 为加固构件绕 v_1 轴的截面抵抗矩。

4.3 组合构件理论受压承载力计算

组合构件受压发生失稳后,跨中处存在附加弯矩,当组合构件跨中横向位移达到限值时,组合构件的理论受压承载力可由式(4)计算。

$$N = f_y \left(\frac{1}{A} + \frac{W_{v1} l^2 f_y}{6EI_{v1} W_v} \right) \quad (4)$$

式中: A 为原构件的截面面积; W_v 为组合构件绕 v 轴的截面模量。

4.4 组合构件理论受压承载力修正

由分析可知,原构件长细比和夹具间距均对组合构件受压承载力有较大影响。为了考虑原构件长细比和夹具间距的影响,在式(4)中引入长细比影响系数 δ 和夹具间距影响系数 κ ,修正后的组合构件承载力计算式为

$$N = \delta \kappa f_y \left(\frac{1}{A} + \frac{W_{v1} l^2 f_y}{6EI_{v1} W_v} \right) \quad (5)$$

式中: $\delta = 1.43467 - 0.00694\lambda$; 夹具数量为 3 时, $\kappa = 1.0$, 夹具数量 > 3 且夹具间距 > 1000 mm 时, $\kappa = 1.068$, 夹具数量 > 3 且 750 mm $<$ 夹具间距 < 1000 mm 时, $\kappa = 1.22$, 夹具间距 < 750 mm 时,按夹具间距等于 750 mm 进行计算。

图 12 给出了修正后组合构件受压承载力计算结果与模拟结果的对比,可以看出,使用式(5)计算得到的结果与模拟结果偏差较小,计算结果误差均在 5% 以内,表明修正后组合构件受压承载力计算

方法具有良好的准确性,可以为输电铁塔无损加固方法设计提供参考。

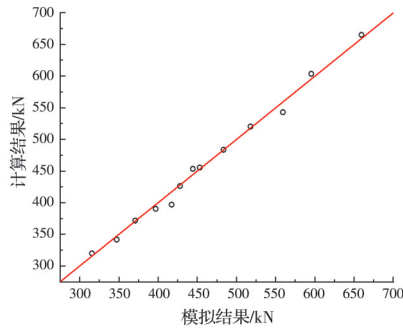


图12 修正后计算结果与模拟结果的对比

Fig. 12 Comparison between modified calculation results and simulation results

5 结论

提出了输电铁塔无损加固方法,利用ABAQUS建立了较为细化的组合构件数值模型,开展了原构件长细比、夹具间距和钢材特性等参数对组合构件受压承载力的影响研究,明确了不同参数对加固效果的影响规律,并推导了组合构件受压承载力的计算方法,主要结论如下:

1)该输电铁塔无损加固方法具有良好的加固效果,原构件长细比对组合构件受压承载力影响明显,随着长细比的增大,该无损加固方法的加固水平显著提升。

2)相比于原构件,采用不同夹具间距的组合构件受压承载力提升显著,当夹具数量为奇数个且夹具间距小于750 mm时,组合构件的加固效果最佳。

3)当原构件钢材为Q355钢和Q420钢时,加固构件钢材特性对组合构件的受压承载力和延性有较大影响,当原构件钢材为Q235钢,加固构件钢材特性的变化对组合构件的受压承载力和延性影响较小。

4)考虑原构件长细比和夹具间距影响的组合构件受压承载力计算方法与有限元模拟吻合良好,误差均在5%以内。

参考文献

[1] 架空送电线路杆塔结构设计技术规定: DL/T 5154—2002 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
Technical regulation of design for tower and pole structures of overhead transmission line: DL/T 5154—2002 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002. (in Chinese)

[2] 魏文晖, 周翔, 邓晨, 等. 基于能量法的下击暴雨作用下输电塔线体系失效倒塌研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(6): 73-80.

WEI W H, ZHOU X, DENG C, et al. Research on failure and collapse of transmission tower line system under downburst action based on energy method [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(6): 73-80. (in Chinese)

[3] RAO N P, KNIGHT G M S, LAKSHMANAN N, et al. Investigation of transmission line tower failures [J]. Engineering Failure Analysis, 2010, 17(5): 1127-1141.

[4] 雷旭, 付兴, 肖凯, 等. 强风作用下输电塔结构不确定性倒塌分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(Sup1): 266-274.
LEI X, FU X, XIAO K, et al. Failure analysis of a transmission tower subjected to wind load using uncertainty method [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(Sup1): 266-274. (in Chinese)

[5] ZHANG J, XIE Q. Failure analysis of transmission tower subjected to strong wind load [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 160: 271-279.

[6] MAIA W F, VIEIRA L C M Jr, SCHAFER B W, et al. Experimental and numerical investigation of cold-formed steel double angle members under compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121: 398-412.

[7] HUANG G, LI M H, SU Z G. Study on failure mode of transmission tower under ice coating [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 760(1): 012004.

[8] 连继业, 王绪湘, 汪大海, 等. 输电铁塔结构构件夹具式加固性能的试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(12): 42-46.
LIAN J Y, WANG X X, WANG D H, et al. Experimental research on mechanical properties of structural members for transmission tower reinforced with clamps [J]. Industrial Construction, 2019, 49(12): 42-46. (in Chinese)

[9] 李正良, 孙波, 余周, 等. 特高压输电塔双角钢组合截面构件的承载力[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(10): 44-50.
LI Z L, SUN B, YU Z, et al. The research of bearing capacity for double-angle composited crosssection member of UHV transmission tower [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(10): 44-50. (in Chinese)

[10] 江文强, 陈欣阳. 输电铁塔十字形夹具式主材加固方法研究[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(2): 97-104.
JIANG W Q, CHEN X Y. Research on the cruciform fixture reinforcement method in main legs of transmission towers [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(2): 97-104. (in Chinese)

[11] 熊国文. 高压角钢输电塔抗风稳定性分析及其加固研究[D]. 广州: 广州大学, 2018.

- XIONG G W. Stability analysis and reinforcement research of high-voltage steel angle transmission tower [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018. (in Chinese)
- [12] 沈之容, 苑士岩. 负载下焊接加固铁塔角钢轴压构件有限元参数分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(13): 86-89.
SHEN Z R, YUAN S Y. Analysis of finite element parameters of angle steel axial compression member of steel tower reinforced by welding under load [J]. Building Structure, 2018, 48(13): 86-89. (in Chinese)
- [13] 刘学武, 夏开全, 高燕, 等. 构件并联法加固输电塔的试验研究及设计建议[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2011, 43(6): 838-844.
LIU X W, XIA K Q, GAO Y, et al. Study on strengthening the structure and its design for the transmission tower [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2011, 43(6): 838-844. (in Chinese)
- [14] 辛振科. 双角钢 T 形组合截面压弯构件受力性能及设计方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
XIN Z K. Study on mechanical behavior and design method of double angle T-shaped composite section press-bending member [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [15] NI Z C, XIE Q, YANG Z. Test and theoretical analysis of T-section combined angles' retrofitting scheme for transmission tower [C]//2021 4th International Symposium on Traffic Transportation and Civil Architecture (ISTTCA). November 12-14, 2021, Suzhou, China. IEEE, 2021: 789-795.
- [16] 张戢, 杨正, 谢强. 输电塔 T 形组合角钢加固方法试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(4): 37-43.
ZHANG J, YANG Z, XIE Q. Experimental research on reinforcement method of transmission tower with T-shaped combine angles [J]. Industrial Construction, 2019, 49(4): 37-43. (in Chinese)
- [17] 杨正, 谢强, 张戢, 等. 输电塔 T 形组合角钢加固试验及理论分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3): 147-155.
YANG Z, XIE Q, ZHANG J, et al. Test and theoretical analysis of T-section combined angles retrofitting scheme for transmission tower [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 147-155. (in Chinese)
- [18] 姚瑶, 王凌旭, 张有佳. 高压输电塔主材的角钢并联加固轴压承载力[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(3): 561-569.
YAO Y, WANG L X, ZHANG Y J. Axial bearing capacity of angle parallel reinforcement for high voltage transmission towers [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(3): 561-569. (in Chinese)
- [19] MILLS J E, XING M, YAN Z G. Experimental study on multi-panel retrofitted steel transmission towers [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 78: 58-67.
- [20] BOTELHO I S, KAYSER A M G, SARQUIS F R, et al. Starred rolled stainless steel angle sections under compression: An experimental and numerical investigation [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 158: 107177.
- [21] 李文斌, 邱智育, 马池, 等. 输电线路杆塔非焊接 Y 字形加固技术试验研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(8): 120-127.
LI W B, QIU Z Y, MA C, et al. Experimental research on a non-welding Y-shaped strengthening technique of power transmission towers [J]. Industrial Construction, 2020, 50(8): 120-127. (in Chinese)
- [22] ALBERMANI F, MAHENDRAN M, KITIPORNCHAI S. Upgrading of transmission towers using a diaphragm bracing system [J]. Engineering Structures, 2004, 26(6): 735-744.
- [23] YANG W J, LI X F, YANG Y D. Analysis of weak parts of narrow transmission towers and the reinforcement measure [C]//2015 Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA). August 18-19, 2015, Guiyang, China. IEEE, 2015: 143-146.
- [24] 楼文娟, 姜雄, 夏亮, 等. 长横担输电塔风致薄弱部位及加强措施[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(10): 1798-1804.
LOU W J, JIANG X, XIA L, et al. Wind-induced weak parts and reinforcement methods of long cross-armed transmission tower [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(10): 1798-1804. (in Chinese)
- [25] FASOULAKIS Z C, LIGNOS X A, AVRAAM T P, et al. Investigation on single-bolted cold-formed steel angles with geometric imperfections under compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162: 105733.
- [26] 钢结构设计标准: GB 50017—2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [27] TIAN L, GUO L L, QU B. Single-angle compression members with both legs bolted at the ends: design implications from an experimental study [J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(9): 06018004.