

王亚玲,陈伏彬,翁兰溪. 输电塔主材角钢并联加固性能研究和参数化分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2025, 40(1):37-44. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.006

WANG Y L, CHEN F B, WENG L X. Research and Parametric Analysis on the Performance of Parallel Reinforcement of Angle Steel, the Main Material of Transmission Tower [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 40(1):37-44. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2025.01.006

输电塔主材角钢并联加固性能研究和参数化分析

王亚玲¹, 陈伏彬^{1*}, 翁兰溪²

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.中国电建集团福建省电力勘测设计院有限公司, 福建 福州 350000)

摘要:为研究传统打孔式和新型夹具式这2种加固方式对输电塔主材角钢加固性能的影响以及优化主材角钢的加固方式,建立了2种加固方式的有限元模型,并通过静载试验和有限元模拟对比分析了2种加固方式下加固构件的破坏形态和极限承载力,实验结果与模拟结果吻合较好,验证了有限元模拟的准确性.然后在此基础上,重点分析了2种加固方式下填板(夹具)数量、位置、螺栓间距、个数等参数对加固性能的影响,结果表明:2种加固方式均能显著提高构件承载力,构件破坏形态主要为局部屈曲破坏;在实际工程中,对于单节间构件,建议采取加固件个数为2个或3个,布置在构件首尾两端,其单边螺栓个数为2个,间距在120~140 mm可以达到最优加固效果.该研究结果对单节间角钢加固分析和设计具有重要参考意义.

关键词:角钢;加固;承载力;有限元分析;参数化分析

中图分类号:TU312.1;TU391

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2025)01-0037-08

Research and Parametric Analysis on the Performance of Parallel Reinforcement of Angle Steel, the Main Material of Transmission Tower

WANG Yaling¹, CHEN Fubin¹, WENG Lanxi²

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Power China Fujian Electric Power Survey & Design Institute, Fuzhou 350000, China)

Abstract: In order to study the influence of the two strengthening methods of punching and clamping on the strengthening performance of the main material angle steel of the transmission tower and optimize the strengthening methods of the main material angle steel, the finite element models of the two strengthening methods are established. The failure forms and ultimate bearing capacity of the strengthened members under the two strengthening methods are compared and analyzed through static load tests and finite element simulation. The experimental results are in good agreement with the simulation results, which verified the accuracy of the finite element simulation. Then, on this basis, the influence of the number and location of filler plates (clamps), the spacing of bolts, the number of bolts and other parameters on the strengthening performance under the two strengthening methods are emphatically analyzed. The results show that both strengthening methods can

收稿日期:2022-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278479;51778072)

*通信作者, E-mail: fbchen88@126.com

significantly improve the bearing capacity of the members, and the failure mode of the members is mainly local buckling failure. In actual projects, for single section members, it is recommended to adopt two or three reinforcements, which are arranged at both ends of the member. The number of unilateral bolts is two, and the spacing between 120~140mm can achieve the optimal reinforcement effect. The research results have important reference significance for the analysis and design of single section angle steel reinforcement.

Keywords: angle steel; reinforcement; carrying capacity; finite element analysis; parametric analysis

随着现代工业和家庭用户对更多电力需求的增加,输电塔的旧导线和电线被替换为更大更重的线路,但这给输电塔带来了更高的负载^[1].同时,大量研究发现:在强风作用下输电塔主体部位也会因为承载力不足,从而产生损伤甚至发生倒塌^[2],因此,在实际工程中,我们需要考虑提高老旧输电塔腿的轴向载荷能力^[3],以维持增加的负载要求.

当前,由于大多数输电塔的主材部位都采用等边角钢,因此,多采用构件并联法加固^[4-5]来提高角钢承载力,这种方法主要是在主材上打孔,然后通过螺栓与填板将原构件尺寸相同的等边角钢与之并联,组成十字截面,已有研究表明:十字形组合截面具有较高的承载力^[6].近年来,学者们对打孔式加固方式也进行了大量的参数研究,祝凯等^[7]通过参数分析发现当构件长细比较大时,填板数量的增加对构件的整体抗弯能力没有明显提高,且长细比和宽厚比对构件承载力也有显著影响^[8];蒋磊等^[9]研究了螺栓间距对角钢节点部位承载力的影响;李正良等^[10]研究了角钢肢长和壁厚对十字组合双节间角钢构件承载力的影响;ZHU等^[11]通过实验研究了不同填板形式下的十字组合角钢的承载能力;孙波等^[12]通过实验发现填板沿构件轴向均匀布置时可取得较好的加固效果.

打孔式加固方法可以有效连接主副材,但是该方法需要在主材上打孔,这在一定程度上会造成施工困难,同时也会削弱主材承载力^[13],针对这一问题,姚瑶等^[14]、张亮等^[15]提出了夹具式加固方式,避免了在主材上打孔,苏子威等^[16]也通过实验证实了该方法的有效性.但是针对夹具式加固方式的受力性能和参数研究仍然较少,特别是对夹具式加固和打孔式加固,并未结合相关影响参数展开对比研究.在这种情况下,本文首先建立2种加固模型,然后通过静载试验和有限元模拟对比分析了2种加固方式下加固构件的破坏形态和极限承载力,并在此基础上,重点分析了2种加固方式下填板(夹具)数量、位置,螺栓间距、个数等参数对加固性能的影响规律,为单节间角钢加固设计提供工程建议.

1 有限元模拟

针对2种加固方式,选取尺寸为L125×8的角钢作为主材进行分析,2种加固方式的截面尺寸和立面图如图1所示,其中,辅材尺寸与主材角钢相同,均为L125×8,其构件强度均为Q355,螺栓孔径 d 为21.5 mm,一字填板尺寸为250 mm×200 mm×10 mm,十字夹具尺寸为370 mm×200 mm×10 mm.打孔式加固方法主要是通过螺栓与填板连接主、辅材,该方法需要在主材上打孔.夹具式加固方法主要通过夹具的夹固效果连接主、辅材,螺栓仅连接夹具,该方法可以避免在主材上打孔,其中ST2,ST3的加固均为首尾加固.

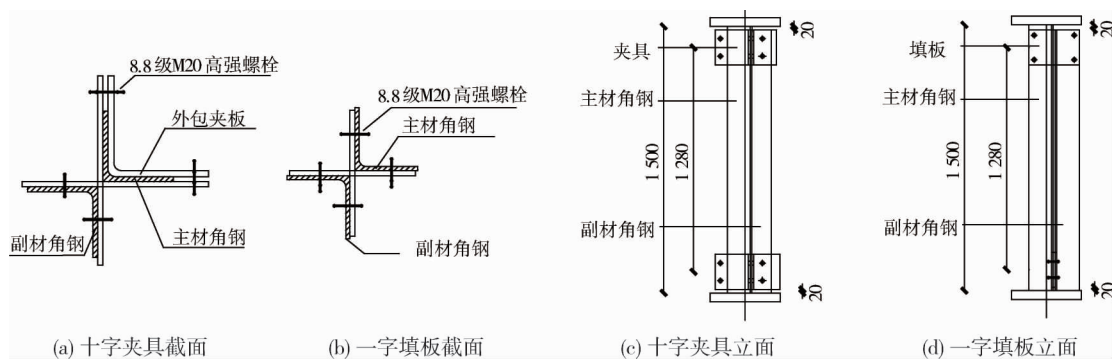


图1 2种加固方式构件

1.1 模型的建立

在建立模型时,结合所要分析问题的特点,采用8节点的三维实体线性缩减积分单元模拟,单元属性以六面体为主,该单元不易发生剪切自锁现象且该单元下位移的求解结果较为精准.在进行网格划分时,考虑到计算精度等问题,在螺栓孔以及相关连接部位需要对网格进行细部划分,而其余部位可以采用相对规整和较粗网格,这样可以减少工作量,提高计算效率,模型如图2所示.

本模型采用的接触算法为NETON-RAPHSON方法^[17],该方法可以在每个增量部开始检查所有接触相互作用状态,在定义接触对时要注意选择正确的主从面,防止出现侵彻现象.本文模型的法向接触属性为硬接触,切向接触属性主要采用罚函数,摩擦系数为0.3,其剪切力与接触压力成正比,该摩擦属性允许2个接触面有弹性滑移,可以适用于大多数接触问题,其中,夹具式加固构件总共7个接触对,打孔式加固构件总共5个接触对.

对于滑移公式的选择,ABAQUS中有2种滑移公式,分别是小滑移和有限滑移,考虑到接触面之间的相对滑动,本模型中滑移公式设置为有限滑移,该滑移公式会在求解过程中不断判断和计算主从面接触.虽然有限滑移计算成本较高,但是计算结果精度较高,也更容易收敛.

为了模拟结果的准确性,在有限元中将构件两端设置为绑定约束.设置下端加载板完全固定,对上端加载板限制其水平方向位移,仅允许竖向位移,边界条件设置如图3所示.

钢材的应力应变曲线如图4所示,采用双线性等向强化模型,其中材料的屈服强度 $f_y = 355$ MPa,弹性模量 $E_s = 210$ GPa,密度 $\rho = 7\ 850$ kg/m³,泊松比 $\mu = 0.3$,强化段的弹性模量(切线模量)为 $0.01E_s$,即为2 100 MPa.

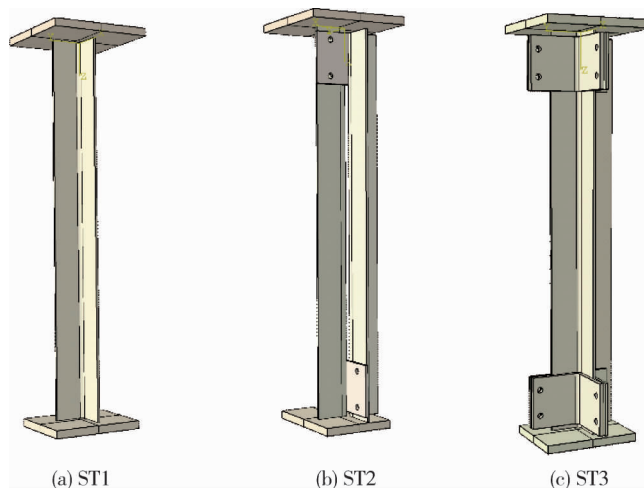


图2 模型

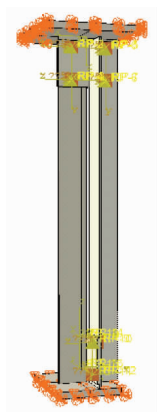


图3 边界条件加载

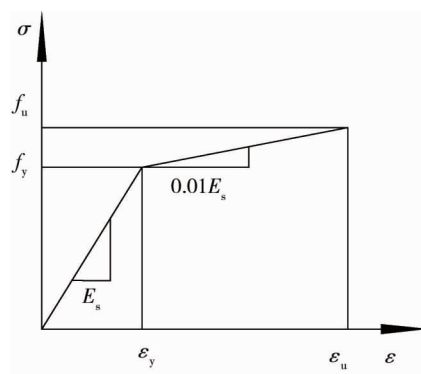


图4 材料本构关系

1.2 模型的加载方式

模型的加载分为2个步骤:

第一步:先对螺栓施加 30 kN 的预紧力,并固定螺栓长度,保持预紧力不变.为了减小模型计算收敛困难,在 ABAQUS 中,可以将螺栓的预紧力分为多个分析步来完成,让螺栓预紧力逐步施加到模型上,从而提高求解效率.

第二步:采用弧长法对构件施加轴向荷载,轴向荷载施加则采用位移加载的形式,施加在角钢形心部位,该加载方式可以很好地模拟出构件屈曲后的荷载位移状态,同时便于查看变形特点.有限元模拟中的极限荷载判定标准牛顿-拉普森法和弧长法相结合,即施加一个单位的初始位移值,在分析过程中不断按比例增加位移值,并输出对应荷载值,当施加的位移增大到一定值时,计算无法继续迭代,此时构件的承载力不再提高,构件变形明显,即可判定构件失稳.模型两端端板设置为刚度无穷大,这样其变形将不会影响角钢承载力和形心位移的提取.

由于钢材在加工和安装过程中存在一定的初始缺陷,考虑到这种缺陷对构件的影响,根据试验破坏的结果,取特征值屈曲分析一阶模态形式为基础,施加构件长度 1/1 000 的初弯曲^[18].

2 试验验证

为了验证有限元分析,本次试验采用 500 t 的 WHY-5000 压力试验机进行轴向加载,如图 5 所示.构件采用正位试验,角钢截面的形心位置与端板的形心位置重合,以保证在加载过程中,荷载作用于构件的形心位置.正式加载前施加一个较小的轴向力,避免加载时产生水平位移.正式加载过程中,为了保证测量结果的准确,同时便于观察,每级荷载增加 20~30 kN,当实测荷载及位移值稳定时再进行下一级加载,试验结果主要通过压力传感器获得,当构件出现较大的竖向位移且构件出现明显变形时,认为构件已经失稳,即停止加载.

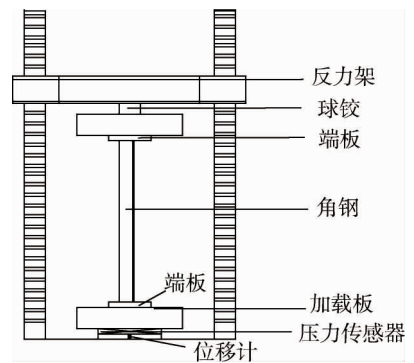


图 5 加载试验

2.1 破坏形态对比

观察构件破坏形态(图 6)可知:对于未加固构件(ST1),随着荷载的逐渐增加,侧向变形逐渐增大,最终发生整体弯曲破坏,其跨中和端部部位应力较集中;对于打孔式加固构件(ST2),其破坏主要为靠近加载端填板附近的主材的局部屈曲,从图 6(b)可以看出,填板附件应力集中,其他部位普遍应力处于弹性范围,未发生整体变形;对于夹具式加固构件(ST3),其破坏形态为 2 个夹具中间部位主材局部屈曲,从图 6(c)可以看出:屈曲部位角钢翼缘应力集中明显,夹具受力较小且没有较大变形.以上结果表明,试验破坏形态与有限元模拟结果吻合较好.

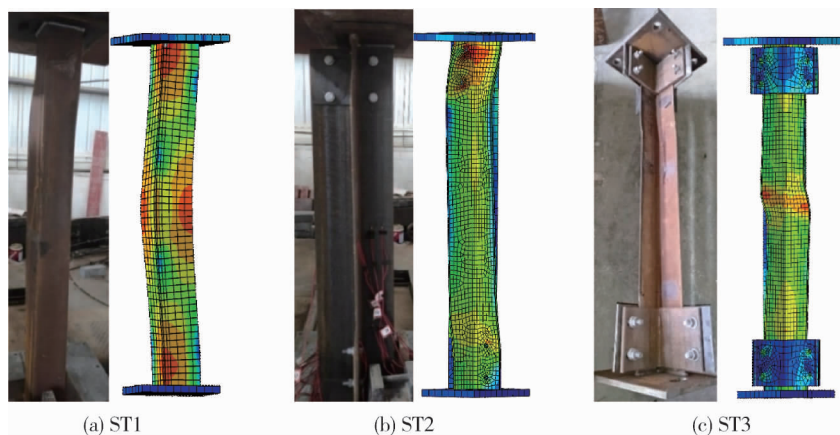


图 6 构件破坏形态对比

2.2 荷载-位移曲线对比

对比表 1 中试验和模拟结果可以发现:两者承载力相差不大,最大也不超过 8%,在误差允许的范围.同时,对比图 7 中荷载位移曲线图可以发现:有限元荷载-位移曲线和试验荷载-位移曲线接近,有限元模拟的曲线刚度要略大于试验值,且有限元模拟的承载力结果要略大于试验结果,这主要是由于有限元模

拟中设置的本构关系是理想状态下的,且试验的试件在加工和安装中存在一定的加工误差.

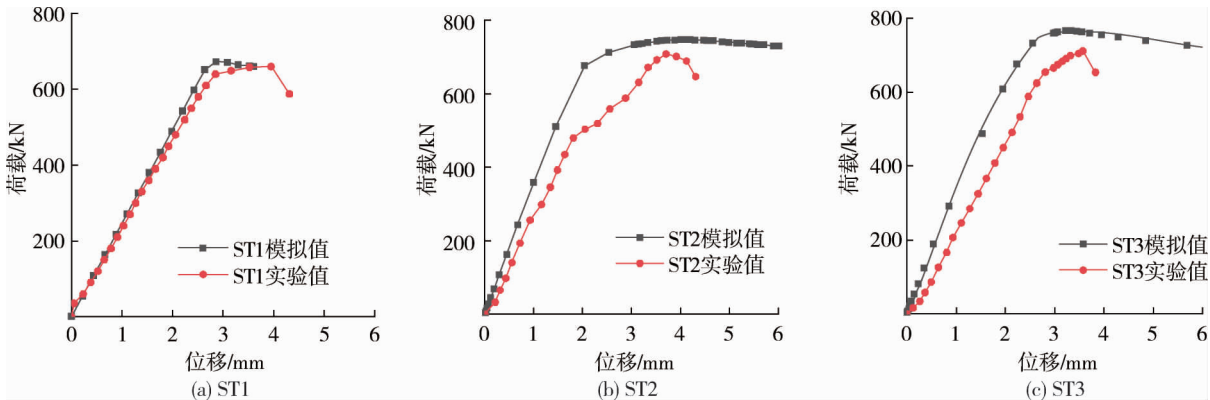


图 7 构件荷载-位移曲线对比

表 1 试验与有限元极限承载力对比

构件编号	试验极限承载力/kN	承载力提升率/%	有限元模拟极限承载力/kN	误差/%
ST1	658.1	-	672.0	2.13
ST2	708.8	7.7	746.0	5.20
ST3	711.8	8.2	767.1	7.72

3 有限元参数化分析

根据以上分析可知:有限元模拟的破坏形态,极限承载力与试验结果基本一致,这表明有限元模拟具有一定的可行性.由于影响构件受力性能的因素有很多,本节针对打孔式和夹具式加固构件展开参数化分析,主要参数有夹具(填板)数量、位置,螺栓间距、个数等.

3.1 填板(夹具)数量对承载力的影响

本节以尺寸为 L125×8 的构件为基础,保持其他条件不变,取填板(夹具)数量为 2,3,4,5 的有限元模型,其间距分别为 1 280,640,426,320 mm 进行研究.

由图 8~图 10 可以发现:填板(夹具)数量对构件承载力有着显著的影响,承载力随着填板(夹具)数量的增加而增加,并且,增加填板(夹具)组数,能一定程度提高构件的刚度,但是提升有限.对于夹具式加固构件,夹具数量为 5 个的构件,其承载力较夹具数量为 2 个的构件提升了 46 kN,提升率约为 6%,造成这一现象的原因是夹具数量增加会增加夹具与主材的接触面积,使得内力能够更多地传递给辅材角钢,从而提高构件承载力.由图 11 和图 12 可以发现:不同填板(夹具)数量的构件其破坏形态均为靠近头部加载位置的第一个填板(夹具)和第二个填板(夹具)之间的主材角钢发生局部屈曲失稳破坏,红色区域表示变形较大处,破坏时主材角钢翼缘位置的位移最大.

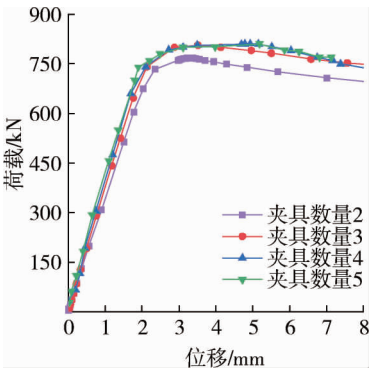


图 8 不同夹具数量的荷载-位移曲线

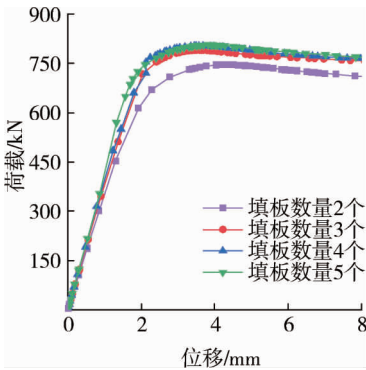


图 9 不同填板数量的荷载-位移曲线

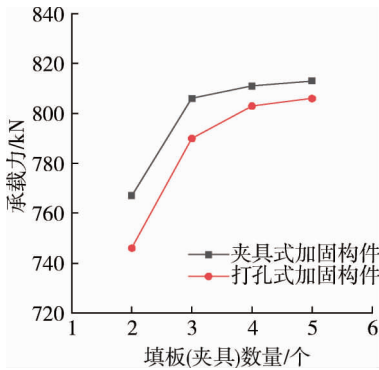


图 10 填板(夹具)数量对承载力的影响

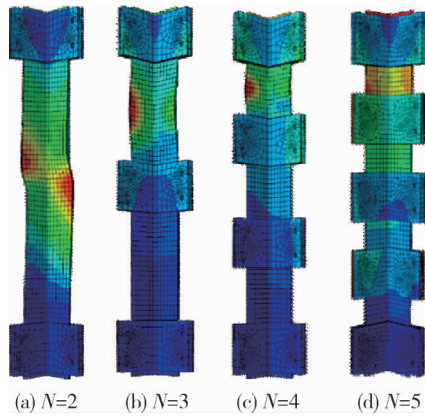


图 11 不同夹具数量构件的变形

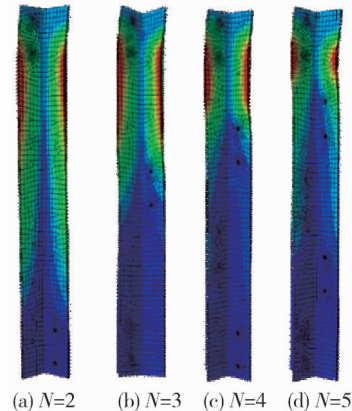


图 12 不同填板数量构件的变形

综上,增加填板(夹具)数量是提高主材构件承载力、改善其加固效果的有效措施,但是实际工程中,填板(夹具)数量增加会增加构件的材料成本,以及额外施工工作量和施工难度,因此,建议采用 2 个或 3 个填板(夹具)对主材角钢进行加固。

3.2 夹具位置对承载力影响

本节以尺寸为 L125×8 的构件为基础,保持其他条件不变,在填板(夹具)数量为 2 个的情况下,改变 2 个填板(夹具)的位置分别位于首尾,靠近上、下端部 1/4 和 1/3 处,其间距分别为 1 280,750,500 mm,进行研究。

从图 13~图 15 中可以看出:在首尾两端布置加固构件承载力提升最明显,同时,对于打孔式加固构件,在加固件数量为 2 个的情况下,在距离上、下端部 1/3 与 2/3 处加固的构件刚度最低,相对于未加固构件,承载力提升率仅为 4.7%。在首尾两端加固刚度最大,相对于未加固构件,承载力提升率达到了 14.1%。如图 16 所示,对于夹具式加固构件,首尾两端加固构件破坏形态为两夹具中部位置局部屈曲,而对于距离首尾 1/4 和 1/3 处加固构件,其破坏位置发生了改变,破坏形态均为端部局部屈曲,可见在加固件数量相同的情况下,在首尾布置加固构件可以有效约束端部的局部屈曲,增大其轴向刚度。

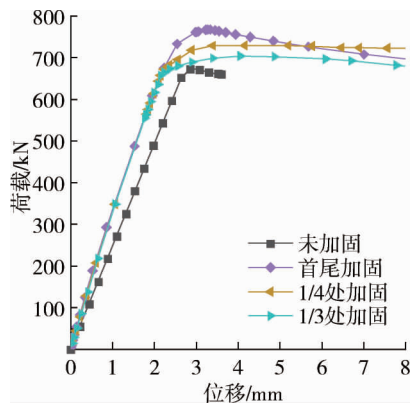


图 13 夹具式加固构件不同夹具位置的荷载-位移曲线

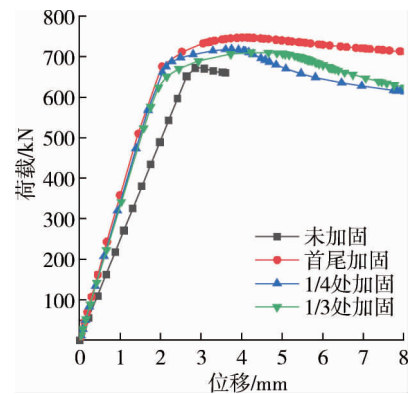


图 14 打孔式加固构件不同夹具位置的荷载-位移曲线

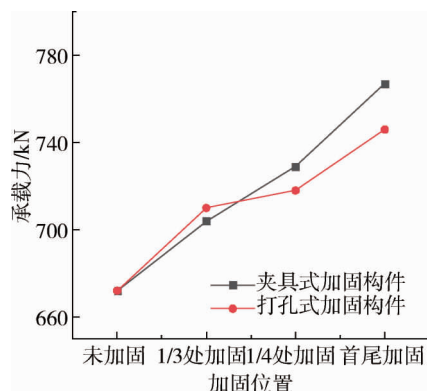


图 15 夹具位置对承载力的影响

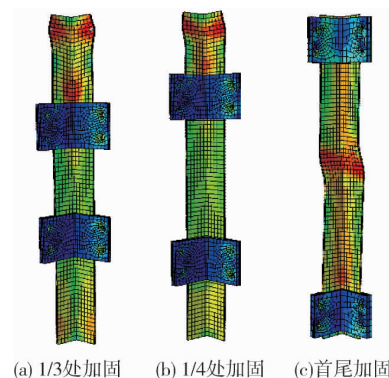


图 16 不同夹具位置破坏应力

3.3 螺栓间距对承载力影响

本节以尺寸为 L125×8 的构件为基础,分别对 2 种加固方式进行研究.保持其他条件保持不变,取螺栓间距分别为 80,100,120,140 mm 的有限元模型来研究螺栓间距对承载力的影响.

由图 17 可以发现,对于夹具式加固构件,不同螺栓间距的荷载-位移曲线在线弹性阶段几乎完全重合,刚度变化基本一致,说明螺栓间距对夹具的加固效果影响不大.而对于打孔式加固构件,由图 18 和图 19 可知:加固构件承载力随着螺栓间距的增大而增大,其中栓距为 140 mm 较栓距为 80 mm 的构件承载力提高了 30 kN,提升率为 4.2%.此外,通过参考《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[19]的构造措施,螺栓之间最小容许间距应大于 $3d_0$,即 60 mm(d_0 为螺栓孔径),且螺栓边距应当大于 $1.5d_0$,即 30 mm,本文有限元模型最小螺栓间距为 80 mm,最大螺栓间距为 140 mm,均满足规范要求.因此在实际工程中,在保证螺栓边距满足规范要求的前提下,对于打孔式加固构件,建议可以适当提高螺栓间距在 120 或 140 mm 来提高加固构件的承载力.

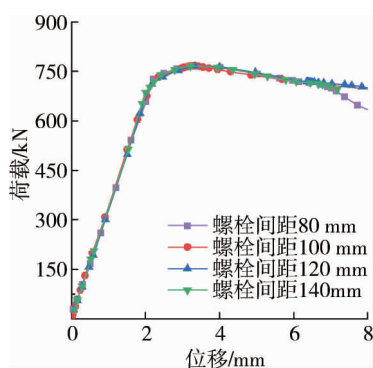


图 17 夹具式加固构件不同螺栓间距的荷载-位移曲线

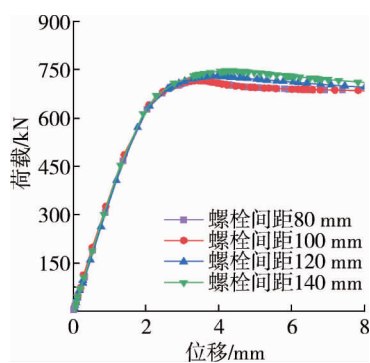


图 18 打孔式加固构件不同螺栓间距的荷载-位移曲线

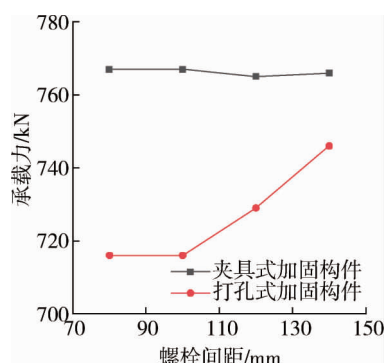


图 19 螺栓间距对承载力的影响

3.4 螺栓个数对承载力影响

为了研究螺栓个数对构件承载力的影响,本节针对 2 种加固方式,以尺寸为 L125×8 的构件为基础,保持其他条件不变,建立每个填板单边螺栓数量分别为 2,3,4,5,6 的有限元模型进行分析.

由图 22 可知:2 种加固方式下,构件的承载力随着螺栓数量的增加而增大,同时观察图 20 和图 21 的荷载位移曲线图可以发现,对于打孔式加固构件,随着螺栓个数的增加,构件的刚度有了一定的提升,但并不明显.对于夹具式加固构件,螺栓个数为 6 的构件,其承载力较螺栓个数为 2 的构件提高了 53 kN,承载力提升率达到了 6.9%,但是从整体上来看,两种加固方式的提升率都在 5% 左右,提升率不明显,因此在实际工程中,为了达到最佳加固效果和节约成本,本文建议加固件单边螺栓个数可以采用 2 个.

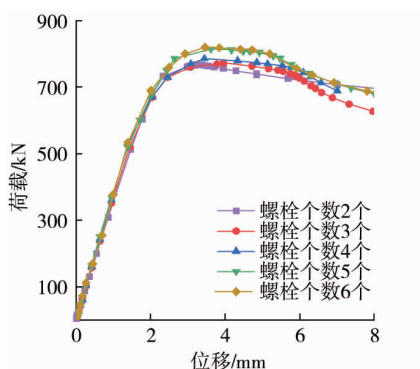


图 20 夹具式加固构件不同螺栓个数的荷载-位移曲线

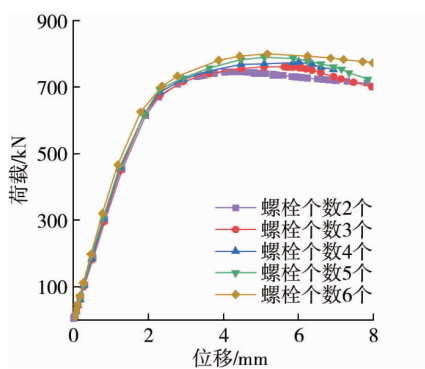


图 21 打孔式加固构件不同螺栓个数的荷载-位移曲线

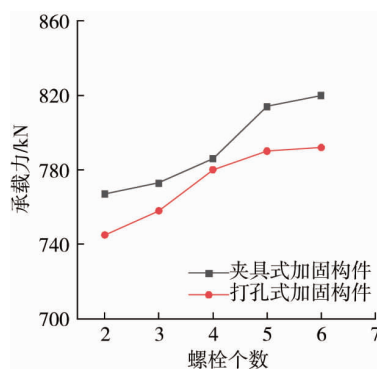


图 22 螺栓个数对承载力的影响

4 总结

1) 2种加固方式均能有效提高构件承载力,且加固后构件破坏形态发生了变化,未加固构件为整体弯曲破坏,加固后构件为局部屈曲破坏。

2) 在填板(夹具)数量不变的情况下,填板(夹具)数量的位置的变化会导致构件承载力和破坏位置发生变化,首尾两端加固可以有效提高构件承载力,同时也可以增强构件刚度,约束构件端部的局部屈曲。

3) 构件的承载力会随着填板(夹具)数量的增加而提高,但提高程度有限。同时,不同夹具数量的构件其破坏形态均为靠近加载端位置的主材发生局部屈曲失稳破坏,这说明随着夹具数量的增多,构件的轴向刚度增强,其薄弱位置发生了转移。

4) 2种加固方式下,螺栓个数对加固构件的加固效果影响不大,而螺栓间距对打孔式加固构件提升较为明显,因此在实际工程中,为了达到最佳加固效果,填板单边螺栓个数建议采用2个,螺栓间距在120~140 mm。

5) 对加固方法的研究主要集中在输电塔的局部主材部位,而未考虑在局部加固在整塔中的体现,后续会考虑将这2种加固方式应用在整塔中进行相关分析。

参考文献:

- [1] LUC, MA X, MILLS J E. Cyclic performance of reinforced legs in retrofitted transmission towers[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18(4): 1608-1625.
- [2] 邹鑫, 张思远, 路建明, 等. 基于在线稳定分析的电网风险预控与故障处置[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2017, 32(2): 22-26.
- [3] MILLS J E, XING M, ZHUGE Y. Experimental study on multi-panel retrofitted steel transmission towers[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 78: 58-67.
- [4] 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.
- [5] TEMPLE M C, SAKLA S S S, STCHYRBA D, et al. Arrangement of interconnectors for starred angle compression members[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1994, 21(1): 76-80.
- [6] 赵仕兴, 李正良. 双角钢十字组合截面压杆承载力研究[J]. 钢结构, 2012, 27(1): 5-10.
- [7] 祝凯, 郭耀杰, 孙云, 等. Q420大规格双角钢十字组合截面构件受力性能[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(30): 13016-13023.
- [8] 张勇, 施刚, 刘钊, 等. 高强度等边角钢轴心受压局部稳定的有限元分析和设计方法研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(9): 27-34.
- [9] 蒋磊, 郭耀杰, 武韩青. 螺栓间距对大规格角钢节点受力性能的影响[J]. 建筑结构, 2017, 47(13): 26-30.
- [10] 李正良, 黄海斌, 赵楠, 等. 高强度双角钢十字组合截面双节间压杆受力性能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(2): 64-74.
- [11] ZHUGEY, MILLS J E, MA X. Modelling of steel lattice tower angle legs reinforced for increased load capacity[J]. Engineering Structures, 2012, 43: 160-168.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 张亮, 唐亚可, 田利, 等. 输电铁塔角钢无损加固分析与计算方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2023, 45(4): 94-102.
- [16] 苏子威, 李敏生, 严斌, 等. 新型构件并联法加固角钢输电塔试验研究及设计建议[J]. 建筑结构, 2020, 50(6): 95-98.
- [17] 宫龙颖. ABAQUS接触问题浅析[J]. 中国煤炭, 2009, 35(7): 66-68.
- [18] 班慧勇, 施刚, BIJLAARD F S K, 等. 端部带约束的超高强度钢材受压构件整体稳定性性能的有限元分析[C]// 2010全国钢结构学术年会论文集, 2010: 403-406.
- [19] 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.