

碳纤维加固单管塔内法兰节点试验研究

陈 晨

同济大学土木工程学院，上海

收稿日期：2025年7月27日；录用日期：2025年8月17日；发布日期：2025年8月29日

摘 要

通信单管塔一般根据塔段之间的连接节点类型分为插接式单管塔、内法兰单管塔、外法兰单管塔。内法兰单管塔常常因维护不到位出现内法兰节点破坏的情况。本文提出在内法兰节点外侧粘贴碳纤维板的方式加固单管塔内法兰节点，为了验证其加固效果，制作三个内法兰节点模型进行静力加载试验，其中包括未加固内法兰节点模型、粘贴碳纤维板加固后内法兰节点模型、粘贴钢板加固后内法兰节点模型。试验结果表明，与粘贴钢板相比，粘贴碳纤维板能够更好地与内法兰节点协同作用，并且能够有效提升单管塔内法兰节点的承载能力。

关键词

单管塔，内法兰节点，碳纤维板，加固

Experimental Study on the Inner Flange Joints of Monopole Strengthened with Carbon Fiber

Chen Chen

College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai

Received: Jul. 27th, 2025; accepted: Aug. 17th, 2025; published: Aug. 29th, 2025

Abstract

Communication monopoles are generally classified into slip-joint monopoles, inner flange monopoles, and outer flange monopoles based on the type of connection nodes between tower sections. Inner flange single-tube towers often suffer from inner flange node damage due to inadequate maintenance. This paper proposes to reinforce the inner flange nodes of single-tube towers by pasting

carbon fiber plates on the outside of the inner flange nodes. To verify the reinforcement effect, three inner flange node models were made for static loading tests, including the unreinforced inner flange node model, the inner flange node model after pasting carbon fiber plates, and the inner flange node model after pasting steel plates. The results show that compared with adhering steel plates, adhering carbon fiber plates can better work in synergy with the inner flanges and effectively enhance the load-bearing capacity of the inner flanges in monopole.

Keywords

Monopoles, Inner Flange, Carbon Fiber Plate, Reinforcement

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在通信行业铁塔建设中,单管塔与格构式钢塔相比,具有体形优美、节省空间资源、塔体受风面积小等优势被普遍采用。内法兰节点为连接单管塔节段的常用节点之一,随着单管塔上部天线荷载的增加,由于内法兰节点承载能力不足而导致的倒塔事故时有发生,例如:2016年3月某单管塔因第二塔段内法兰螺栓发生断裂,导致单管塔发生倒塌[1]。因此对单管塔内法兰节点进行加固显得尤为重要。

目前常用的提高钢结构承载能力的加固方法有:粘贴钢板加固法、焊接加固法、粘贴纤维增强复合材料加固法、组合加固法、预应力加固法、连接和节点加固法等[2]。

内法兰节点通常位于距离地面 10 m 左右,施工条件较差,如果进行高空焊接加固无法保证焊接质量;对于粘贴钢板加固单管塔内法兰节点的加固方式,由于钢板自重较大,搬运和安装需要重型器械配合,高空作业环境会增大施工难度;碳纤维板因为材质轻盈、强度高、施工便利等优点被广泛运用在加固领域,适合用于单管塔内法兰节点加固。

近年来国内已有多位学者对碳纤维板加固钢结构进行研究,2023年孙书生和卢岩[3]建立有限元模型探究碳纤维板层数对 H 型钢梁抗弯的影响,得出粘贴碳纤维板层数不得超过 3 层的结论;2024年朱佩云等[4]通过试验和有限元建模分析研究剪力滞对碳纤维板加固钢梁的影响;2025年张鹏旭[5]采用 ABAQUS 有限元建模软件对碳纤维板加固钢梁进行有限元建模分析,研究梁的剪跨比、跨高比等因素对加固梁的界面剥离及剥离抗力的影响。

本文提出在单管塔内法兰节点外侧粘贴碳纤维板的加固方式,并制作了三个内法兰节点模型,分别为替换段 A:未加固内法兰节点,替换段 B:粘贴碳纤维板加固内法兰节点;替换段 C:粘贴钢板加固内法兰节点。本文分别对三个内法兰节点模型进行静力加载试验,通过对比替换段 A 及替换段 B 验证粘贴碳纤维板加固内法兰节点的有效性,通过观察替换段 B 及替换段 C 对比粘贴碳纤维板和粘贴钢板的协同受力情况。

2. 试验塔模型设计及制作

试验塔为正十六边型,外接圆直径 600 mm,共 12.7 m 高,分为三段,其中位于中间的塔段为可替换段,共 2.2 m 长,通过上下两个外法兰实现可替换,替换段的位置见图 1,试验塔顶部设置 $t = 8 \text{ mm}$ 拉耳方便加载拉线的固定,顶部水平力到内法兰节点中间的距离为 10.0 m,底部设有底法兰与基础相连。

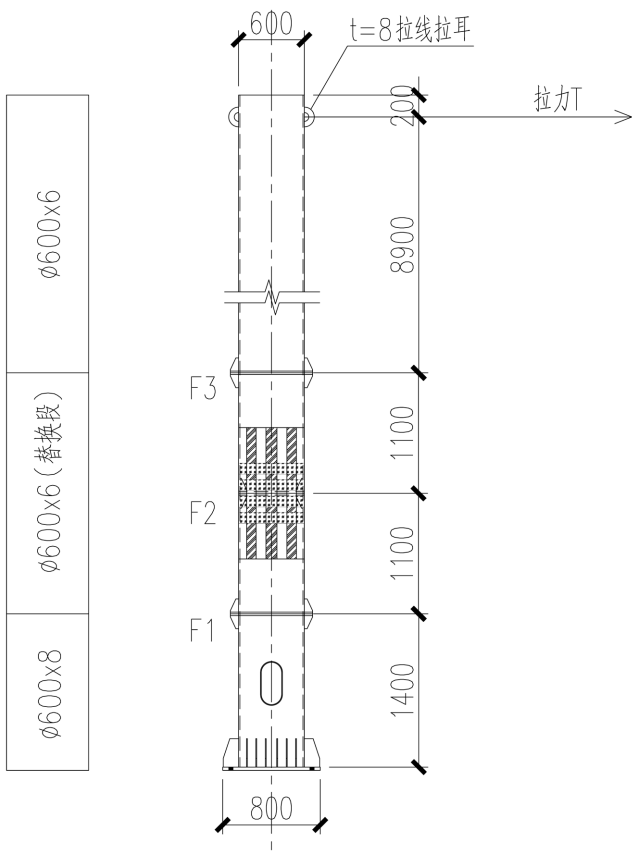


Figure 1. Elevation of test monopole
图 1. 试验单管塔立面图

替换段上下两端通过外法兰节点 F1、F3 与其余部分相连，内法兰节点 F2 为本次加固对象。经过设计，F1 及 F3 的节点承载能力为 F2 的 1.73 倍，确保试验模型加载过程中外法兰节点 F1 及 F3 不会先于 F2 发生破坏，法兰相关信息见表 1。

Table 1. Parameters of flanges
表 1. 法兰参数

法兰编号	法兰外径(mm)	法兰中径(mm)	法兰内径(mm)	法兰板厚(mm)	螺栓规格	螺栓数量	螺栓等级
F1	760	680	600	16	M16	16	10.9 级
F2	600	520	440	16	M16	16	8.8 级
F3	760	680	600	16	M16	16	10.9 级

试验共制作三个替换段，分别为替换段 A (未加固段)、替换段 B (粘贴碳纤维加固段)、替换段 C (粘贴钢板加固段)。

2.1. 替换段 A

替换段 A 未进行任何加固处理，替换段 A 见图 2，替换段 A 法兰信息见表 1。其余替换段均为在替换段 A 的基础上进行加固。

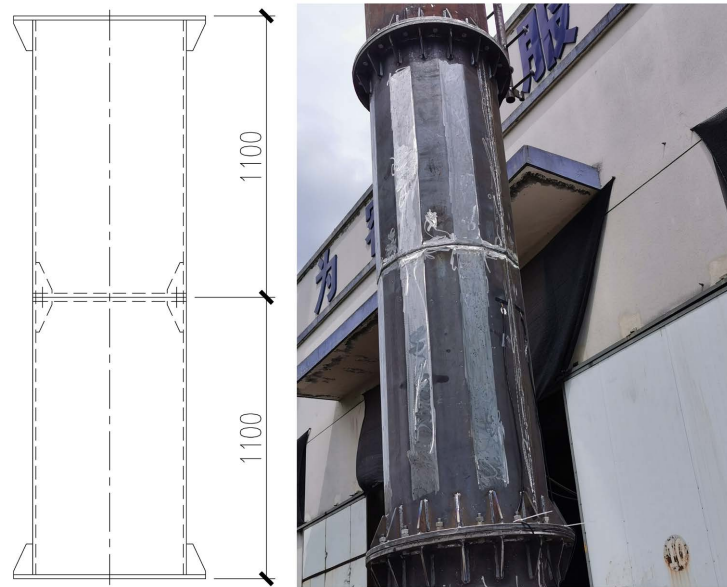


Figure 2. Replace section A
图 2. 替换段 A

2.2. 替换段 B

替换段 B 内法兰节点处粘贴 8 根 1200 mm 长碳纤维板进行加固，碳纤维板规格为 2.0 mm 厚，100 mm 宽，在内法兰节点附近碳纤维板外侧粘贴 4 道环向碳纤维布来防止碳纤维板张开脱胶，其中每道环向碳纤维布粘贴两层，每层碳纤维布厚度 0.167 mm，宽 100 mm，碳纤维布中心线间隔 150 mm，以内法兰节点接缝处为对称轴对称布置，替换段 B 见图 3。

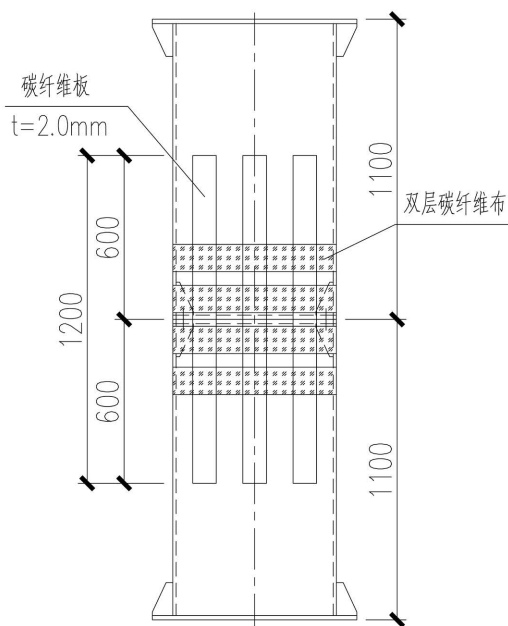


Figure 3. Replace section B
图 3. 替换段 B

2.3. 替换段 C

替换段 C 内法兰节点处粘贴 8 根 1200 mm 长钢板进行加固, 粘贴加固流程同碳纤维板加固施工流程, 胶采用粘钢胶, 钢板材料为 Q355B, 规格为 1.4 mm 厚, 100 mm 宽, 在内法兰节点附近钢板外侧粘贴 4 道环向碳纤维布来防止钢板张开脱胶, 其中每道环向碳纤维布粘贴两层, 每层碳纤维布厚度 0.167 mm, 宽 100 mm, 碳纤维布中心线间隔 150 mm, 以内法兰节点接缝处为对称轴对称布置, 替换段 C 见图 4。

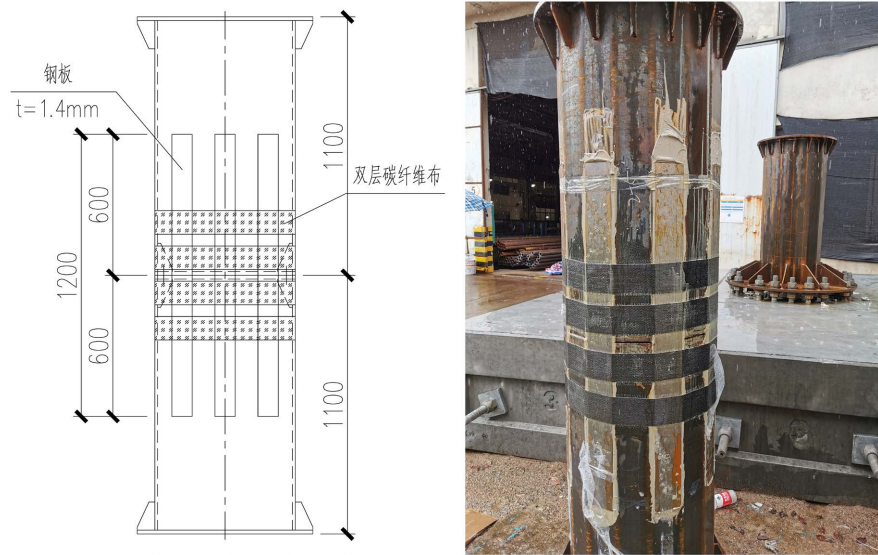


Figure 4. Replace section C
图 4. 替换段 C

3. 试验数据及分析

3.1. 传感器布置

为了测量内法兰节点处螺栓受力情况, 共布置 6 个螺栓测力计并对其进行编号, 其中螺栓测力计 1、螺栓测力计 2, 布置在内法兰螺栓最大拉力处; 螺栓测力计 6 布置在螺栓最小压力处; 螺栓测力计 3~5 布置在中间的位置, 间隔布置; 试验内法兰节点处螺栓测力计布置示意图见图 5。

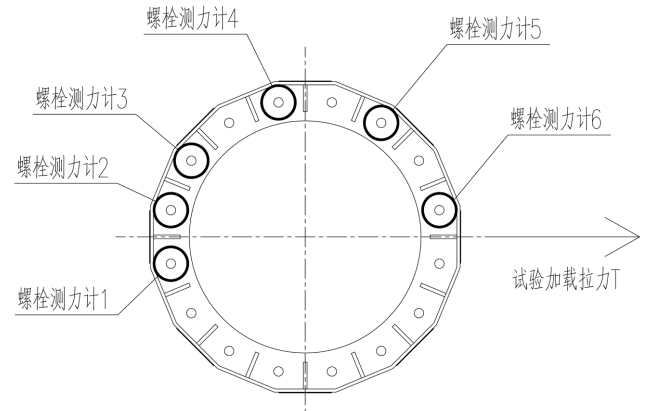


Figure 5. Sensor placement
图 5. 传感器布置

定义靠近加载方向的一侧筒体为受压侧，远离加载方向的一侧为受拉侧。替换段 B 受拉侧及受压侧筒体应变片布置见图 6；替换段 C 应变片布置位置同替换段 B；替换段 A 应变片布置仅包括：受拉侧筒体应变片 1、受拉侧筒体应变片 2、受压侧筒体应变片 1。

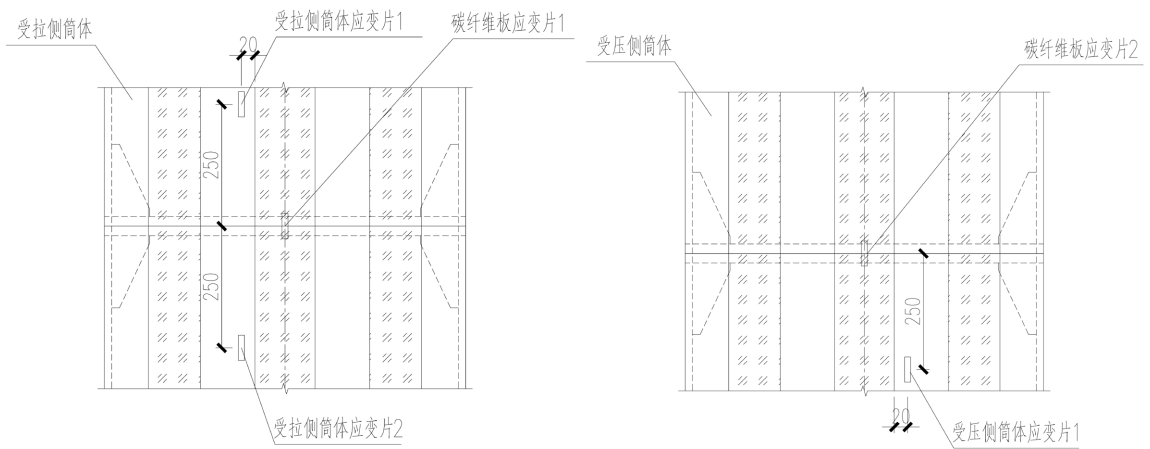


Figure 6. Strain gauge placement
图 6. 应变片布置

3.2. 试验数据分析

图 5 中由于存在两个拉力最大螺栓：螺栓 1 和螺栓 2，为了减少由于加载方向误差引起的螺栓最大拉力测量不准确，选取两个最大受力螺栓的平均值作为试验得到的内法兰螺栓受力的最大值。试验荷载作用下三个替换段的螺栓最大拉力见图 7。

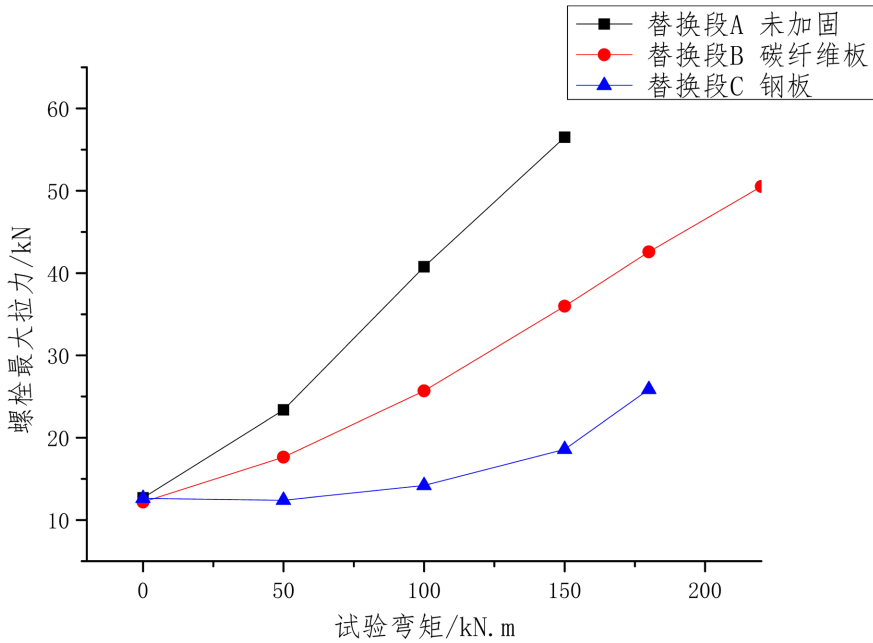


Figure 7. Maximum pulling force of bolt
图 7. 螺栓最大拉力

从图 7 最大螺栓拉力减少程度来看, 粘贴钢板加固后的内法兰节点即替换段 C 螺栓最大拉力减少更多, 但观察图 8 替换段 C 的荷载 - 应变曲线, 在试验荷载加载至 $180 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 时, 内法兰节点处最大螺栓拉力为 25.86 kN , 远未达到螺栓承载能力设计值 62.80 kN , 受拉侧钢板已经屈服破坏, 表明粘贴钢板加固内法兰节点后, 钢板与内法兰节点之间不能较好地协同工作。

粘贴碳纤维板加固后, 在 $150 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 的试验荷载作用下, 内法兰节点螺栓受力从 56.5 kN 降至 36.0 kN , 内法兰节点处最大螺栓拉力减少 36.3% 。

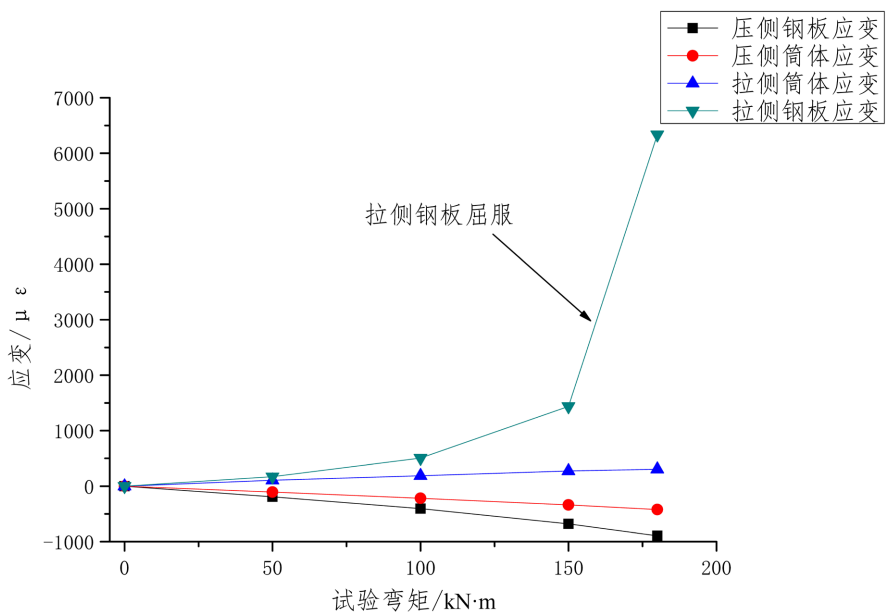


Figure 8. Load-strain curve of replace section C
图 8. 替换段 C 荷载 - 应变曲线

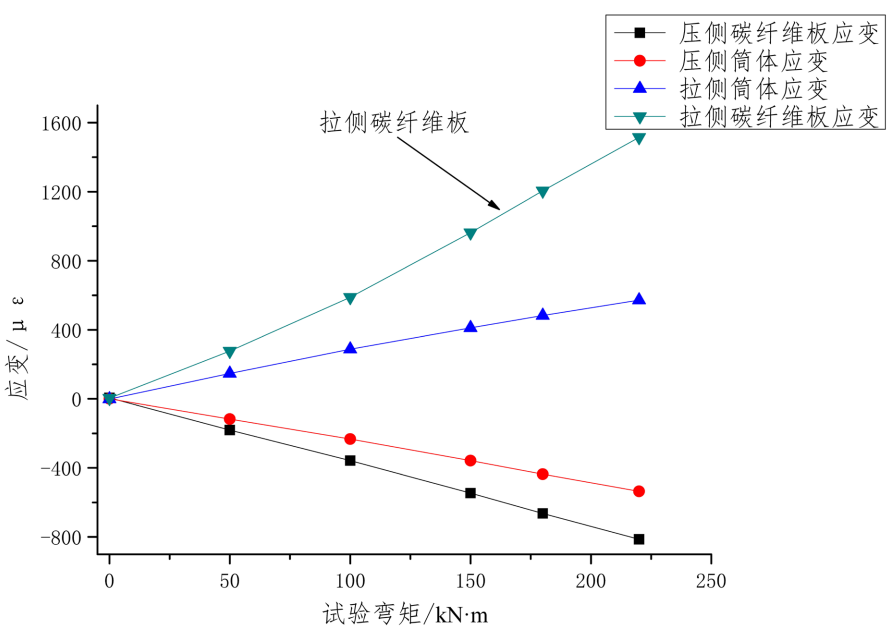


Figure 9. Load-strain curve of replace section B
图 9. 替换段 B 荷载 - 应变曲线

根据图 9 中替换段 B 的荷载 - 应变曲线可以看到, 拉侧碳纤维板应变随着试验荷载均匀增加, 并且碳纤维板在内法兰螺栓力达到 0.8 倍的螺栓承载力设计值时, 节点未发现明显破坏, 碳纤维板与内法兰节点能够较好地协同工作。

4. 试验结果

本文对三个内法兰节点模型的加载试验, 分析试验数据得出以下结论:

1) 粘贴碳纤维板加固后, 内法兰节点模型螺栓最大受力减少 36.3%, 能够显著降低单管塔内法兰节点的螺栓受力, 加固效果显著。

2) 粘贴钢板加固后, 内法兰节点模型螺栓最大受力能够显著降低, 但钢板与内法兰节点不能较好地协同工作。

3) 与粘贴钢板加固相比, 粘贴碳纤维板加固内法兰节点后, 碳纤维板能够更好地与内法兰节点协同工作。

本文研究仍存在一定的局限性, 研究结果仅针对单个内法兰节点试件, 结果有待重复性验证; 本文仅对比静力荷载作用下粘贴碳纤维板加固内法兰节点的加固效果, 未来考虑进一步探究粘贴碳纤维板对单管塔内法兰节点抗疲劳性能的影响; 粘贴碳纤维板厚度、碳纤维板数量、碳纤维板长度对单管塔内法兰节点的承载力及抗疲劳性能的影响需未来进一步研究。

参考文献

- [1] 李不凡. 单管塔风载失效及疲劳分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [2] 王元清, 宗亮, 施刚, 石永久. 钢结构加固新技术及其应用研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(2): 1-6+22.
- [3] 孙书生, 卢岩. CFRP 板加固 H 型钢梁抗弯性能分析[J]. 安徽建筑, 2023, 30(5): 86-88.
- [4] 朱佩云, 李晓章, 余明明, 等. 剪力滞对 CFRP 板-钢梁加固界面应力的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(5): 1020-1028.
- [5] 张鹏旭. 碳纤维板加固 H 型钢梁剥离过程模拟及抗力分析[J]. 工程建设, 2025, 57(2): 14-20+30.