

# 钢管间距对共享铁塔挂载连接件承载性能影响分析

钟炜辉<sup>1,2</sup>, 张越<sup>1</sup>, 郑玉辉<sup>1</sup>, 谭政<sup>1</sup>, 韩曙华<sup>1</sup>, 李熔健<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 共享铁塔是指在输电铁塔上加装通信平台, 实现电力和通信的资源共享。为满足挂载高度和输电塔杆系分布的需求, 可通过具有不同钢管间距的挂载连接件实现通讯设备与输电塔的相互连接。为研究不同钢管间距下挂载连接件的初始刚度、承载性能及破坏机制, 设计制作了三个挂载连接件试件, 并利用数值模拟建立模型进行了拓展分析。分析结果表明: 各部件可整体协同变形, 试件最终的破坏模式均为钢管于底部加劲肋或顶部端板处断裂, 挂载连接件的变形形态受钢管间距影响较为明显, 其塑性承载能力和初始刚度随间距的增大而减小, 极限位移则随钢管间距的增大而增大。所提出的挂载连接件屈服荷载及位移的计算公式, 可为同类的工程设计提供参考。

**关键词:** 共享铁塔; 挂载连接件; 间距; 数值模拟; 理论计算

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2024)04-0483-09

## Analysis on effect of steel pipe spacing on bearing performance of the shared tower mounting connector

ZHONG Weihui<sup>1,2</sup>, ZHANG Yue<sup>1</sup>, ZHENG Yuhui<sup>1</sup>, TAN Zheng<sup>1</sup>, HAN Shuhua<sup>1</sup>, LI Rongjian<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education (XAUAT), Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The shared tower refers to the installation of communication platform on the transmission tower to realize the sharing of power and communication resources. To meet the requirements of mounting height and distribution of the transmission tower, the interconnection between the communication equipment and the transmission tower can be realized through the mounting connectors with different steel pipe spacing. To study the initial stiffness, load-bearing performance and failure mechanism of the mounting connector under different steel pipe spacing, three specimens of mounting connectors were designed and fabricated, the model was established by numerical simulation for extended analysis. The results show that the components can be deformed collaboratively, and the failure modes are all fracture at the rib stiffener or top end plate of rectangular steel pipe. The deformation shape of the mounting connector is obviously affected by steel pipe spacing, and its plastic bearing capacity and initial stiffness decrease with the increase of steel pipe spacing, while the ultimate displacement increase with the increase of steel pipe spacing. The proposed calculation formulas for the yield load and displacement of the mounting connector can provide a reference for similar engineering design.

**Key words:** shared tower; mounting connector; spacing; numerical simulation; theoretical calculation

共享铁塔是指在输电铁塔上加装通信平台, 实现电力和通信的资源共享, 如图 1 所示。当前, 电力塔和通信塔都是由各自的运营公司承建, 建设时往往面临着选址困难、土地资源有限、资金投入大等诸多问题, 而将通信基站挂载在电力铁塔上, 不仅能够在不新建铁塔的同时满足通信信号覆盖范围的需要, 同时能够实现一塔多用, 减

少土地资源的浪费, 极大地节约社会资源。随着通信技术, 电力网络的发展, 共享铁塔已经得到了一定程度的普及应用。部分学者针对共享铁塔在使用过程中遇到的问题做了一定程度的研究。Saber<sup>[1-2]</sup>基于输电线路理论和分布参数线路模型提出一种适用于共享铁塔的故障定位算法; 刘蕊等<sup>[3]</sup>研究了不同地网连接方式下共享铁塔遭受雷击时

接地网防雷的可靠性;庄文兵等<sup>[4]</sup>基于理论计算和现场实测的方法对共享铁塔的电磁环境进行分析;刘康等<sup>[5]</sup>分析了共享铁塔在遭受雷击时的电磁分布,结果表明通信基站的电磁防护可以直接应用于共享铁塔;白永祥等<sup>[6]</sup>提出了一种远程监测技术能够对铁塔的变形实时监测,但上述研究多集中于共享铁塔的电磁环境,缺乏对联系铁塔主材与通信设备的挂载连接件力学性能的研究.挂载连接件的力学性能直接影响通信设备与输电塔是否能很好的协同工作.同时挂载连接件钢管间距的确定需考虑输电塔主材本身的长度与挂载位置,在不同的工程实践中,此间距为可变量.因此,本文以不同间距的挂载连接件为对象进行试验研究.



图 1 共享电塔示意图

Fig. 1 The shared tower

国内外学者对连接件力学性能的影响因素开展了相关试验研究与理论分析.赵晨等<sup>[7]</sup>进行了 66 个开孔板连接件试件的抗剪承载性能试验并提出抗剪承载力计算公式;唐继朋等<sup>[8]</sup>通过理论及有限元分析,对共享铁塔抗滑移连接件的承载性能及影响因素进行分析;殷占忠等<sup>[9]</sup>通过数值模拟分析连接件的长度、截面尺寸、间距及长度比等参数对 K 形偏心支撑钢框架力学性能的影响;李幅昌等<sup>[10-11]</sup>提出了两种  $\pi$  形连接件,并开展推出试验对其抗剪性能展开研究;Vianna 等<sup>[12]</sup>就 T 形开孔板连接件的力学性能开展试验研究,基于试验结果进行理论计算,为连接件的设计提供参考;Ahn 等<sup>[13]</sup>对开孔板连接件进行研究并提出改进的抗剪承载力方程;Samy 等<sup>[14]</sup>通过数值模拟研究摩擦系数对连接件滑移行为的影响;Kim 等<sup>[15]</sup>提出一种新型剪力连接件并对其受剪性能和延性进行研究;Zheng 等<sup>[16]</sup>开发了一种新的 perfbond 连接件,通过大批量的试验与模拟,建立相应的抗剪强度分析模型.

上述研究可为挂载连接件局部构件的设计提供一定参考.然而,对于挂载连接件受力行为的研究几乎空白,由于挂载高度和输电塔杆系分布的限制,连接件外伸钢管的间距须与之匹配.为定量分析钢管间距对挂载连接件受力机理的影响,本文设计制作 3 个 1:1 具有不同间距的挂载连接件并开展试验,研究其初始刚度、承载性能及破坏机制.基于试验结果进行数值模拟和理论分析,从而深入探究钢管间距对挂载连接件承载力及初始刚度的影响.最后,通过组件法思路提出挂载连接件屈服荷载及位移的计算公式,为同类的工程设计提供参考.

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

结合实际工程及当前研究<sup>[18-19]</sup>,共享铁塔的建立通常是在输电铁塔上加挂通信设备,而输电塔的主材又多以角钢为主,故本文基于规范<sup>[17]</sup>以及输电塔和已经存在的部分共享铁塔实例进行挂载连接件的设计,试件示意图如图 2 所示.

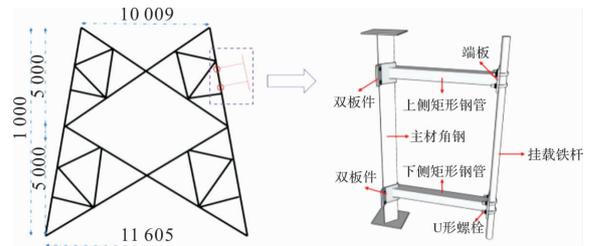


图 2 挂载连接件示意图

Fig. 2 The mounting connector

为明晰钢管间距变化对连接件力学性能与破坏机制的影响,共设计了 3 个足尺试件,除钢管间距不同外,各试件其余参数保持一致(表 1).由图 2 可知,所设计的挂载连接件主要通过矩形钢管及细部连接将主材角钢与挂载铁杆相连.钢管两侧分别与双板件及端板焊接,双板件通过 10.9 级 M20 高强螺栓连接,挂载铁杆则通过 U 形螺栓与端板连接,各试件及连接的细部尺寸分别见图 3、图 4.

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of specimens

试件	钢管间距/mm
KL-1	2 000
KL-2	1 500
KL-3	1 000

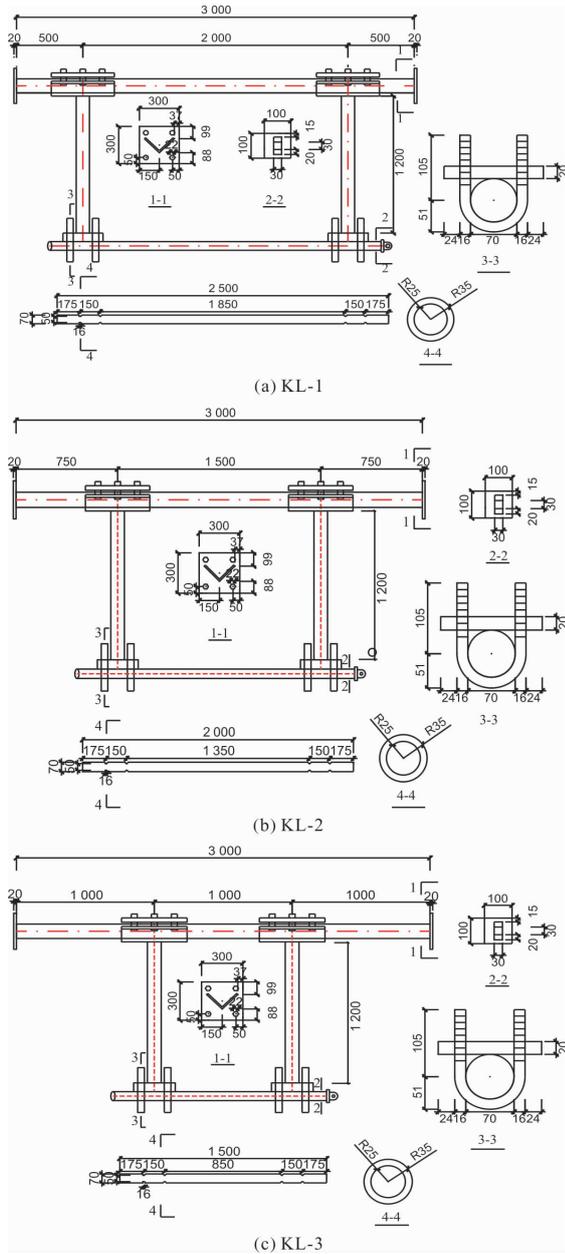


图 3 试件整体几何尺寸 (mm)

Fig. 3 Overall geometric dimensions of specimens/mm

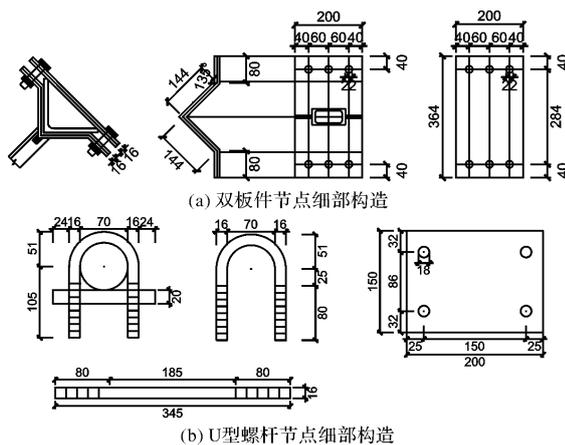


图 4 节点详细构造 (mm)

Fig. 4 Detailed geometric dimensions/mm

### 1.2 材性试验

试验所用钢材均为 Q355 钢, 根据 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验: 第 1 部分: 室温试验方法》<sup>[20]</sup> 测定钢材的弹性模量  $E$ , 屈服应力  $f_y$ 、极限抗拉强度  $f_u$  和伸长率  $\delta$ 。钢材材性试验测得相关指标见表 2。

表 2 试件材性结果

Tab. 2 Material properties of specimens

部位	屈服强度 $f_y$ /MPa	极限强度 $f_u$ /MPa	弹性模量 $E$ /GPa	伸长率 $\delta$ /%
主材角钢	397	577	2.10	23
矩形钢管	492	547	2.06	17
挂载铁杆	479	695	2.10	23
U型螺栓	450	598	2.08	27
双板件	442	555	2.15	22

### 1.3 加载装置与制度

试验目的主要是探究钢管间距变化对连接件承载性能及破坏模式的影响, 加载装置如图 5 所示。

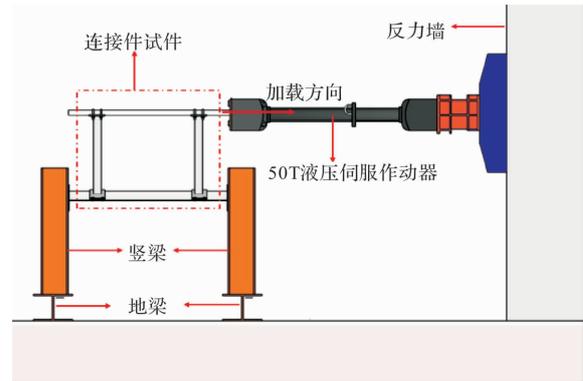


图 5 加载装置

Fig. 5 Loading device

采用位移控制的拉力加载方式进行试验, 具体加载过程如下: 保持每级 5 mm/min 速率进行加载直至试件发生首次破坏(构件出现断裂), 首次破坏后以每级 10 mm/min 的速率完成后续加载直至结束, 加载过程中需注意每级加载结束后维持 3~5 min 不变以保证结构变形稳定。

### 1.4 测量方案

使用 50 t 液压伺服作动器进行整个试验过程的加载, 试件的变形及抗力通过位移计、应变片等采集, 其中, 应变测点主要布置在矩形钢管的端部与跨中, 用以测算构件的轴向应变; 位移计则主要布置在钢管的跨中及与主材角钢相连的底部, 相关测点布置如图 6 所示。

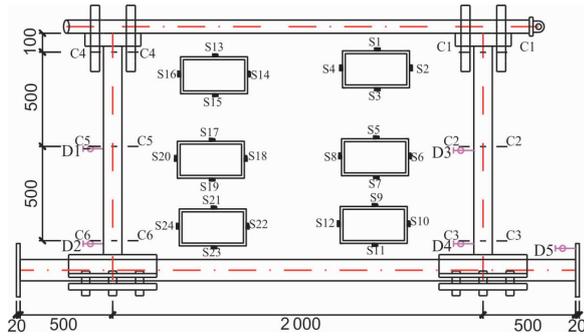


图 6 测量方案(mm)

Fig. 6 Measurement scheme/mm

## 2 试验结果分析

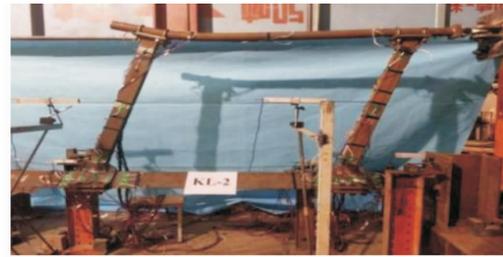
### 2.1 试验现象与破坏模式

三个试件的破坏过程和破坏现象基本相似,大致可分为以下三个阶段:

(1)线弹性阶段:该阶段各试件处于弹性工作状态,结合图 8 可知,试件承载力呈线性爬升趋势.两侧钢管大致以直线形态向右(加载方向)同步倾斜,试件各部件可整体协同工作,各部件保持完好;

(2)整体变形阶段:随着加载位移的增加,试件承载力上升速度减缓,试件各部件逐渐进入塑性.试件整体继续向右(加载方向)同步倾斜,顶部的挂载铁杆(实心圆杆)逐渐呈现出较为明显的 S 形形态,在左右两侧矩形钢管处分别呈下凹与上凸形态;

(3)破坏阶段:该阶段从荷载达到峰值到最终试件破坏.峰值荷载后,试件承载力持续下降.左右两侧矩形钢管相继于底部加劲肋或顶部端板处出现裂缝并延伸,最终随着矩形钢管于底部加劲肋或顶部端板处裂缝发生断裂,试件完全失去承载能力.该阶段明显可见,各试件的塑性变形和破坏均发生在底部加劲肋或顶部端板处.各试件最终破坏形态如图 7 所示.



试件整体变形形态



左侧钢管加劲肋处断裂



右侧钢管顶部端板处断裂

(b) 试件KL-2



试件整体变形形态



右侧钢管加劲肋处断裂



右侧钢管顶部端板处断裂

(c) 试件KL-3

图 7 破坏形态

Fig. 7 Failure modes

### 2.2 荷载位移曲线

图 8 是三个试件 KL-1、KL-2、KL-3 的荷载位移曲线对比:可以看出,试件 KL-2 的荷载位移曲线明显不同于试件 KL-1 与 KL-3,这是由于矩形钢管破坏位置不同所致.由图 8 可知,三个试件荷载位移曲线的发展过程均为随加载位移的增大,其荷载逐渐增大直至达到极限荷载,之后当加载位移进一步增大时,试件发生断裂并最终破坏.由表 3 可知,试件 KL-2 的极限荷载高于另外两个试件 KL-1 和 KL-3,分别高出 2.25% 和 3.76%;试件 KL-1 的极限位移也大于另外两个试件,分别高出 45.5% 和 15.6%.挂载连接件的破坏模式受钢管间距变化的影响较小,三个试件最终的破坏模式均为钢管于底部加劲肋或顶部端板处断裂.随钢管间距的增大,顶部的挂载铁杆所呈现出的 S 形形态越发明显.三个试件的初始刚度分别为



试件整体变形形态



右侧钢管加劲肋处断裂



左侧钢管加劲肋处断裂

(a) 试件KL-1

1.26、1.35 以及 1.36 kN/mm, 试件的初始刚度随钢管间距的减小而增大, 这是因为随间距减小, 挂载铁杆对矩形钢管的约束作用增强, 在小变形下钢管即可充分参与工作, 同挂载铁杆协同受力, 从而提升试件的初始刚度。

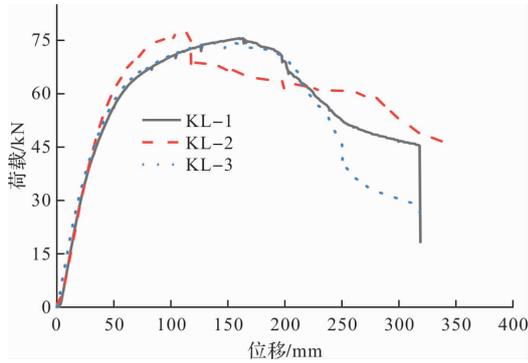


图 8 不同间距下荷载位移曲线对比

Fig. 8 Comparison of load-displacement curves under different spacing

表 3 试验结果

Tab. 3 Results of specimens

试件	极限荷载/kN	极限位移/mm	初始刚度/kN·mm <sup>-1</sup>
KL-1	75.5	163	1.26
KL-2	77.2	112	1.35
KL-3	74.4	141	1.36

### 3 参数分析

#### 3.1 有限元模型的构建

通过 ABAQUS 建立数值模型, 并采用显示动力分析模拟试件的受力行为. 钢材与高强螺栓的本构关系分别如图 9(a)、(b)所示. 模型各部件之间的接触关系采用通用接触, 切线方向为各向同性的库伦摩擦接触, 法线方向设为“硬”接触, 摩擦系数取 0.3. 将矩形钢管与板件绑定 (tie) 以模拟试验时二者之间的焊接. 各部件尺寸、材料属性、加载方式及边界条件均同试验过程保持一致. 通过在螺栓上下表面施加压强模拟试验过程中对高强螺栓所施加的预紧力. 网格属性均为 C3D8R. 所建立结构及部件的有限元模型如图 10 所示.

#### 3.2 数值模拟方案验证

图 11 为各试件模拟结果与试验数据的对比, KL-1 与 KL-3 两个试件模拟获得的荷载位移曲线与试验结果整体趋势吻合良好, 各特征值误差均不超过 10%, 虽然试件 KL-2 在峰值荷载后模拟与试验偏差较大, 但其初始刚度、峰值荷载及极

限位移等特征值误差与试验结果对比均不超过 10%. 此外, 数值模拟获得的破坏现象如图 11(d)所示, 试件最终的变形形态与破坏模式同试验现象吻合良好. 综合来看, 数值模拟结果具备可靠的精度, 可以使用此建模方法进行后续的参数分析.

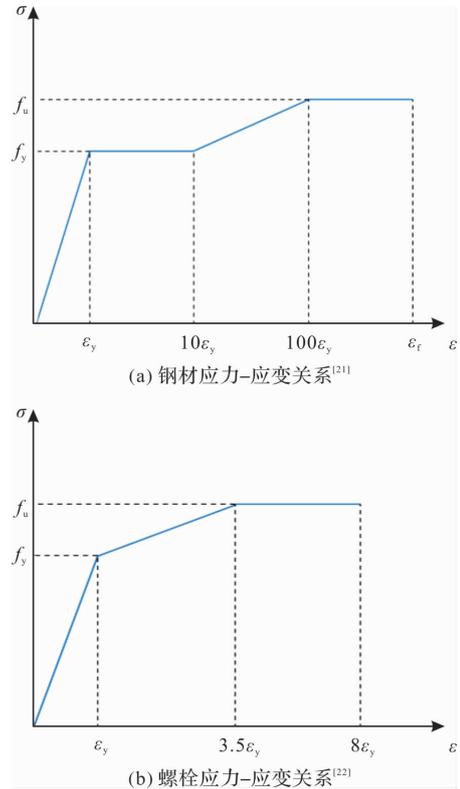


图 9 材料本构关系曲线

Fig. 9 Constitutive curves of materials

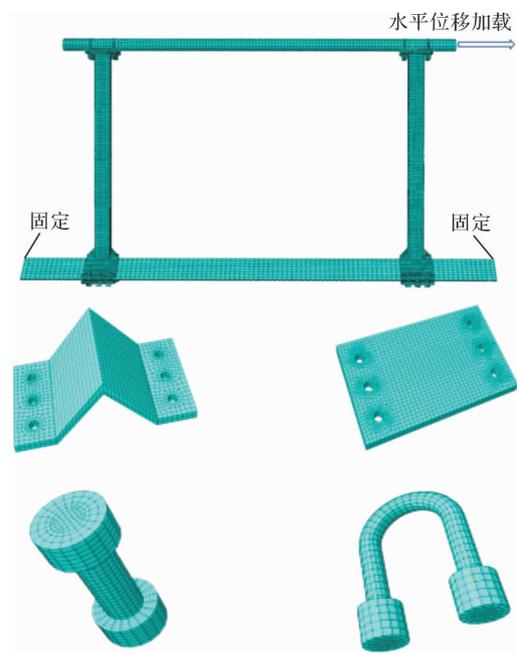


图 10 模型网格划分及边界条件

Fig. 10 Model meshing and boundary conditions

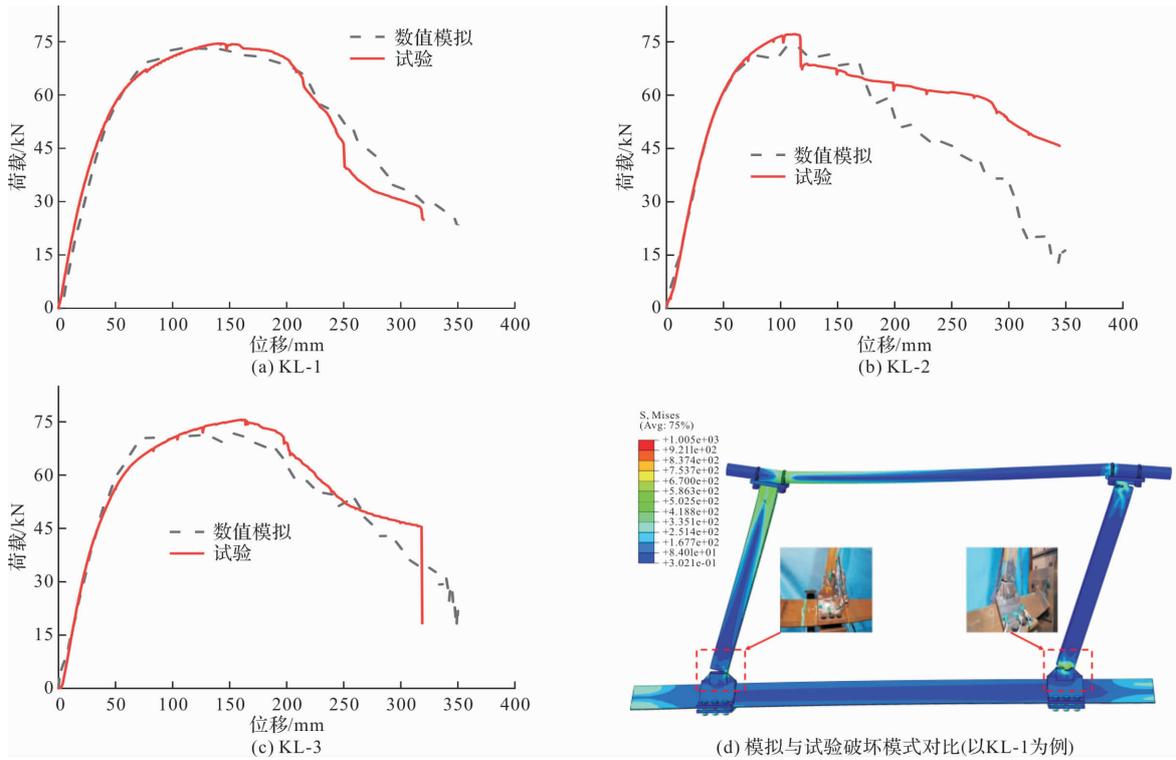


图 11 试验与模拟结果的对比

Fig. 11 Comparison of results between test and numerical simulation

表 4 数值模拟与试验对比

Tab. 4 Comparison of numerical simulation and test

试件	极限荷载 $P_u$ /kN			初始刚度/ $kN \cdot mm^{-1}$			极限位移 $\Delta_u$ /mm		
	模拟	试验	误差/%	模拟	试验	误差/%	模拟	试验	误差/%
KL-1	71.99	75.5	4.88	1.25	1.26	0.80	155	163	5.16
KL-2	73.16	77.2	5.52	1.36	1.35	0.70	116	112	3.44
KL-3	73.36	74.4	1.42	1.26	1.36	7.94	136	141	3.67

3.3 钢管间距对分析结果的影响

为进一步研究钢管间距对挂载连接件承载性能的影响,通过数值模拟进行系列参数分析,参数分析涉及的钢管间距包括:800、1 200、1 400、1 600、1 800 及 2 200 mm.

图 12 展示了不同钢管间距下挂载连接件的荷载位移曲线,表 5 列出了各分析模型的特征值,可以看出:随钢管间距的增大,各分析模型的初始刚度逐渐减小,最大值与最小值的差值约为 18.2%;极限承载力也大致保持随间距增大而减小的趋势,最大值与最小值的差值为 11.1%;分析模型的极限位移则呈现为随间距增大而增大的趋势,最大值与最小值的差值为 64.6%. 钢管间距为 800 mm 时,结构的初始刚度最大;钢管间距为 1 500 mm 时,结构的极限承载力最高;钢管间距为 800 mm 时,结构的极限位移最小. 钢管间距减小,其初始刚度、极限承载力随之增大,极限

位移则随之减小. 这是因为钢管间距减小,挂载铁杆的线刚度增大,铁杆对钢管的约束作用增强,使两个钢管更好的协同受力. 挂载连接件钢管间距越小,其承载力及初始刚度越高,变形越小.

表 5 参数分析结果

Tab. 5 Results of parametric analysis

模型	极限荷载/kN	极限位移/mm	初始刚度/ $kN \cdot mm^{-1}$
KL-1	75.5	163	1.26
KL-2	77.2	112	1.35
KL-3	74.4	141	1.36
800	74.8	99	1.49
1 200	74.7	142	1.40
1 400	74.5	130	1.41
1 600	73.9	148	1.35
1 800	75.9	149	1.35
2 200	69.5	162	1.39

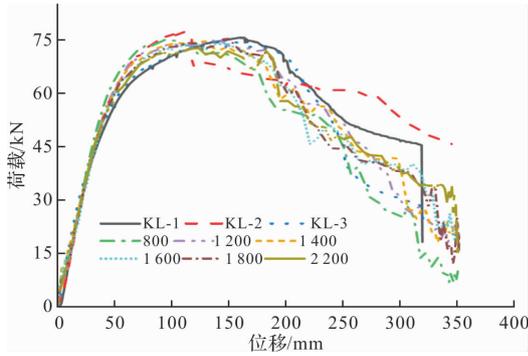


图 12 间距对荷载位移曲线的影响

Fig. 12 Influence of spacing on load-displacement curves

### 4 理论模型

为定量探究钢管间距变化对连接件承载力及初始刚度的影响, 在试验结果的基础上开展理论分析. 矩形钢管下端通过双板件与主材角钢连接, 可将其等效为一保持固定转动刚度的弹簧, 加挂荷载则等效为水平荷载, 最终可通过图 13 所示的力学模型表征挂载连接件的受力行为.

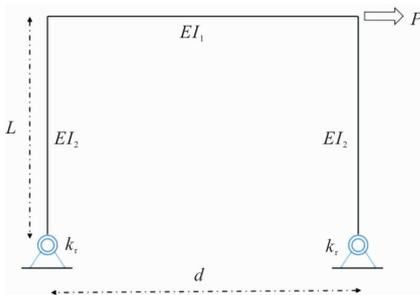


图 13 计算模型示意图

Fig. 13 The calculation model

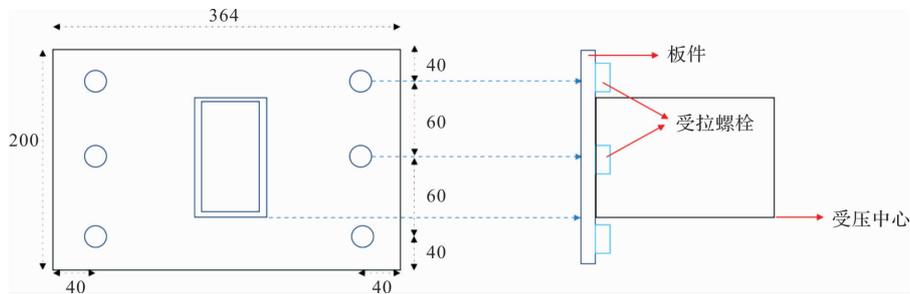


图 14 板件平面图及组件分类示意 (mm)

Fig. 14 Plate plan and component classification/mm

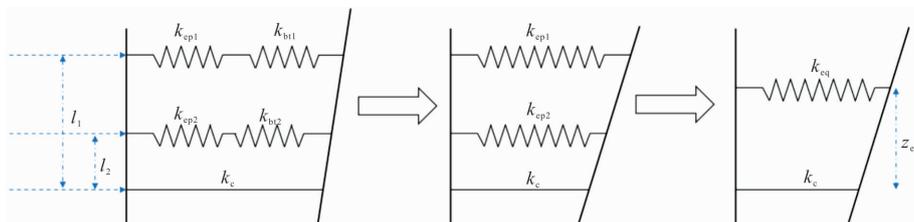


图 15 刚度系数计算模型

Fig. 15 Stiffness coefficient calculation model

由结构力学相关理论可得到简化模型在小变形阶段的承载力-位移关系. 荷载位移关系如式(1)所示.

$$P = \frac{4EI_2 k_r}{nL^2 k_r + \frac{2}{3}L^3 k_r + 2EI_2 L^2 + 2ndEI_2 L^2} \Delta \quad (1)$$

$$n = \frac{3(L^2 dk_r + 2LdEI_2)}{2(d^3 I_2 k_r + 3d^3 I_1 k_r + 3d^2 EI_1 I_2)} \quad (2)$$

式中:  $I_1$  为挂载铁杆截面惯性矩;  $I_2$  为矩形钢管截面惯性矩;  $E$  为弹性模量取  $2.1 \times 10^5$  MPa;  $L$  为矩形钢管长度;  $d$  为矩形钢管中心轴之间的距离;  $k_r$  为底部板件的转动刚度.

由上式可知, 需确定双板件转动刚度方能最终确定连接件的荷载位移关系. 板件的转动刚度可通过组合法求解, 结合 EC3<sup>[23]</sup> 及文献[24]可确定本文的组件类别及转动刚度.

双板件的组件类别可划分为板件受弯, 螺栓受拉, 钢管下翼缘受压三部分如图 14 所示. EC3 规定梁受压翼缘刚度视为无穷大, 本文采用同样的假定, 即钢管受压翼缘组件的刚度视为无穷大, 其余组件刚度计算参照式(3)~式(4).

$$k_{ep} = 0.9EL_{eff} t_{ep}^3 / m^3 \quad (3)$$

$$k_{bt} = 1.6EA_s / L_b \quad (4)$$

式中:  $L_{eff}$  为端板受弯有效计算宽度;  $t_{ep}$  为端板厚度;  $m$  为屈服线计算系数;  $A_s$  为螺栓有效截面积;  $L_b$  为螺栓计算长度. 各参数具体计算方法见文献[23].

计算获得组件各刚度系数后, 可依据式(5)~式(8)确定双板件的初始转动刚度<sup>[24]</sup>, 计算模型如图 15 所示.

$$k_{eqi} = 1 / \left( \frac{1}{k_{ep}} + \frac{1}{k_{bt}} \right) \quad (5)$$

$$z_{eq} = \frac{\sum k_{eqi} l_i^2}{\sum k_{eqi} l_i} \quad (6)$$

$$k_{eq} = \sum k_{eqi} l_i / z_{eq} \quad (7)$$

$$k_r = z_{eq}^2 / (1/k_{eq} + 1/k_c) \quad (8)$$

式中： $l_i$ 为各排螺栓距离受压中心的距离； $k_{eqi}$ 为各排螺栓处等效受拉弹簧刚度； $z_{eq}$ 为等效抗拉力臂； $k_{eq}$ 为等效抗拉刚度。

由表6可知，理论计算获得的三个试件的屈服荷载与试验结果的误差均在15%以内，具备良好的精度，同时相较于试验数据，理论计算结果偏于保守，可应用此式初步判断连接件是否达到弹性极限状态，为同类结构的设计提供参考。

表6 理论计算与试验结果对比

Tab. 6 Comparison of results between analytical calculation and experiments

试件	试验结果/kN	理论计算/kN	误差/%
KL-1	48.17	41.82	-13.2
KL-2	58.27	50.41	-13.4
KL-3	51.64	43.99	-14.8

## 5 结论

(1)三个试件的破坏模式均为矩形钢管于底部加劲肋或顶部端板处的断裂，试件的变形形态受连接件间距影响较为明显；

(2)钢管间距的变化对连接件的破坏模式影响较小，模型的初始刚度、极限承载力随间距的增大而减小，极限位移则相反；

(3)实际工程中，加挂荷载通常为挂载铁杆与附加通信设备的重力，可依据本文的理论公式计算连接件的屈服荷载及位移，为不同间距下挂载连接件的设计提供参考。

## 参考文献 References

- [1] SABER A. Fault location algorithm for multi-terminal mixed lines with shared tower and different voltage levels[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(9): 2029-2037.
- [2] SABER A. A new fault location method for partial coupling double circuit untransposed transmission line with shared tower and different voltages[J]. Electric Power Components and Systems, 2018, 46(10): 1210-1221.
- [3] 刘蕊, 齐道坤, 莫娟, 等. 共享铁塔防雷接地可靠性研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(6): 125-132.

- LIU Rui, QI Daokun, MO Juan, et al. Reliability of lightning protection and grounding of shared tower[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(6): 125-132.
- [4] 庄文兵, 金铭, 杨洋, 等. 电力铁塔共享移动通信基站电磁辐射研究[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(10): 98-104.
- ZHUANG Wenbing, JIN Ming, YANG Yang, et al. Research on electromagnetic radiation of power tower sharing mobile communication base station[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(10): 98-104.
- [5] 刘康, 黄欢. 电力与通信共享铁塔雷击电磁影响分析及防护[J]. 电力科学与工程, 2022, 38(9): 31-37.
- LIU Kang, HUANG Huan. Analysis and protection of electromagnetic influence on lightning strike of electricity and communication sharing tower[J]. Electric Power Science and Engineering, 2022, 38(9): 31-37.
- [6] 白永祥, 徐峰亮, 张亮. 电力通信共享铁塔应力远程监测方法[J]. 信息技术, 2022(8): 179-184.
- BAI Yongxiang, XU Fengliang, ZHANG Liang. Long-distance monitoring method for stress of electric power communication sharing iron tower[J]. Information Technology, 2022(8): 179-184.
- [7] 赵晨, 刘玉擎. 开孔板连接件抗剪承载力试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(12): 349-354.
- ZHAO Chen, LIU Yuqing. Experimental study of shear capacity of perfobond connector[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(12): 349-354.
- [8] 唐继朋, 李毅刚, 刘蕊, 等. 共享铁塔抗滑移连接件承载性能分析[J]. 建筑结构, 2020, 50(S1): 694-698.
- TANG Jipeng, LI Yigang, LIU Rui, et al. Analysis of load-bearing performance of anti-slip connector for shared iron tower[J]. Building Structure, 2020, 50(S1): 694-698.
- [9] 殷占忠, 何玉龙, 冯大哲, 等. 单向加载下带腹板连接件可替换连接件的K形偏心支撑钢框架参数分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 815-822.
- YIN Zhanzhong, HE Yulong, FENG Dazhe, et al. Parameter analysis of K-shaped eccentrically braced frames with web connection type link under unidirectional loading[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2021, 57(6): 815-822.
- [10] 李幅昌, 王哲渊, 杨志坚, 等.  $\pi$ 形开孔板连接件受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(2): 131-141.
- LI Guochang, WANG Zheyuan, YANG Zhijian, et al. Experimental study on behavior of  $\pi$ -type perfobond shear connectors[J]. Journal of Building Structures,

- 2021, 42(2): 131-141.
- [11] 李幅昌,王哲渊,杨志坚,等.  $\pi$ 形拼图板式抗剪连接件受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(6): 75-86.  
LI Guochang, WANG Zheyuan, YANG Zhijian, et al. Experimental study on shear behavior of  $\pi$ -type crest-bond shear connectors[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6): 75-86.
- [12] VIANNA J D, COSTANEVES L F, VELLASCO P C, et al. Structural behaviour of T-perfobond shear connectors in composite girders: An experimental approach [J]. Engineering Structures, 2008, 30(9): 2381-2391.
- [13] AHN J H, LEE C G, WON J H, et al. Shear resistance of the perfobond-rib shear connector depending on concrete strength and rib arrangement[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(10): 1295-1307.
- [14] SAMY G, ALAIN L. Numerical analysis of frictional contact effects in push-out tests [J]. Engineering Structures, 2012, 40: 39-50.
- [15] KIM S H, CHOI K T, PARK S J, et al. Experimental shear resistance evaluation of Y-type perfobond rib shear connector [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 82: 1-18.
- [16] ZHENG S J, LIU Y Q, TERUHIKO Y, et al. Parametric study on shear capacity of circular-hole and long-hole perfobond shear connector [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 117: 64-80.
- [17] 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.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S], Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [18] 齐立忠,江文强,陈大斌. 螺栓连接滑移对输电铁塔力学性能的影响研究[J]. 电力科学与工程, 2003, 29(3): 12-17.  
QI Lizhong, JIANG Wenqiang, CHEN Dabin. Study on the influence of bolt slip on mechanical properties of transmission tower[J]. Electric Power Science and Engineering, 2003, 29(3): 12-17.
- [19] 江文强. 构造节点的精细模拟及其在输电铁塔结构分析中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.  
JIANG Wenqiang. Fine simulation of joints and its application in structural analysis of transmission tower [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.
- [20] 中华人民共和国住房国家质量监督检验检疫总局. 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, 2011.  
General Administration of Housing Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Metallic materials tensile test Part 1: Room temperature test method: GB/T 228.1—2010 [S]. Beijing: China Standards Press, 2011.
- [21] 钟炜辉,段仕超,高迪,等. 部分约束下组合梁柱子结构抗连续倒塌机理[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(3): 45-54.  
ZHONG Weihui, DUAN Shichao, GAO Di, et al. Anti-progressive collapse mechanism of composite beam-column substructure with partial boundary constraints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(3): 45-54.
- [22] 赵伟,童根树. 加劲T形连接件有限元分析[J]. 工业建筑, 2008, 38(6): 102-105.  
ZHAO Wei, TONG Genshu. Finite element analysis of stiffened T-connector[J]. Industrial Construction, 2008, 38(6): 102-105.
- [23] ENV 1993-1-8; CEN 2005. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-8: Design of joints[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [24] 李国强,石文龙,王静峰. 半刚性连接钢框架结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
LI Guoqiang, SHI Wenlong, WANG Jingfeng. Design of steel frames with semi-rigid connections[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

(编辑 李睿奇)