

不同连接形式下共享铁塔挂载连接件性能研究

钟炜辉^{1,2}, 蒋 成¹, 郑玉辉¹, 赵孟军¹

(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 目的 研究不同连接方式下共享铁塔挂载连接件的力学性能, 分析挂载连接件的承载能力、变形能力、破坏模式以及各部件之间的协同工作性能, 给出各参数的取值范围, 为工程实践提供参考。方法 以两种不同连接方式的挂载连接构件为试验对象进行静力试验, 并使用 ABAQUS 有限元分析软件对试验进行模拟验证和参数分析, 进一步研究挂载连接件节点板厚、螺栓个数、螺栓间距和螺栓直径对挂载连接件受力性能的影响。结果 在水平荷载下, 两种不同连接方式的试件均未出现滑移; 试件的破坏形态均呈现在方钢管加劲肋处或顶部端板处的断裂; 试件 KL-2 的极限荷载略大于试件 KL-1, 初始刚度略小于试件 KL-1。结论 同等条件下连接方式 1 与方式 2 连接性能差异较小, 当双板件的厚度不小于 12 mm、螺栓间距不小于 60 mm、螺栓个数不少于 6 个、直径不小于 20 mm 时, 若想进一步提高挂载连接件的承载能力, 可从双板件之外的部件考虑。

关键词 共享铁塔; 连接方式; 挂载连接件; 静力试验; 力学性能; 有限元分析

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

Study on Performance of Mounting Connector of Shared Tower in Different Connection Types

ZHONG Weihui^{1,2}, JIANG Cheng¹, ZHENG Yuhui¹, ZHAO Mengjun¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, China, 710055; 2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education (XAUAT), Xi'an, China, 710055)

Abstract: The mechanical properties of the shared steel tower mounting connections under different connection types were studied in this paper, and the bearing capacity, deformation capacity, failure type and the synergistic performance between the components of the hanging connections were. To provide reference for the engineering practice, the ranges of the parameters were given. A static test in mounting connection members with two different connection types as test objects was

收稿日期: 2022-03-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178162); 陕西省重点研发计划项目(2018ZDXM-SF-097); 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(20JY033)

作者简介: 钟炜辉(1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事钢结构稳定理论、结构抗倒塌分析、装配式钢结构等方面研究。

conducted. Finally, a parameter analysis was carried out using ABAQUS, the effects of joint plate thickness, number of bolts, bolt spacing and bolt diameter on the mechanical properties of mounting were further demonstrated. Under horizontal load, no slip occurred in the with two different connection types. The failure types of the specimens show the fracture at the stiffening rib of square steel tube or at the top end plate. The ultimate load of specimen KL-2 is slightly larger than that of specimen KL-1, and the initial stiffness is slightly lower than that of specimen KL-1. Under the same conditions, the performance difference between connection type 1 and 2 is small. When the thickness of double plates is not less than 12mm, the distance between bolts is not less than 60mm, the number of bolts is not less than 6 and the diameter is not less than 20mm, the load-bearing capacity of mounting connections can be further improved by considering components other than double plates.

Key words: shared tower; connection type; mounting connector; static test; mechanical property; finite element analysis

未来即将进入5G时代,然而5G采用的高频率信号波段,使得单个基站信号覆盖范围相较于4G基站要小,因此需要建设大量的5G基站,这无疑推迟了5G时代的到来。利用好数量多、分布广的输电塔将有效减少基站建设成本和周期。

通讯设施依靠挂载连接件与输电塔连接,挂载连接件的力学性能直接影响共享铁塔的发展。唐继朋等^[1]通过简化模型理论分析得到节点刚度影响挂载连接件的整体刚度,因此节点(双板件)是研究挂载连接件力学性能的重点和关键所在。针对影响节点性能因素的研究,国内外学者进行大量试验和研究。郭小农等^[2]通过试验分析节点板厚度、材质对铝合金板式节点滞回性能的影响规律。何松洋等^[3]通过数值分析,得出输电塔主材双包节点螺栓不均匀受剪的计算方法。李幅昌等^[4]通过数值模拟研究了影响双节点板式K形外置钢支撑-方钢管柱连接节点抗震性能的因素。J. Lee等^[5]通过试验与数值模拟对单向螺栓T形端板连接方钢管柱梁节点的力学性能进行了研究。C. Fealla等^[6]通过研究得出,节点的初始转动刚度和承载力与施加螺栓预紧力大小有着密切关系。G. Y. Grondin等^[7]通过试验研究了螺栓排列形式、螺栓端距、螺栓间距对矩形节点板试的影响。D. S. Andrew等^[8]通过

试验研究了梁柱节点连接形式对中心支撑框架性能的影响。J. H. Yoo等^[9]通过试验与有限元分析,研究了节点板厚对中心支撑框架抗震性能的影响。N. Ungkurapinan等^[10]分析了螺栓数量、间隙大小对连接滑移的影响。武韩青等^[11]通过对大角钢节点进行数值模拟分析,得到适用于大角钢的螺栓准距。

近年来,有关节点性能研究主要通过试验和数值模拟,从节点连接形式、板厚、螺栓等方面来分析影响节点受力性能的因素。笔者在已有研究的基础上,通过试验分析不同连接形式下挂载连接件的承载能力、变形能力、破坏模式以及各部件之间的协同工作性能,并使用有限元软件ABAQUS对试验构件模拟验证后进行参数分析,进一步分析挂载连接件节点板厚、螺栓个数、螺栓间距和螺栓直径对挂载连接件承载能力和整体刚度的影响,为共享铁塔投入使用提供依据。

1 试验

1.1 试件设计

共享铁塔通过挂载连接件在输电铁塔上加装通讯设施,实现电力与通讯的资源共享,从共享铁塔中选取子结构(见图1)。挂载铁杆通过U型螺杆和端板连接,矩形钢管两端与相应连接板件焊接,双板件依靠高强度螺栓与主材角钢连接。

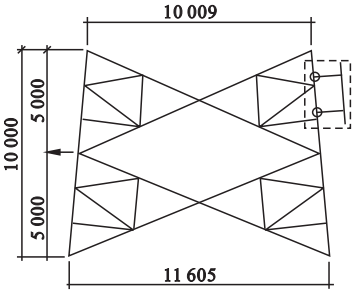


图 1 挂载连接件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mounting connector

结合实际工程需求并基于文献[1]与文献[12]设计,以连接方式为变化参数,共设计了两个挂载连接件,编号为 KL-1、KL-2。材料为 Q345B 钢,钢材材性试验测得相关指标见表 1。试件组成方式:长度为 2 500 mm、直径为 35 mm 挂载铁杆通过 U 型螺杆和端板与长度为 1 200 mm、截面长宽厚为 100 mm×50 mm×5 mm 的矩形钢管连接,矩形钢管两端与相应连接板件焊接,板件厚度为 16 mm;双板件连接装置依靠 10.9 级 M20 高强螺栓与长度为 3 000 mm、型号为 L160×12 mm 的角钢连接(见图 2)。试件参数见图 2,连接方式 1 与连接方式 2 的详细参数见图 3。

表 1 试件材性结果

Table 1 Results of material properties of specimens

部件	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ GPa	伸长率/ %
主材角钢	397	577	210	23
方钢管	492	547	206	17
抱杆	479	695	210	23
U 型螺栓	450	598	208	27
板件 1、2	442	555	215	22
板件 3、4	445	561	214	23
加劲肋	439	551	212	21
端板	443	559	210	20
高强螺栓	900	1000	210	—

1.2 加载装置与制度

通过静力试验对不同连接方式下挂载连接件的力学性能展开研究。根据实际荷载情况,加载方向需与试件实心抱杆的轴线为同

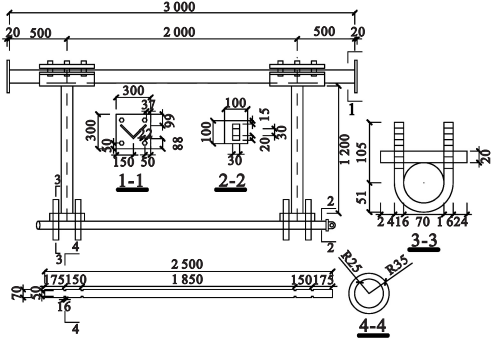


图 2 试件参数

Fig. 2 Test piece parameters

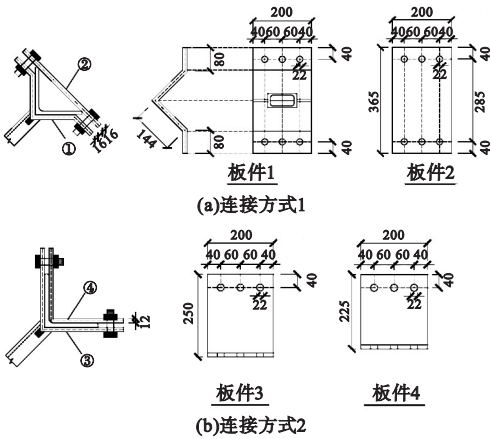


图 3 两种连接方式详细参数

Fig. 3 Detailed parameters of two connection methods 一方向,为此调整高度后,将作动器一端与反力墙连接,通过伸缩倒链,调节作动器的平面内角度,在达到水平后将作动器另一端与试件相连。使用两根地梁和两根竖梁来固定试件(挂载连接件),试件的抱杆端部通过 U 型环与液压伺服作动器相连,使用倒链调节使试件抱杆与作动器保持平行。为避免试件出现面外变形,采用拉力加载方式,试验装置如图 4 所示。

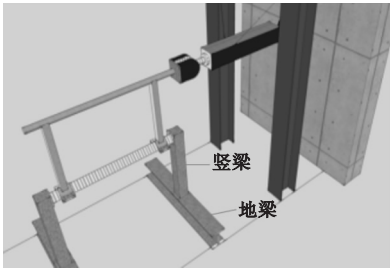


图 4 加载装置

Fig. 4 Loading device

在试验加载过程中,首次破坏(试件各部件材料发生断裂)前以每级 5 mm/min 速率加载,每级加载后稳定荷载 3~5 min,待结构变形稳定后进行下一级加载,直至加载结束。

1.3 测量方案

挂载连接件试验加载使用 50 t 液压伺服作动器进行,可同时采集试件的承载力及位移,位移计布置在两侧方钢管跨中(D1、D3)及距方钢管底部 100 mm 处(D2、D4),以此来分析结构变形;在竖梁端部(见图 4)布置的位移计(D5)用于测量加载装置的相对位移,这是由于加载对于试件的固定作用并不是无限大,需要得到试件的绝对变形量才可以准确评估试件的承载力-变形关系。位移计布置如图 5 所示。

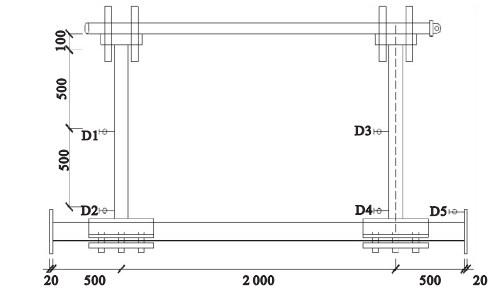


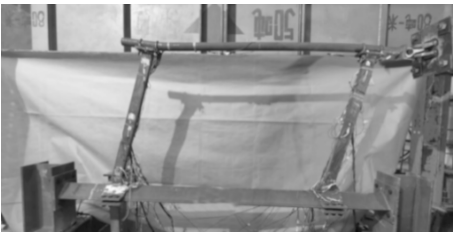
图 5 测量方案

Fig.5 Measurement scheme

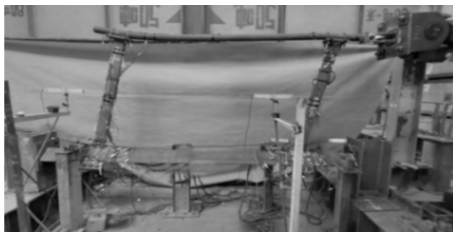
2 试验结果与分析

2.1 试验现象与破坏模式

试件 KL-1、KL-2 的整体变形状态如图 6 所示,两组试件破坏现象一致,试件的破坏形态均为在方钢管加劲肋处或顶部端板处产生断裂。



(a)KL-1



(b)KL-2

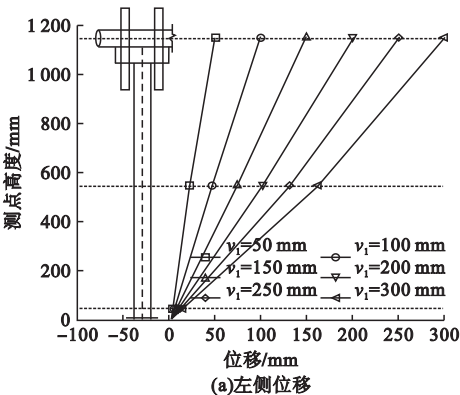
图 6 试验后试件整体变形形态

Fig.6 Integral deformation form of specimen after test

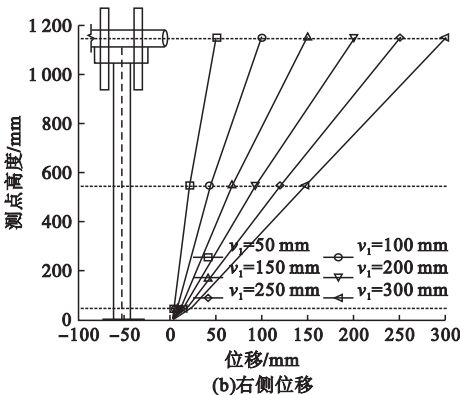
由图可知,加载初期,两侧方钢管大致以直线形态向右(加载方向)同步倾斜,而顶部的抱杆(实心圆杆)呈现出 S 形形态,抱杆在与左侧方钢管相连位置呈下凹形态,抱杆在与

右侧方钢管相连位置呈上凸形态,试件各部件可整体协同变形。

试件左右两侧方钢管位移分布曲线见图 7、图 8。从图中可知,加载位移较大时,左侧



(a)左侧位移



(b)右侧位移

图 7 试件 KL-1 左右两侧方钢管位移分布

Fig.7 Displacement distribution of square steel tube on left and right sides of specimen KL-1

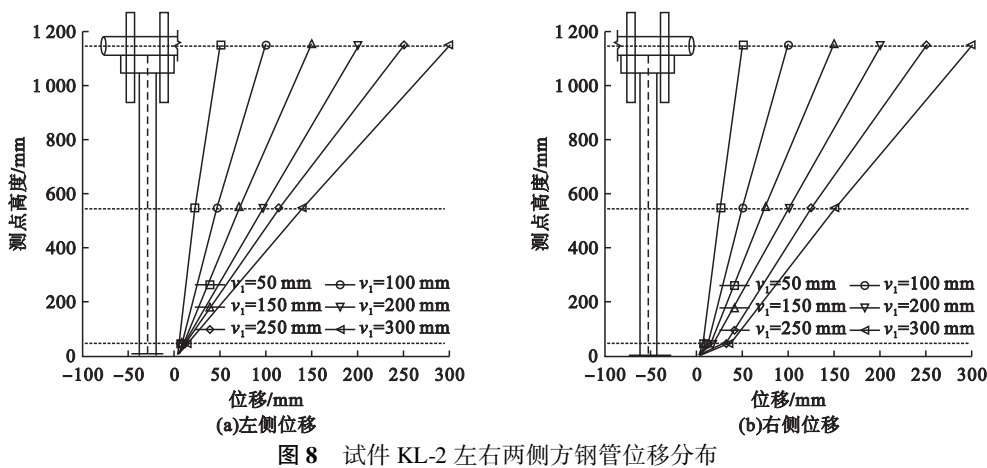


图8 试件 KL-2 左右两侧方钢管位移分布

Fig. 8 Displacement distribution of square steel tube on left and right sides of specimen KL-2

方钢管跨中位置有向右弯曲的形态,右侧方钢管跨中位置有向左弯曲的形态。基于位移分布可知,试件左右两侧方钢管均未出现滑移,说明试件所用的连接方式均可满足连接件的抗滑移需求。

2.2 荷载-位移曲线

图9为试件 KL-1 和试件 KL-2 的荷载位移曲线。由图可知,在加载初期,试件 KL-1、KL-2 荷载-位移曲线的斜率都能保持定值,说明试件各部件可整体协同变形。随着荷载的增加,曲线斜率降低,试件进入屈服状态直至破坏。试件 KL-2 的极限荷载相较于试件 KL-1 提高了 10%,两个试件的初始刚度相差不大。试件 KL-2 在达到极限荷载后,连接件在方钢管上侧与端板连接焊缝处率先开裂,刚度陡然下降。考虑到在加工和安装过程中焊缝质量的差异性,需要通过有限元进一步分析。

3 有限元分析

3.1 有限元模型的建立

使用 ABAQUS/Explicit 建立试件各部分几何模型。采用 C3D8RD 单元模拟试件的各个部分,定义主材角钢、连接板件、高强度螺栓,接触面均采用通用接触,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^[12]。为提高计算效率,通过 Tie 命令模拟焊接。模型边界条件同试验一致,将模型主材角钢两端完全固定,在抱杆右侧施加水平位移(见图 10)。高强度螺栓预紧力采用 Connector 连接器模拟,10.9 级高度螺栓预紧力的 P_c 为 155 kN^[12],连接器的刚度 K 设置为 77 500 N/mm。位移加载速率通过对两模型进行模态分析,得到的最低阶模态对应的周期分别为 0.03 和 0.05。此准静态加载时间分别为 0.3 和 0.5^[13],为减小冲击效应影响,经多次试算,确定位移加载速率为 0.35 m/s,周期为 1 s。材料材性选用表 1,钢材采用多折线本构模型^[14]、高强螺栓采用理想双折线本构模型^[15],有限元模型见图 10。

3.2 模型验证

试件 KL-1 和 KL-2 试验和有限元模拟得到的荷载-位移曲线如图 11 所示。由图可知,有限元得到的荷载-位移曲线与试验的变

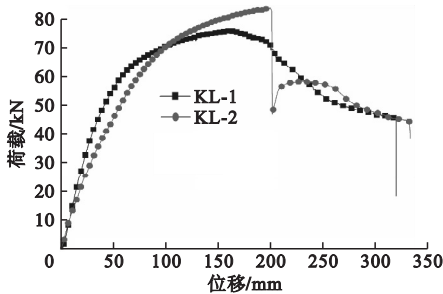


图9 KL-1 与 KL-2 荷载-位移曲线对比

Fig. 9 Comparison of load-displacement curves between KL-1 and KL-2

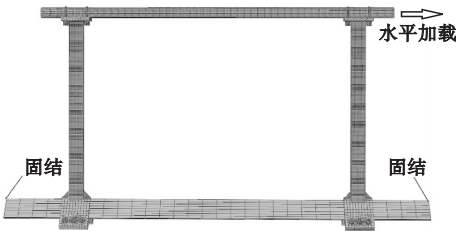


图 10 模型网格划分及边界条件

Fig. 10 Model meshing and boundary conditions

化趋势基本相同,有限元模型在位移 60 mm 之前初期刚度略大于试验结果,这是由于在有限元模拟加载过程中,产生了一定的冲击效应。有限元模拟结果和试验结果误差在 10% 以内,有限元模拟和试验现象吻合度较好,均为方钢管加劲肋处断裂(见图 12、图 13)。有限元模拟有效,可进一步进行参数分析。

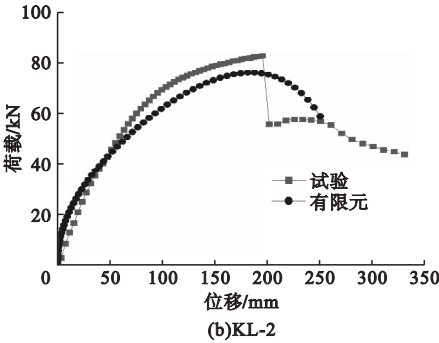
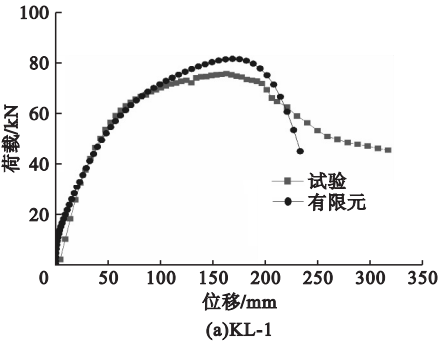
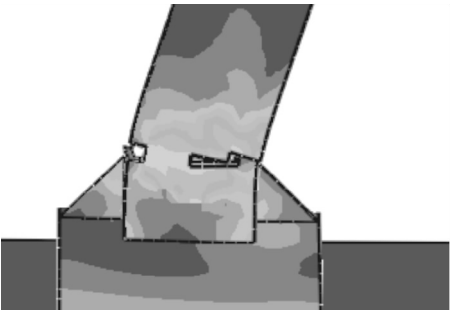


图 11 荷载-位移曲线

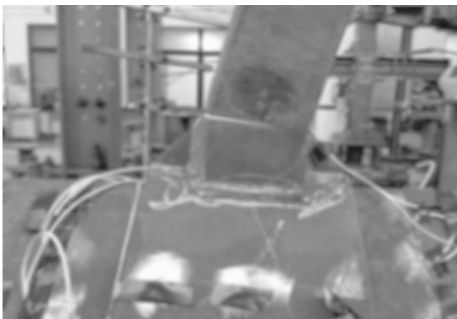
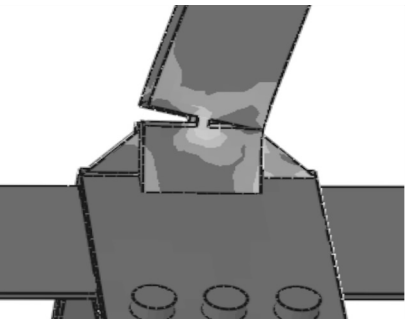
Fig. 11 Load-displacement curves



(a)有限元结果 (b)试验结果

图 12 KL-1 有限元模型和试件破坏现象对比

Fig. 12 Comparison of KL-1 finite element model with specimen failure



(a)有限元结果 (b)试验结果

图 13 KL-2 有限元模型和试件破坏现象对比

Fig. 13 Comparison of KL-2 finite element model with specimen failure

3.3 参数分析

3.3.1 参数选取

在试件 KL-1、KL-2 的基础上,分析双板

件板厚、螺栓个数、螺栓直径、螺栓间距对挂载连接件性能的影响,模型参数见表 2。

表 2 模型主要参数

Table 2 Main parameters of models

编号	板厚/ mm	螺栓/ 个	螺栓间距/ mm	螺栓直径/ mm	编号	板厚/ mm	螺栓/ 个	螺栓间距/ mm	螺栓直径/ mm
LBH1	10	6	60	20	LJJ2	12	6	50	20
LBH2	12	6	60	20	LJJ3	12	6	60	20
LBH3	14	6	60	20	LJJ4	12	6	70	20
LBH4	16	6	60	20	LJJ5	12	6	80	20
LBH5	18	6	60	20	LZJ1	12	6	60	16
LGS1	12	4	40	20	LZJ2	12	6	60	18
LGS2	12	6	40	20	LZJ3	12	6	60	20
LGS3	12	8	40	20	LZJ4	12	6	60	22
LGS4	12	10	40	20	LZJ5	12	6	60	24
LJJ1	12	6	40	20					

3.3.2 荷载-位移曲线

图 14 ~ 图 17 为不同模拟试件分析得到的荷载-位移曲线。由图可知,在理想状态下,不考虑加工质量等情况下,同等条件下试件 KL-1 与 KL-2 承载性能及刚度差异较小,

参数变化规律基本一致。这是由于连接件连接方式 1 与 2 在连接形式上虽然有所区别,但都是通过双板件与主材之间的摩擦力和螺栓抗剪来平衡荷载。

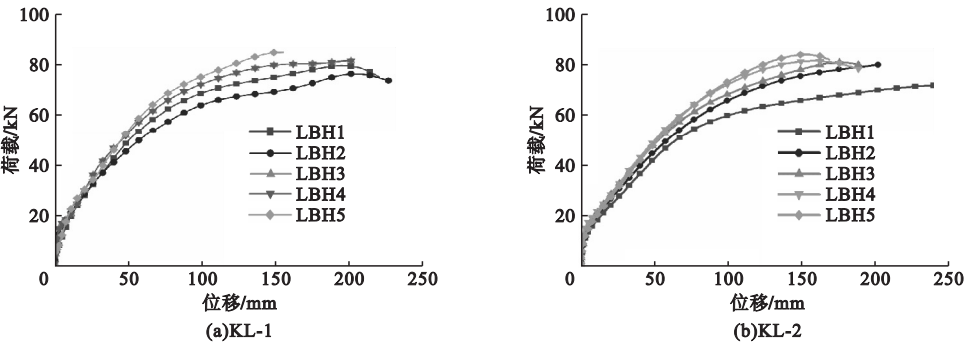


图 14 LBH 荷载-位移曲线
Fig. 14 LBH load-displacement curves

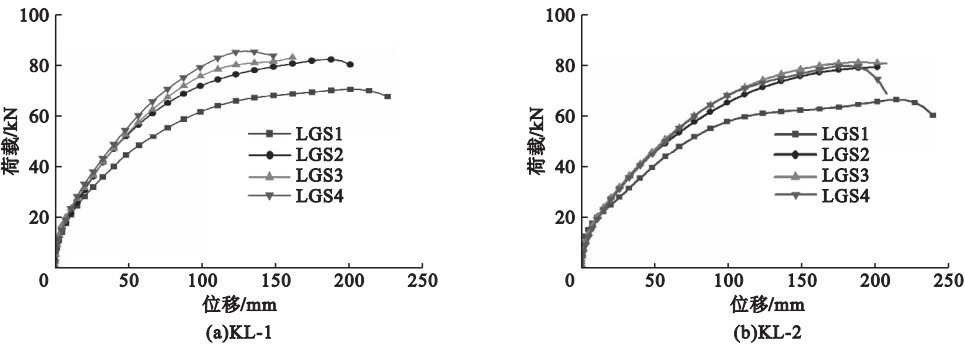


图 15 LGS 荷载-位移曲线
Fig. 15 Load-displacement curves of LGS

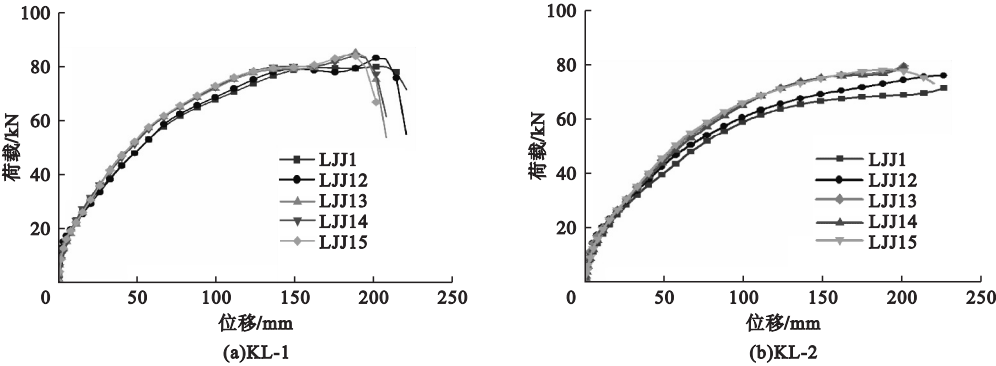


图 16 LJJ 荷载-位移曲线

Fig. 16 LJJ load-displacement curves

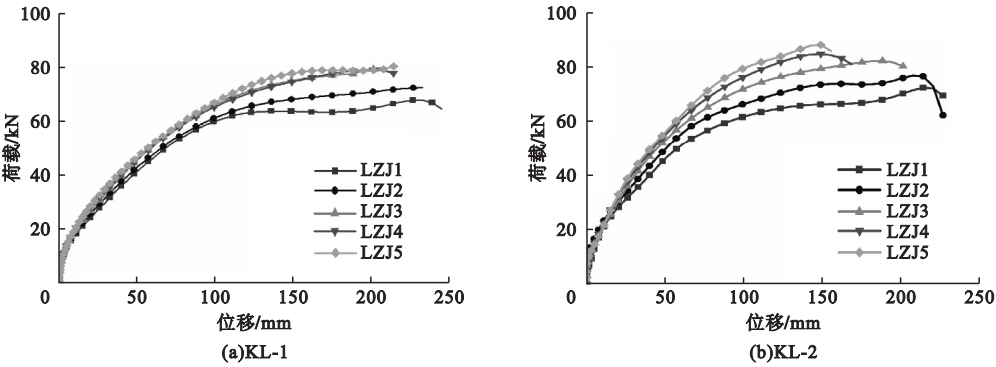


图 17 LZJ 荷载-位移曲线

Fig. 17 LZJ load-displacement curves

双板件板厚、螺栓个数、螺栓间距和螺栓直径在一定范围内,连接件的整体刚度和极限荷载随这些参数的增加而增加,但当参数超过一定值之后,继续增加对于挂载连接件性能的提升并不明显。这是由于节点刚度对于挂载连接件的整体刚度有一定影响,挂载连接件的整体刚度和极限荷载随节点刚度的增大而增大,但当节点刚度进一步加大,偏于刚性,这时连接件的整体刚度和极限荷载主要取决于方钢管、抱杆等其他部件的影响因素,继续增大节点刚度对于连接件性能的提升不明显。因此,当双板件的厚度不小于 12 mm、螺栓间距不小于 60 mm、螺栓个数不少于 6 个、直径不小于 20 mm 时,若进一步提高挂载连接件的承载能力,可从双板件之外的部件考虑。

4 结 论

- (1)由试验结果可知,各试件左右两侧方钢管均未出现滑移,连接方式 1 和方式 2 均满足连接件的挂载需求;试件 KL-2 的极限荷载略大于试件 KL-1,初始刚度略小于试件 KL-1。
- (2)试件 KL-1 与 KL-2 的破坏模式均为方钢管端部受拉侧应变率先达到屈服应变,随后在方钢管加劲肋处或顶部端板处的断裂;方钢管端部属于受力薄弱部分,在设计时应给与加强考虑。
- (3)同等条件下,两种连接的性能差异较小,这是由于两种连接方式在连接形式上虽然有所区别,但都是通过双板件与主材之间的摩擦力和螺栓抗剪来平衡荷载。

(4)当节点刚度不断加大,偏于刚性连接,这时连接件的整体刚度和极限荷载主要取决于方刚管、抱杆等其他部件的影响因素;若进一步提高挂载连接件的承载能力,可从双板件之外的部件考虑。

参考文献

- [1] 唐继朋,李毅刚,刘蕊,等.共享铁塔挂载连接件承载性能分析[J].建筑结构,2020,50(增刊1):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.)
- [2] 郭小农,陈宇,刘林林,等.铝合金板式节点平面外受弯滞回性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(8):90-99.
(GUO Xiaonong, CHEN Yu, LIU Linlin, et al. Experimental study on hysteretic behavior of aluminum alloy gusset joint under out-of-plane bending [J]. Journal of building structure, 2018, 39(8): 90-99.)
- [3] 何松洋,马海云,鄢秀庆,等.输电塔主材双包连接节点螺栓不均匀受剪研究[J].武汉理工大学学报,2021,43(3):49-57.
(HE Songyang, MA Haiyun, YAN Xiuqing, et al. Study on uneven shear of double-clad shear connection joint bolts of transmission tower [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2021, 43(3): 49-57.)
- [4] 李岷昌,聂金乾,杨志坚,等.双节点板式K形外置钢支撑-方钢管柱连接节点力学性能的有限元分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(6):961-970.
(LI Guochang, NIE Jinqian, YANG Zhijian, et al. Finite element analysis of mechanical properties of double gusset plate k-shaped external steel braces and square steel tubular joints [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(6): 961-970.)
- [5] LEE J, GOLDSWORTHY H M, GAD E F. Blind bolted t-stub connections to unfilled hollow section columns in low rise structures [J]. Journal of constructional steel research, 2010, 66(8/9): 981-992.
- [6] FAELLA C, PILUSO V, RIZZANO G. Experimental analysis of bolted connections: snug versus preloaded bolts [J]. Journal of structural engineering, 1998, 124(7): 765-774.
- [7] GRONDIN G Y, HUNS B B S, DRIVER R G. Block shear behaviour of bolted gusset plates [M]. Alberta: University of Alberta, 2002.
- [8] ANDREW D S, DANIEL S, RYAN B, et al. Experimental evaluation of the seismic vulnerability of braces and connections in older concentrically braced frame [J]. Journal of structural engineering, 2016, 142(9): 04016052.
- [9] YOO J H, LEHMAN D E, ROEDER C W. Influence of connection design parameters on the seismic performance of braced frames [J]. Journal of constructional steel research, 2008, 64(6): 607-623.
- [10] UNGKURAPINAN N, CHANDRAKEERTHY S R DE S, RAJAPAKSE R K N D, et al. Joint slip in steel electric transmission towers [J]. Engineering structures, 2003, 25(6): 779-788.
- [11] 武韩青,曹珂,郭耀杰.大规格角钢螺栓连接节点准距研究[J].武汉大学学报(工学版), 2021, 54(5): 415-420.
(WU Hanqing, CAO Ke, GUO Yaojie. Study on directrix of bolted joint of large size angle steel [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2021, 54(5): 415-420.)
- [12] 中南建筑设计院.冷弯薄壁型钢结构技术规范:GB 50018—2002[S].北京:中国计划出版社,2002.
(Central-South Architectural Design Institute. Technical code for cold formed thin wall steel structure: GB 50018—2002 [S]. Beijing: China Planning Press, 2002.)
- [13] 姚如洋,尹冠生,李轩,等.基于显式有限元的钢筋混凝土构件准静态响应分析[J].应用力学学报,2018,35(3):609-615.
(YAO Ruyang, YIN Guansheng, LI Xuan, et al. Quasi-static response analysis of reinforced concrete member based on explicit finite element method [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2018, 35(3): 609-615.)
- [14] 施刚,朱希.高强度结构钢材单调荷载作用下的本构模型研究[J].工程力学,2017,34(2):50-59.
(SHI Gang, ZHU Xi. Study on constitutive model of high-strength structural steel under monotonic loading [J]. Engineering mechanics, 2017, 34(2): 50-59.)
- [15] 杨风利,朱彬荣,邢海军.输电铁塔螺栓节点连接滑移特性及模型参数研究[J].工程力学,2017,34(10):116-127.
(YANG Fengli, ZHU Binrong, XING Haijun. The slip characteristics and parametric study of bolted connections for transmission towers [J]. Engineering mechanics, 2017, 34(10): 116-127.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)