

盘轮扣节点转动刚度试验及有限元研究

刘卫然^{1,2}, 吴昊天¹, 于海丰^{1,2*}, 杨子悦¹, 王浩宇¹, 马争傲¹

(1. 河北科技大学 建筑工程学院, 石家庄 050018; 2. 河北省房屋建筑工程更新技术创新中心, 石家庄 050018)

摘要: 盘轮扣节点是一种新型承插型节点, 可实现轮扣式直插头与盘扣式扣接头两种连接形式(以下简称轮扣式连接和盘扣式连接)。为探究该节点的力学性能, 针对轮扣式与盘扣式连接分别开展了两批次各9组节点转动刚度试验研究; 同时依据节点实际尺寸建立三维有限元模型开展数值分析, 获得了两种连接方式的弯矩-转角曲线。结果表明: 盘扣式连接的转动刚度高于轮扣式连接的转动刚度; 轮扣式连接的转动刚度为 $22.56 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$, 盘扣式连接的转动刚度为 $27.45 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$, 二者均满足承插型节点转动刚度不低于 $20 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 的规范限值要求; 当杆端弯矩接近 $200 \text{ N}\cdot\text{m}$ 时, 两类连接节点进入塑性工作阶段, 转动刚度随之下降。有限元分析结果与试验数据吻合良好。本文得到的轮扣式和盘扣式连接的试验数据与转动刚度数值可为相应脚手架架体的安全搭设提供参考。

关键词: 盘轮扣节点; 轮扣式连接; 盘扣式连接; 试验研究; 有限元模拟; 弯矩-转角曲线; 转动刚度

中图分类号: TU731.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2026)09-0065-07

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20250115003

Rotational Stiffness Tests and Finite Element Analysis of Disc-Wheel-Buckle Joints

LIU Weiran^{1,2}, WU Haotian¹, YU Haifeng^{1,2*}, YANG Ziyue¹,
WANG Haoyu¹, MA Zhengao¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. Hebei Province Housing Construction Projects Regeneration Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050018, China)

*Corresponding author: skipperyh@163.com

Abstract: The disc-wheel-buckle joint is a new type of socket joint, which has two connection modes of a wheel-buckle straight plug and a disc-buckle connection (hereinafter referred to as wheel-buckle and disc-buckle connections). In order to explore its mechanical properties, two batches of nine groups of joint rotational stiffness tests were conducted for the wheel-buckle and disc-buckle connections, and a three-dimensional model was established according to the actual joint dimensions for finite element analysis to obtain the bending moment-rotation curves of the two connection modes. The results showed that the disc-buckle connection had greater rotational stiffness than the wheel-buckle connection. The rotational stiffness of the wheel-buckle connection was $22.56 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$, and the rotational stiffness of the disc-buckle connection was $27.45 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$, both meet the code requirement that the rotational stiffness of the plug-in type node is not less than $20 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$. When the bending moment of the rod end approached $200 \text{ N}\cdot\text{m}$, the joints of the two connection modes began to enter the plastic stage, after which the rotational stiffness decreased. The finite

收稿日期: 2025-01-15

基金项目: 河北省自然科学基金(E2021208010), 中央引导地方科技发展资金项目(236Z5408G), 河北省高等学校科学技术研究项目产学研专项(CXY2024045)

作者简介:

刘卫然(1977—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事模板支撑架力学性能方面的研究。E-mail: liuweiran1977@163.com。

通信作者:

于海丰(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事模板支撑架力学性能方面的研究。E-mail: skipperyh@163.com。

element analysis results were in good agreement with the experimental data. The experimental data and rotational stiffness values of the wheel-buckle and disc-buckle connections can provide a reference for the safe erection of the corresponding scaffold system.

Keywords: disc-wheel-buckle joint; wheel-buckle connection; disc-buckle connection; test study; finite element simulation; bending moment-rotation curve; rotational stiffness

脚手架节点是脚手架结构的关键组成部位,其连接形式与转动刚度对脚手架的整体承载能力存在显著影响^[1-4]。众多学者针对各类承插型节点的转动刚度开展了大量研究^[5-8],其中轮扣式节点和盘扣式节点在工程中应用最为广泛。

在轮扣式节点的研究中,刘卫然等^[9]针对连接盘厚度为8 mm、10 mm的25组轮扣式节点开展了转动刚度试验研究,得到不同连接盘厚度下轮扣式节点的转动刚度;杨伟军等^[10]通过轮扣式节点连接性能试验,证实了轮扣式节点属于典型半刚性连接,其连接刚度与拧紧力矩为40 N·m的扣件式脚手架节点刚度基本相当。针对盘扣式节点,张凌博等^[11-12]、白万民等^[13]开展了顺时针、逆时针双向转动刚度试验研究,发现节点逆时针转动时其转动刚度更高;王凝等^[14]研究发现,盘扣式节点插销楔紧程度与抗扭刚度成正相关;陈桂香等^[15]基于盘扣式节点抗扭试验,采用单线性模型、三折线模型、二参数对数模型,得到盘扣式节点不同加载阶段的转动刚度。

本文研究的盘轮扣节点属于新型承插型节点,兼具轮扣式、盘扣式两种连接形式。现有规范^[16]给出了盘轮扣式支撑架的搭设要求,但针对盘轮扣节点的力学性能研究较少,尚未给出两种连接形式对应的节点转动刚度。为此,本文选取工程周转使用的盘轮扣杆件开展节点转动刚度试验研究,采用线性阶段模型对弯矩-转角曲线进行处理,获取两种连接形式的节点转动刚度;同时开展对应的有限元数值模拟,与试验结果相互对比验证。研究成果可为同类架体搭设提供数据支撑。

1 盘轮扣节点构造及材料参数性能

1.1 盘轮扣节点构造

盘轮扣节点可装配轮扣式直插头或盘扣式扣接头,节点构造如图1所示。盘轮扣连接盘为圆环构件,外径为120 mm,内径为48 mm,盘厚为9 mm;盘面开设8个孔:4个主孔尺寸为14 mm×25 mm,用于装配轮扣式直插头或盘扣式扣接头;4个副孔尺寸为12 mm×21 mm,用于连接斜杆。轮扣式直插头长为110 mm,直插头弧形面紧贴合立杆管壁;盘扣式扣接头长为58 mm,插销长为115 mm。

1.2 节点尺寸参数

试验现场随机抽取6组试件(试件1~6),测量连接盘厚度、立杆与水平杆的外径及壁厚,尺寸统计结果如表1

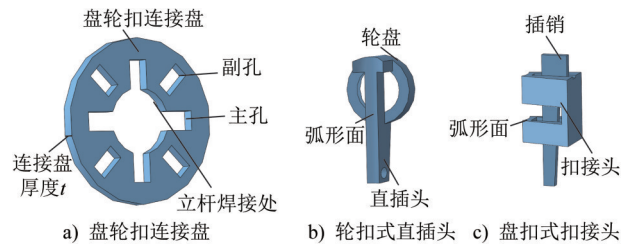


图1 盘轮扣节点构造

Fig. 1 Disc-wheel-buckle joint construction

所示,连接盘厚度与杆件外径及壁厚均满足规范^[17-18]要求。

表1 试件尺寸参数

Table 1 Dimensions of specimens mm					
试件 编号	连接盘 厚度 t	立杆外径 D_1	立杆壁厚 t_1	水平杆 外径 D_2	水平杆 壁厚 t_2
1	9.10	48.00	3.30	47.62	2.96
2	8.59	48.38	3.20	47.63	3.00
3	9.20	48.02	3.26	47.92	2.98
4	8.65	48.00	3.30	48.70	3.10
5	9.02	49.30	3.50	47.36	3.03
6	9.31	48.70	3.10	47.94	2.99
平均值	8.98	48.40	3.28	47.86	3.01

1.3 材料性能试验

工程在用支撑架体构件大多经历过周转服役,此类构件的屈服强度、抗拉强度、弹性模量等关键性能会发生明显变化。分别取立杆、轮扣水平杆和盘扣水平杆各3组试件开展材性试验研究;所有试件均经历弹性-屈服颈缩-断裂三个阶段,材性试验过程如图2所示。取各组材

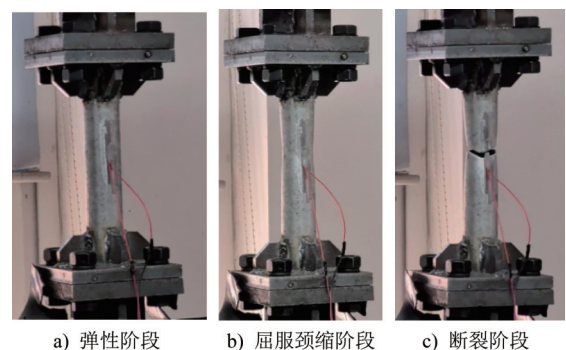


图2 材性试验过程

Fig. 2 Material property test process

性试验平均值作为计算输入参数,杆件材料性能见表2;其中连接盘材料性能与立杆材料性能保持一致,直插头、扣接头与对应水平杆件保持一致。

表2 材料性能试验数据

Table 2 Material property test data			
杆件类型	屈服强度 f_y/MPa	抗拉强度 f_u/MPa	弹性模量 $E/(\times 10^5 \text{MPa})$
盘轮扣立杆	275.24	454.87	2.11
轮扣水平杆	265.17	385.44	2.05
盘扣水平杆	273.39	402.65	2.09

2 盘轮扣节点转动刚度试验

2.1 试验布置

随机选取18根盘轮扣式立杆,含9根轮扣式水平杆(LK-1~LK-9)和9根盘扣式水平杆(PK-1~PK-9)开展节点转动刚度试验研究,试验布置如图3所示。试验中立杆两端由万能试验机压紧,立杆两端边界条件等效为固接。

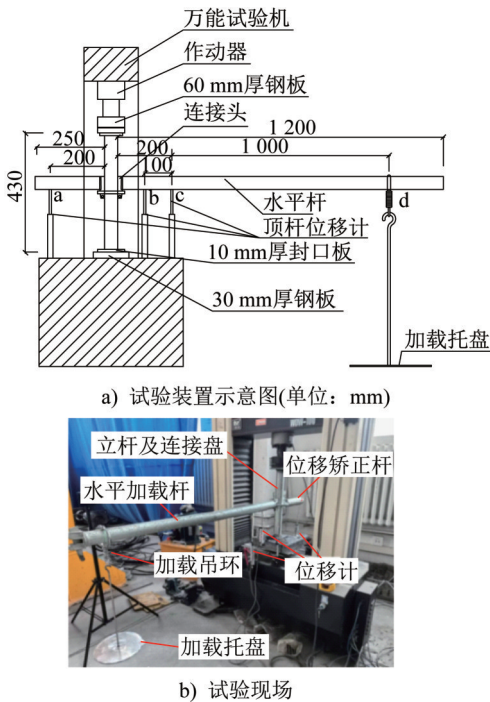


图3 试验布置

Fig. 3 Test setup

立杆一侧布置位移矫正杆(长度为250 mm),在距立杆边缘200 mm的a点布置位移计;另一侧布置水平加载杆(长度为1 200 mm),在距离立杆边缘100 mm、200 mm的b、c点布置位移计,用于采集测点竖向位移。

2.2 试验步骤

荷载施加点d距离立杆边缘1 000 mm,采用总重约5 N的吊环与托盘施加竖向集中力砝码荷载。首先在d

点施加98 N预荷载,持荷20 min,待读数稳定后卸载;之后逐级增加标准砝码加载,每一级加载维持荷载至位移计读数稳定,记录数据后再进行下一级加载。试验持续至无法继续加载或节点发生破坏为止。

2.3 试验现象

2.3.1 轮扣式连接转动刚度试验

轮扣式连接转动刚度试验现象如图4所示。试件LK-1~LK-9试验现象相近,以试件LK-1为例进行说明:加载初期,直插头与连接盘贴合紧密,节点无明显变形;弯矩增加至 $147.98 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($0.32M_u$, M_u 为极限弯矩)时,直插头腰部弧形面与立杆管壁间出现缝隙;随着弯矩持续增加,直插头产生微量拔出,此时直插头与连接盘发生相对滑移;弯矩增加至 $310.66 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($0.68M_u$)时,持荷状态下节点位移缓慢增长,直插头发生弯曲;当弯矩增至 $458.64 \text{ N}\cdot\text{m}$ (M_u)时,节点位移急剧增大,加载托盘触地;试件LK-3、LK-4、LK-8直插头发生断裂(图4d),其余试件直插头出现明显弯曲变形,节点丧失承载能力(图4c)。

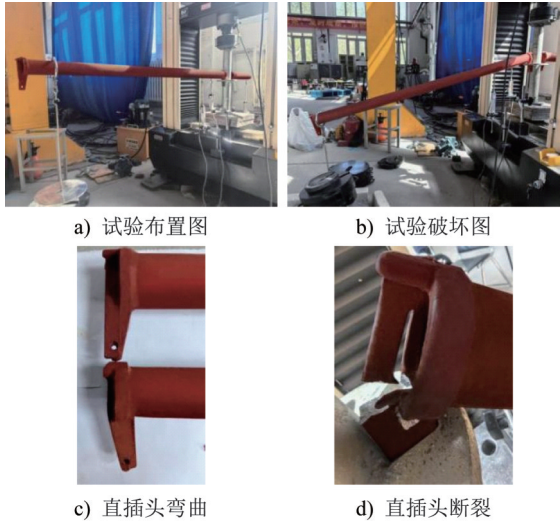


图4 轮扣式连接转动刚度试验布置与破坏现象

Fig. 4 Rotational stiffness test setup and failure phenomena of wheel-buckle connection

2.3.2 盘扣式连接转动刚度试验

盘扣式连接转动刚度试验现象如图5所示。试件PK-1~PK-9试验现象相近,以试件PK-1为例进行说明:加载初期,扣接头两端扣合于连接盘,插销楔紧充分,节点无明显变化;弯矩增加至 $197.96 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($0.25M_u$)时,扣接头弧形面与立杆管壁开始分离,随弯矩提升缝隙逐步扩大;弯矩增加至 $539.98 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($0.69M_u$)时,持荷阶段节点位移持续增大,插销出现微小弯曲;当弯矩增至 $784 \text{ N}\cdot\text{m}$ (M_u)时,节点位移急剧增加,插销明显弯曲(图5c),节点丧失承载能力。卸载后可观测到连接盘出现凹陷(图5d)。

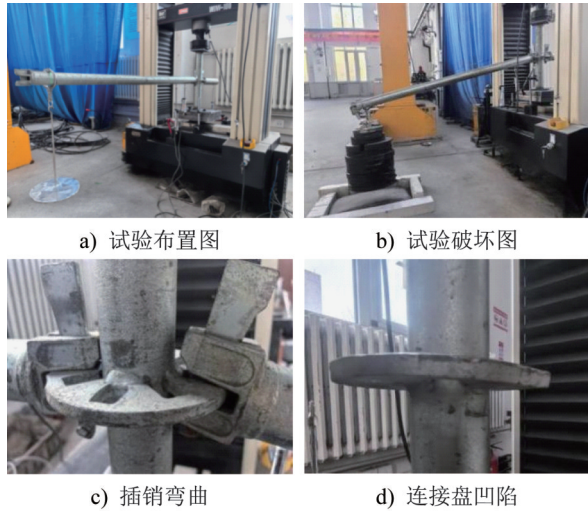


图5 盘扣式连接转动刚度试验布置与破坏现象
Fig. 5 Rotational stiffness test setup and failure phenomena of disc-buckle connection

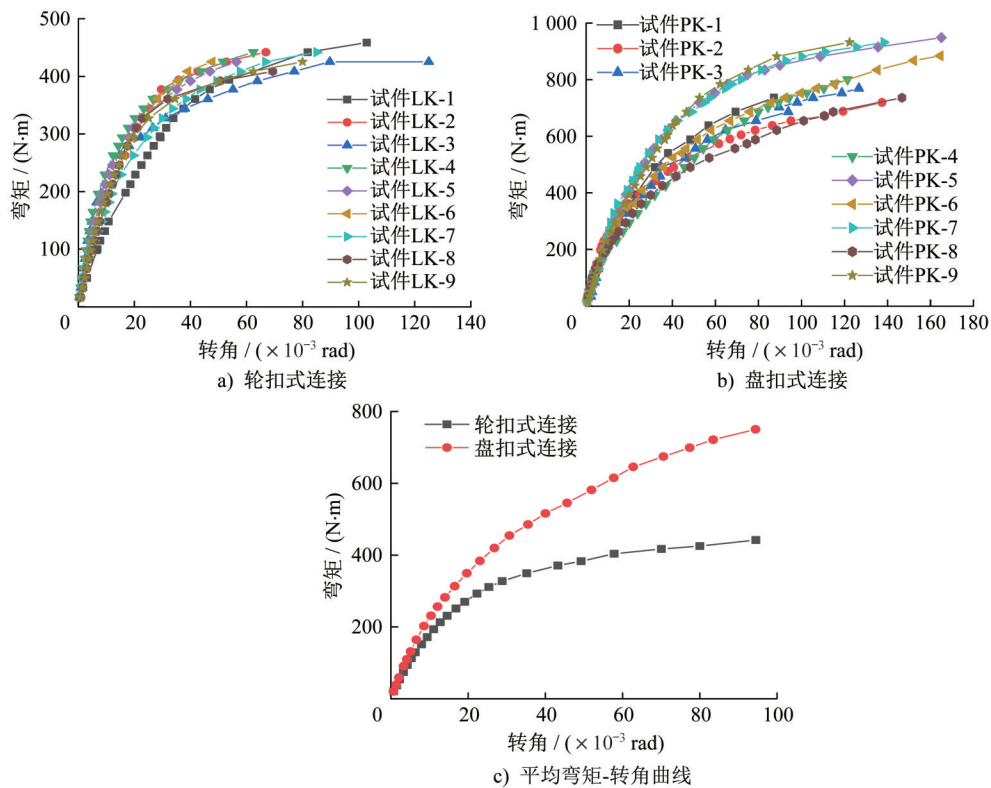


图6 盘轮扣节点弯矩-转角曲线

Fig. 6 Bending moment-rotation curves of disc-wheel-buckle joints

图6c)为两类连接的平均弯矩-转角曲线。由图6c)可知:轮扣式和盘扣式连接在杆端弯矩达到200 N·m前,两条曲线基本重合,处于弹性阶段,其中盘扣式连接曲线的初始斜率更大;弯矩分别达到400 N·m(轮扣式)、700 N·m(盘扣式)后,曲线偏离线性,节点进入塑性;弯矩进一步增大后节点位移快速发展,轮扣式以直插头弯曲或断裂为破坏特征,盘扣式以插销弯曲、连接盘凹陷为破

2.4 节点弯矩-转角曲线

试验结束后,参照规范^[19]提供的计算方法绘制弯矩-转角曲线,其中弯矩 M 的计算公式为:

$$M = Fl \quad (1)$$

式中: F 为施加的荷载; l 为加载点至节点的距离,取固定值1 000 mm;

节点转角 θ 取水平加载杆、位移校正杆二者的转角差,具体的计算公式为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{f_c - f_b}{100}\right) - \arctan\left(\frac{f_a}{200}\right) \quad (2)$$

式中: f_a 、 f_b 、 f_c 分别为a、b、c点的竖向位移。

图6a)、6b)分别为轮扣式、盘扣式连接的 $M-\theta$ 曲线。两类连接方式的 $M-\theta$ 曲线变化规律相近:节点转角达到0.02 rad前,弯矩-转角近似线性增长;转角超过0.02 rad后,同等弯矩增量下转角增长加快,曲线进入非线性阶段。

坏特征。两类连接极限转角接近;盘扣式连接依靠插销与扣接头协同受力,轮扣式连接仅依靠直插头腰部传力,因此盘扣式连接极限弯矩更高,节点综合受力性能更优。

2.5 节点转动刚度

根据不同加载阶段,取 $M-\theta$ 曲线中第一级加载曲线的初始斜率为初始刚度(K_0);转角0.02 rad以内的割线斜

率为割线刚度(K_s);切线斜率为切线刚度(K_t),计算公式分别为:

$$K_0 = \frac{M_0}{\theta_0} \quad K_s = \frac{M_p}{\theta_p} \quad K_t = \frac{\Delta M_p}{\Delta \theta_p} \quad (3)$$

式中: M_0 、 M_p 、 ΔM_p 分别为初始弯矩、杆端弯矩、杆端弯矩增量; θ_0 、 θ_p 、 $\Delta \theta_p$ 分别为初始转角、节点转角、节点转角增量。轮扣式与盘扣式连接的各刚度平均值如表3和表4所示。

表3 轮扣式连接各刚度平均值
Table 3 Average stiffness of wheel-buckle connections (kN·m·rad⁻¹)

参数	试件编号									平均值
	LK-1	LK-2	LK-3	LK-4	LK-5	LK-6	LK-7	LK-8	LK-9	
K_0	37.72	40.80	23.80	22.21	25.34	19.26	31.73	21.50	22.93	27.25
K_s	21.22	26.01	25.32	21.50	25.01	22.71	27.02	21.23	22.13	23.57
K_t	20.59	20.34	25.61	21.34	25.02	23.03	24.57	20.33	22.20	22.56

表4 盘扣式连接各刚度平均值
Table 4 Average stiffness of disc-buckle connections (kN·m·rad⁻¹)

参数	试件编号									平均值
	PK-1	PK-2	PK-3	PK-4	PK-5	PK-6	PK-7	PK-8	PK-9	
K_0	35.30	56.47	15.12	32.04	43.67	26.19	48.29	41.86	24.84	35.98
K_s	27.15	36.28	21.55	32.33	26.20	26.17	27.19	34.90	23.92	28.41
K_t	25.90	30.10	26.83	31.01	25.08	26.43	26.85	30.04	24.77	27.45

由表3、表4可知:轮扣式连接的平均初始刚度、割线刚度、切线刚度分别为27.25 kN·m·rad⁻¹、23.57 kN·m·rad⁻¹、22.56 kN·m·rad⁻¹;盘扣式连接的对应刚度分别为35.98 kN·m·rad⁻¹、28.41 kN·m·rad⁻¹和27.45 kN·m·rad⁻¹。相较于轮扣式连接,盘扣式连接的平均初始刚度、割线刚度和切线刚度分别提升了32.04%、20.53%和21.68%。

进一步分析轮扣式和盘扣式连接的刚度数值,发现初始刚度数值偏大,用于表征完整线性阶段刚度偏不安全;割线刚度略高于切线刚度,为保留安全储备,推荐采用线性阶段的平均切线刚度作为盘轮扣节点的转动刚度。轮扣式、盘扣式连接的转动刚度分别为22.56 kN·m·rad⁻¹、27.45 kN·m·rad⁻¹,二者均满足《建筑施工临时支撑结构技术规范》(JGJ 300—2013)^[20]中对承插型节点刚度不低于20 kN·m·rad⁻¹的限值要求。

3 盘轮扣节点转动刚度有限元分析

3.1 节点模型

采用有限元软件ABAQUS分别建立轮扣式和盘扣式连接的有限元模型(图7),模型几何尺寸同试验试件(表1),材料参数采用材性试验结果,见表2。

有限元模型中主体构件端板、立杆、水平杆采用C3D8R单元模拟;连接盘、直插头、扣接头等关键受力部位采用C3D10单元加密网格模拟;对不同几何特征进行差异化网格处理,盘扣式扣接头采用六面体网格单元模拟,轮扣式直插头采用四面体网格单元模拟。

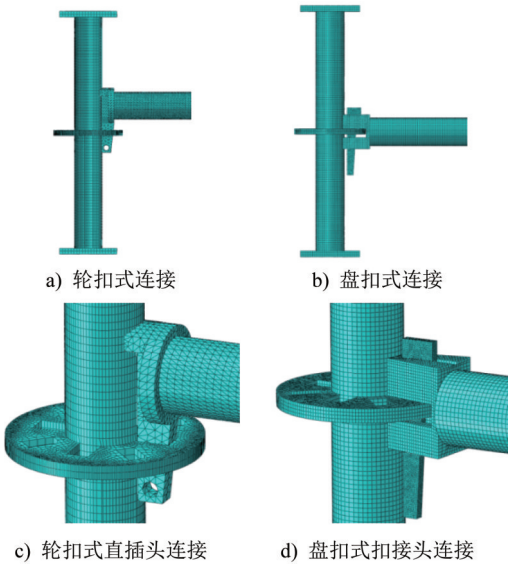


图7 有限元模型

Fig. 7 Finite element model

立杆与连接盘、水平杆与直插头或扣接头的焊接部位设置绑定约束;连接头弧形端面与立杆管壁、直插头或插销侧面与连接盘孔壁等主要接触面对采用面面接触,摩擦系数取0.3^[9],设置主从面避免接触穿透。

采用参考点耦合设置边界条件,为真实反映盘轮扣式节点连接位置的受力特性,将立杆的顶部和底部设置为固定约束,并在水平杆距离节点1 000 mm位置的参考点施加z向荷载,加载制度与试验保持一致。

3.2 有限元模拟与试验结果对比分析

轮扣式和盘扣式连接的有限元 Mises 应力云图如图 8 所示。从图 8a)、b) 可以看出:节点应力集中在水平杆与立杆的连接区域,主要分布于直插头和插销的腰部、立杆的下端以及连接盘的孔洞周边。由图 8b)、d) 可知:数值模拟得到的直插头、插销弯曲变形和试验破坏现象一致,说明直插头与插销是该类节点的主要薄弱构件,工程应用中应重点关注。

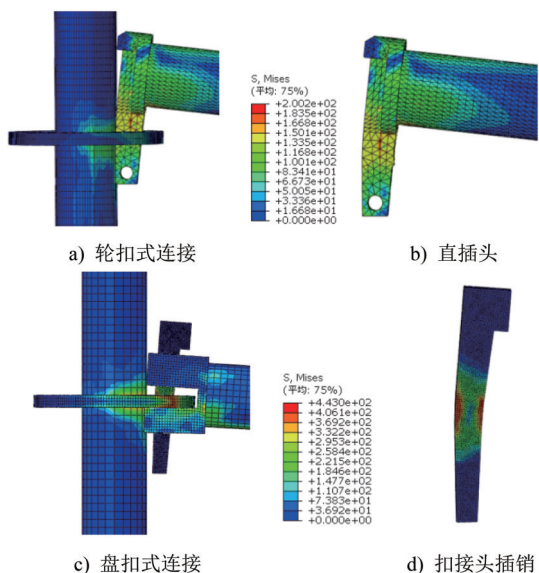


图 8 Mises 应力图 (单位:MPa)

Fig. 8 Mises stress contours (unit:MPa)

有限元与试验平均弯矩-转角曲线对比如图 9 所示。试验与有限元分析得到的弯矩-转角曲线吻合较好,二者变化趋势相符,线性-非线性转换点均出现在转角 0.02 rad 附近。

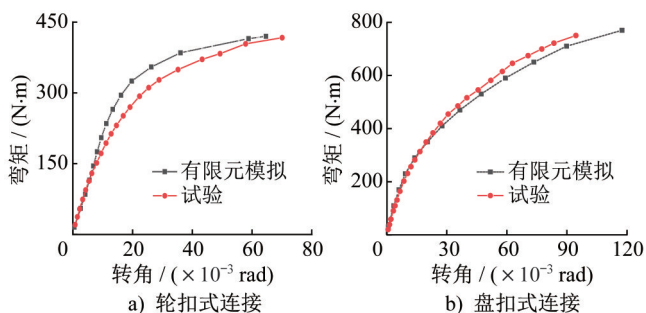


图 9 试验与有限元模拟弯矩-转角关系曲线对比

Fig. 9 Comparison of bending moment-rotation relationship curves between test and finite element simulation

轮扣式连接中,弯矩小于 150 N·m 时有限元模拟与试验吻合良好;但加载后期有限元模拟的转动刚度值高于试验的转动刚度值,二者极限弯矩与极限转角相近。原因在于试验杆件经过多次周转,存在锈蚀、初始损伤缺陷(图

4),而有限元模型未计入钢材初始缺陷,造成后期有限元模拟的转动刚度偏高。盘扣式连接中,全加载阶段有限元模拟与试验拟合效果较好;构件屈服后荷载仍可缓慢增长,这是因为插销同时受到扣接头两端与连接盘孔壁三面约束,节点屈服后依旧具有一定竖向承载能力。

采用与 2.5 节相同的转动刚度计算方法,有限元得到的轮扣式和盘扣式连接的转动刚度分别为 $22.90 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 和 $26.99 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$;与试验值 $22.56 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 和 $27.45 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 相比,分别提升了 1.5 和降低了 1.7%,数值模拟结果与试验结果一致性较好。

4 结论

本文针对盘轮扣节点的轮扣式、盘扣式两种连接形式开展转动刚度试验研究与有限元数值分析,主要结论如下:

(1) 通过试验发现,节点破坏均发生在水平杆接头-立杆连接位置;轮扣式连接主要失效模式为直插头弯曲或断裂,盘扣式连接主要失效模式为插销弯曲。

(2) 建议采用线性阶段平均切线刚度作为该类节点转动刚度设计取值;本文试验条件下,轮扣式连接转动刚度取 $22.56 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$,盘扣式连接转动刚度取 $27.45 \text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ 。

(3) 有限元模拟结果和试验数据拟合良好;周转变换使用的盘轮扣杆件,在节点转角达到 0.02 rad 前基本处于弹性工作状态;转角超过 0.02 rad 后节点进入塑性阶段,转动刚度出现下降。

参考文献:

- [1] 张金轮,张阿祥,王家伟.碗扣式钢管支撑架不同构造形式节点的转动刚度试验研究[J].建筑钢结构进展,2024,26(5): 73-83.DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.05.009.
ZHANG Jinlun, ZHANG Axiang, WANG Jiawei. Experiment on rotational stiffness for joints with different structural forms of cuplock steel tubular formwork support [J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(5): 73-83.DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2024.05.009.(in Chinese)
- [2] DEREVYANKO E, SHMELEV G, KHAIDAROV L, et al. Creating a node connection for scaffolding and studying its stress-strain state by means of a full-scale test [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 890(1): 012043.DOI:10.1088/1757-899x/890/1/012043.
- [3] CHUNG D H, WON J H. Experimental study on the rotational stiffness of pocket type scaffolding connection according to the rotation direction [J]. Applied Sciences, 2023, 13(9): 5500.DOI: 10.3390/app13095500.
- [4] 胡长明,王娟,梅源,等.扣件式钢管高大模板支架抗连续倒塌分析[J].建筑钢结构进展,2019,21(3): 50-55.DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.03.006.

- HU Changming, WANG Juan, MEI Yuan, et al. Analysis on the progressive collapse resistance of fastener-style steel tube tall falsework[J]. Progress in Steel Building Structures, 2019, 21(3): 50-55. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2019.03.006. (in Chinese)
- [5] 陈志华, 陆征然, 王小盾. 钢管脚手架直角扣件刚度的数值模拟分析及试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(9): 100-108. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2010.09.017.
- CHEN Zhihua, LU Zhengran, WANG Xiaodun. Numerical analysis and experimental study of the stiffness of right angle couplers in tubular steel scaffolds [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(9): 100-108. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2010.09.017. (in Chinese)
- [6] 刘卫然, 于海丰, 黄俊, 等. 轮扣式模板支撑架稳定承载力试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 219-227. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0266.
- LIU Weiran, YU Haifeng, HUANG Jun, et al. Experimental study and finite element analysis of stable bearing capacity of wheel-buckle formwork supporting frame [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(1): 219-227. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0266. (in Chinese)
- [7] 张漳荣, 周继忠, 姜绍飞. 套管插插式脚手架节点力学性能分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 525-531. DOI: 10.7631/issn.1000-2243.19477.
- ZHANG Zhangrong, ZHOU Jizhong, JIANG Shaofei. Mechanical properties analysis of casing plug scaffold joints [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2020, 48(4): 525-531. DOI: 10.7631/issn.1000-2243.19477. (in Chinese)
- [8] 肖明葵, 徐灿, 段军, 等. 承插型盘扣式模板支撑体系节点半刚性研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(12): 228-233. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2017.12.041.
- XIAO Mingkui, XU Can, DUAN Jun, et al. Research on the semi-rigid joint of disk lock steel tubular type for support system [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(12): 228-233. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2017.12.041. (in Chinese)
- [9] 刘卫然, 于海丰, 王鑫, 等. 新型轮扣式脚手架节点转动刚度试验及数值模拟[J]. 钢结构, 2018, 33(11): 26-31. DOI: 10.13206/j.gjg201811005.
- LIU Weiran, YU Haifeng, WANG Xin, et al. Rotational stiffness test and numerical analysis of a new type pulley-clip scaffold [J]. Steel Construction, 2018, 33(11): 26-31. DOI: 10.13206/j.gjg201811005. (in Chinese)
- [10] 杨伟军, 杨永达, 杨曙. 轮扣式钢管支模架节点连接性能试验研究[J]. 工业建筑, 2012, 42(10): 101-107. DOI: 10.13204/j.gyjz2012.10.024.
- YANG Weijun, YANG Yongda, YANG Shu. Experimental study on connection performance of wheel-buckled steel tubular formwork support joints [J]. Industrial Construction, 2012, 42(10): 101-107. DOI: 10.13204/j.gyjz2012.10.024. (in Chinese)
- [11] 张凌博, 刘京红, 李兵兵, 等. 盘扣式钢管脚手架节点转动刚度及稳定承载力研究[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(12): 1224-1231. DOI: 10.15918/j.tbtt1001-0645.2022.184.
- ZHANG Lingbo, LIU Jinghong, LI Bingbing, et al. Study on joint rotational stiffness and stable bearing capacity of disk lock steel tubular scaffold [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(12): 1224-1231. DOI: 10.15918/j.tbtt1001-0645.2022.184. (in Chinese)
- [12] ZHANG L B, LIU J H, TANG Q, et al. A numerical study on rotational stiffness characteristics of the disk lock joint [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 207: 107968. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.107968.
- [13] 白万民, 孙佰珉, 张凌博, 等. 盘扣式模板支架节点安全性能试验及数值模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(8): 3046-3052. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2024.0088.
- BAI Wanmin, SUN Limin, ZHANG Lingbo, et al. Experimental study on the rotational stiffness of joints in coiled formwork brackets [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(8): 3046-3052. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2024.0088. (in Chinese)
- [14] 王凝, 曾凡奎, 曲丹丹, 等. 不同楔紧度下的盘扣式钢管脚手架的节点受力性能试验分析[J]. 工业建筑, 2025, 55(5): 104-112. DOI: 10.3724/j.gyjzG22101811.
- WANG Ning, ZENG Fankui, QU Dandan, et al. Experimental analysis on the mechanical properties of joints in disc-button steel tubular scaffolding under different wedge tightness conditions [J]. Industrial Construction, 2025, 55(5): 104-112. DOI: 10.3724/j.gyjzG22101811. (in Chinese)
- [15] 陈桂香, 郭泽群, 胡德平, 等. 承插型盘扣式钢管支架盘扣节点扭矩转角模型适用性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(2): 192-199, 232. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2020.02.006.
- CHEN Guixiang, GUO Zequn, HU Deping, et al. Study on applicability of torque-rotation model of disk-pin joint node of disk lock steel tubular scaffold [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2020, 52(2): 192-199, 232. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2020.02.006. (in Chinese)
- [16] T/CFSA 08—2022 盘轮扣复合型钢管支撑架安全技术标准[S].
- T/CFSA 08—2022 Safety technical standard for composite steel pipe support frame with disc wheel buckle [S]. (in Chinese)
- [17] GB/T 1591—2018 低合金高强度结构钢[S].
- GB/T 1591—2018 High strength low alloy structural steels [S]. (in Chinese)
- [18] JG/T 503—2016 承插型盘扣式钢管支架构件[S].
- JG/T 503—2016 Disk lock steel tubular scaffold components [S]. (in Chinese)
- [19] GB 15831—2023 钢管脚手架扣件[S].
- GB 15831—2023 Steel tube scaffold couplers [S]. (in Chinese)
- [20] JGJ 300—2013 建筑施工临时支撑结构技术规范[S].
- JGJ 300—2013 Technical code for temporary support structures in construction [S]. (in Chinese)