引用格式：孔瑞富，林帆，冉志红，等．承插型盘扣式M60型钢管模板支架盘扣节点刚度研究[J]．工业建筑，2026，56(3)：151-160．KONG Ruifu，LIN Fan，RAN Zhihong，et al．Research on the Stiffness of Disk-Lock Joints in M60 Socket-and-Disk Cuplock Steel Tube Formwork Supports [J]．Industrial Construction，2026，56(3)：151-160 (in Chinese)．DOI：10．3724/j．gyjzG23071703

承插型盘扣式M60型钢管模板支架盘扣节点刚度研究*

孔瑞富　林　帆　冉志红　王　震　许兆杰

（云南大学建筑与规划学院，昆明　650091）

摘　要　承插型盘扣式钢管支架的半刚性节点刚度随着节点弯矩的增加而逐渐减小，呈现出明显的非线性关系，多根受弯横杆同时连接在盘扣节点上时，盘扣根部会出现应力重叠导致节点刚度值降低。以试验和ABAQUS有限元数值模拟方法研究盘扣式支架半刚性节点在一根、两根、三根、四根横杆共同作用下刚度值的变化规律，应用二参数对数模型和三线性模型数理统计方法对试验和有限元数据进行处理，提出了便于架体结构数值模拟分析和工程应用的三阶段节点抗弯刚度取值。研究结果表明：盘扣节点连接两根相邻呈直角的横杆时盘扣根部应力重叠会降低节点刚度，当节点弯矩为0~200 N·m时，半刚性节点刚度值宜取20~30 kN·m/rad；当节点弯矩为200~600 N·m时，半刚性节点刚度值宜取9~11 kN·m/rad；当节点弯矩大于600 N·m时，半刚性节点刚度值宜取2~6 kN·m/rad。

关键词　盘扣式支架；半刚性节点；刚度值；数值拟合

Research on the Stiffness of Disk-Lock Joints in M60 Socket-and-Disk Cuplock Steel Tube Formwork Supports

KONG Ruifu　LIN Fan　RAN Zhihong　WANG Zhen　XU Zhaojie

(*School of Urban Architecture and Urban Planning*, *Yunnan University*, *Kunming* 650091, *China*)

Abstract: The stiffness of semi-rigid joints in socket-and-disk cuplock steel tube formwork supports gradually decreases with increasing joint bending moment, showing an obvious nonlinear relationship. When multiple bending cross bars are connected to the buckle joint at the same time, stress overlap occurs at the buckle root, leading to reduced joint stiffness. This study investigates the variation law of stiffness values in semi-rigid joints of socket-and-disk supports under the combined action of one, two, three, and four cross bars through experimental testing and ABAQUS finite element numerical simulation. The mathematical statistical methods of the two-parameter logarithmic model and the trilinear model were used to process the test and finite element data, facilitating numerical analysis of joint stiffness and bending resistance in frame structures. The results showed that when the buckle joint connected two adjacent cross bars at a right angles, the stress overlap at the buckle root reduced the joint stiffness. Specifically, when the bending moment of the joint was 0-200 N·m, the stiffness value of semi-rigid joints should be 20-30 kN·m/rad; when the joint bending moment was 200-600 N·m, the stiffness value of semi-rigid joints should be 9-11 kN·m/rad; when the joint bending moment exceeded 600 N·m, the stiffness value of semi-rigid joints should be 2-6 kN·m/rad。

Keywords: socket-and-disk support; semi-rigid joint; stiffness value; numerical fitting

* 云南省教育厅科学研究基金项目资助(2023J0030)。

第一作者：孔瑞富，硕士研究生，主要从事建筑工程施工技术方向研究。

通信作者：林帆，博士，evita_lloyd@hotmail．com。

收稿日期：2023-07-17

© 2026 工业建筑

0 引 言

承插型盘扣式M60钢管模板支架具有应用范围广、经济性好和承载力高等优点，逐渐成为了建筑行业工程施工主要的临时支撑结构体系[1]。

以往的研究普遍得出了盘扣式支架节点为半刚性连接[2-3]，其抗弯刚度值为20~90 kN·m/rad[4-12]的结果。同时，现行规范JGJ 300—2013《建筑施工临时支撑结构技术规范》[13]和JGJ/T 231—2021《建筑施工承插型盘扣式钢管脚手架安全技术标准》[14]对盘扣式支架节点半刚性节点刚度值的规定分别为35 kN·m/rad和86 N·m/rad。由此可见，目前对于盘扣式支架的节点刚度取值还没有形成统一的认同，主要体现在两个方面：一是对于节点刚度大小的取值不同[4-14]；二是对节点刚度取值为某个定值[8-10,13-14]或变化值[6-7,11-12]。以往对于节点刚度值的研究中，主要针对由节点连接一根横杆的情况。同时，既有研究成果也表明节点的半刚性特性具有明显的非线性特征，其刚度值取决于架体整体受力过程中节点的受力情况。在实际的支架体系中，支架节点往往连接了两根横杆、三根横杆、四根横杆。若连接的多根杆件同时对盘扣产生弯矩，则在盘扣根部就会产生应力重叠的现象，节点的刚度值相对于连接一根横杆时就会降低。因此，对多根横杆作用下盘扣根部应力重叠的节点刚度以及非线性特性有待进一步研究。

为此，本文通过设计立杆连接不同数量、不同位置横杆的节点抗弯试验，并对比数值模拟结果，对盘扣式支架半刚性节点在不同数量横杆作用时刚度值的变化规律及刚度取值进行了研究，得出了节点构件连接一根横杆、两根横杆、三根横杆和四根横杆时节点半刚性刚度值的变化规律和取值。

1 试验设计及数据处理

1.1 试验方案设计

设计并制作立杆连接一根横杆、两根呈直角横杆、两根呈平角横杆、三根横杆和四根横杆的5组盘扣节点构件，抗弯试验构件规格及材质如表1所示。

盘扣节点抗弯试验装置设计如图1所示。节点构件的立杆长为500 mm，盘扣上下各250 mm，上下两端用边长150 m、厚度5 mm的钢板焊接。横杆长1000 mm，在距离立杆轴心线1000 mm处预留一个小孔安装砝码托盘，使用5.1 kg的砝码通过逐级加载的方式对节点构件施加荷载，砝码托盘及吊杆重量忽略不计，采用液压式万能试验机施加压力为节点构件提供边界条件。试验过程中保持试验机压力恒定。

表1 构件规格及材质

Table 1 Specifications and materials of components

名称	规格	材质
立杆	ϕ60×3.2	Q345A
横杆	ϕ48×2.5	Q235B
盘扣	135×10	Q235B
插销	6	Q235B

注：立杆、横杆规格为外直径×壁厚；连接盘规格为外直径×厚度；插销规格为厚度。

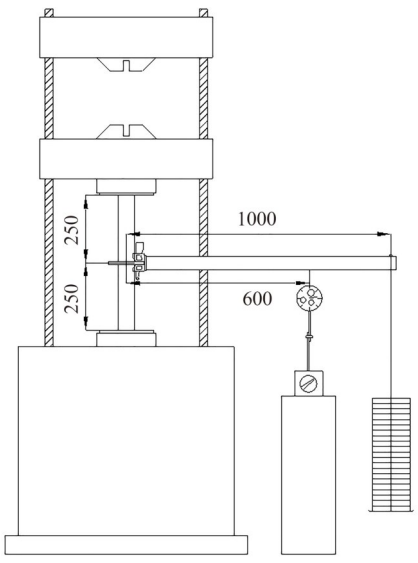


图1 节点抗弯试验装置设计 mm

Fig. 1 Design drawing of the bending test setup for joints

1.2 节点抗弯试验计算模型

物体的刚度只与材料属性有关，力学计算中通过荷载-位移关系表示刚度，则盘扣节点抗弯刚度可以通过节点的弯矩增量和转角增量表示，即：

$$k = \frac{\mathrm{d}M(\theta)}{\mathrm{d}\theta} \tag{1}$$

式中：$\mathrm{d}\theta$为盘扣节点弹簧转角增量；$\mathrm{d}M(\theta)$为盘扣节点弯矩增量；k为盘扣节点抗弯刚度。

盘扣节点在弯矩作用下节点处的相对转角可以分为立杆和横杆在荷载作用下自身的弹性变形，节点在荷载作用下的弹性变形，盘扣、锁头和插销之间的塑性变形及相对滑移产生的角位移。盘扣节点抗弯试验的计算模型如图2所示。

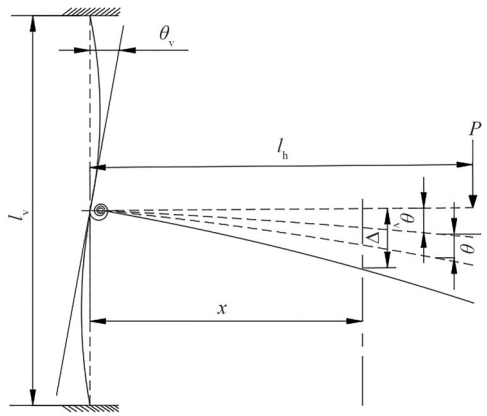


图 2　节点抗弯试验计算模型

Fig. 2　Calculation model for the bending test of joints

假设节点构件在荷载作用下只产生小变形，横杆在竖向集中荷载作用下对盘扣节点处产生的弯矩为：

$$M = Fl_h \tag{2}$$

式中：l_h为横杆竖向集中力作用点至立杆轴心线的距离；F为水平杆竖向集中力；M为盘扣节点弯矩。

在横杆弯矩作用下立杆中部的转角和盘扣节点弹性转角分别为：

$$\theta_v = \frac{Ml_v}{16EI_v} = \frac{Fl_h l_v}{16EI_v} \tag{3a}$$

$$\theta = \frac{M}{k} = \frac{Fl_h}{k} \tag{3b}$$

式中：I_v为立杆截面惯性矩；E为钢材弹性模量；l_v为立杆长度；θ、θ_v分别为节点弹簧转角和立杆转角。

横杆位移实测值与横杆、立杆弹性变形和节点弹簧转角之间的关系式为：

$$\left(\theta_v + \theta\right)x + \frac{Fx^3}{3EI_h} + \frac{F\left(l_h - x\right)x^2}{2EI_h} = \Delta \tag{4}$$

式中：Δ为水平杆测点位移；I_h为水平杆截面惯性矩；x为水平杆测点距立杆轴心线的距离。

由式(3)、(4)推导得盘扣节点弯矩与转角关系为：

$$M = \frac{48EI_h I_v\left(\Delta - \theta x\right)}{3I_h l_v l_h + 8I_v x^2\left(3l_h - x\right)} \tag{5}$$

1.3　节点构件 $M-\theta$ 数据拟合

在盘扣节点抗弯试验和有限元数值模拟分析的基础上，应用数理统计方法，将盘扣节点构件试验和有限元模拟得出的$M-\theta$关系曲线分别用三线性模型、二参数对数函数模型进行拟合。函数拟合模型分别为：

三线性拟合函数模型：

$$M = \begin{cases} k_1\theta_1 & 0 \leqslant M < M_1 \\ M_1 + k_2\theta_2 & M_1 \leqslant M < M_2 \\ M_2 + k_3\theta_3 & M_2 \leqslant M \leqslant M_3 \end{cases} \tag{6}$$

式中：k_1、k_2、k_3分别为不同阶段盘扣节点抗弯刚度；θ_1、θ_2、θ_3为节点转角；M_1、M_2、M_3为三线形模型中，节点刚度变化时的特征弯矩值，本研究中，特征弯矩值M_1~M_3及对应的节点刚度k_1~k_3在 4.1 节表 4 中进行了讨论。

二参数对数函数模型：

$$M(\theta) = n\ln\left(1 + \frac{R_k\theta}{n}\right) \tag{7}$$

式中：n为形状参数；R_k为初始抗弯刚度。

2　盘扣节点抗弯刚度试验及结果分析

2.1　盘扣节点抗弯刚度试验过程

在进行盘扣节点抗弯刚度试验前先对式(5)进行验证，试验装置如图 3(a)所示。进行 5 组盘扣节点抗弯试验，节点构件连接一根横杆、两根呈直角横杆、两根呈平角横杆、三根横杆和四根横杆的试验现场如图 3(b)~(f)所示。

试验时将立杆放在液压式万能试验机上压紧固定，经计算试验机压力取 30 kN 能够保证试验构件在最大荷载作用下不会产生位移，两端边界条件可以视为固接。将横杆锁头插销敲击夹紧，在每根横杆距离立杆中心线 60 cm 处放置一个位移计，在距离立杆中心线 1.0 m 处的横杆端头同时分级施加集中力，每次增加 100 N，位移计读数稳定后再进行下一级加载，记录每级荷载作用下每根横杆的竖向位移值，加载至 1000 N 时停止，每组试验重复 5 次。第 1 组盘扣节点构件做单根横杆的节点抗弯试验，加载结束后对节点构件进行卸载试验，每次卸载 100 N，待位移计读数稳定后再进行下一级卸载，卸载至 0 N 时停止。

算式验证试验装置分别在横杆距离立杆中心线 40，60，80 cm 处放置三个位移计，采用分级加载方式每级加载 100 N，记录下三个位移计的位移值，将位移值代入式(5)进行换算后与理论计算值进行对比，经验证实测值与理论值吻合，表明式(5)可用于节点抗弯刚度试验中M-Δ关系到M-θ关系的换算处理。



(a) 算式验证试验装置　(b) 连接一根横杆　(c) 连接两根呈平角横杆

(d) 连接两根呈直角横杆　(e) 连接三根横杆　(f) 连接四根横杆

图3 节点构件连接不同横杆时的试验现场

Fig. 3 On-site test photos of the joint component connected to different cross bars

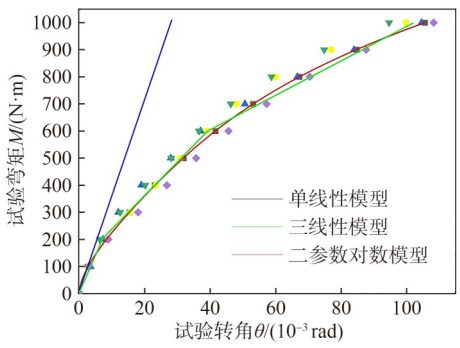


图4 一根横杆连接时节点$M-\theta$关系

Fig. 4 $M-\theta$ curves of the joint to one cross bar

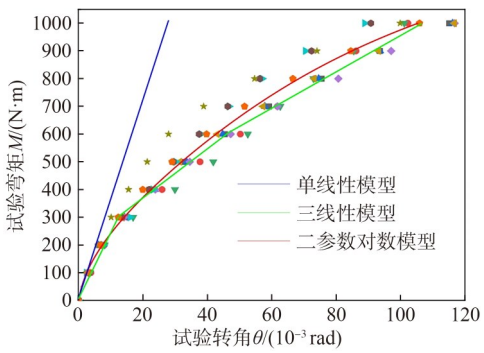


图5 两根横杆呈平角连接时节点$M-\theta$关系

Fig. 5 $M-\theta$ curves of the joint connected to two cross bars at a 180-degree angle

2.2 盘扣节点抗弯刚度试验结果分析

将5组节点构件试验实测力-位移数据采用式(5)进行$M-\Delta$关系到$M-\theta$关系的换算处理,用式(6)和式(7)对盘扣节点$M-\theta$数据进行拟合,节点$M-\theta$关系散点及拟合函数图形如图4~9所示。节点构件抗弯试验$M-\theta$数据拟合结果见表2,卸载时单线性模型拟合函数如图10所示,卸载时单线性模型拟合函数为$M=22.32\theta-1292.04$。

3 盘扣节点刚度有限元数值模拟

3.1 盘扣节点ABAQUS有限元建模

采用ABAQUS有限元数值分析软件按盘扣节点实际尺寸建立三维有限元模型,边界条件和加

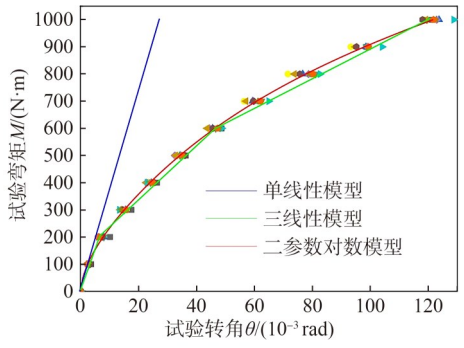


图 6　两根横杆呈直角连接时节点 $M-\theta$ 关系

Fig. 6　$M-\theta$ curves of the joint connected to two cross bars at a right angle

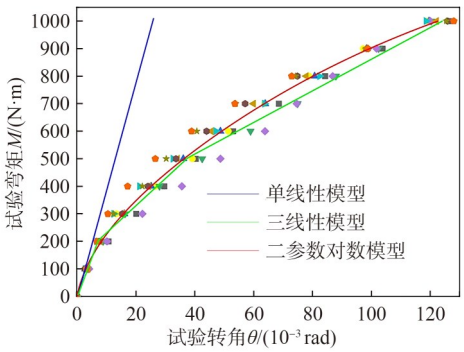


图 7　三根横杆连接时两边杆处节点 $M-\theta$ 关系

Fig. 7　$M-\theta$ curves of the joint at the two side bars with three connected cross bars

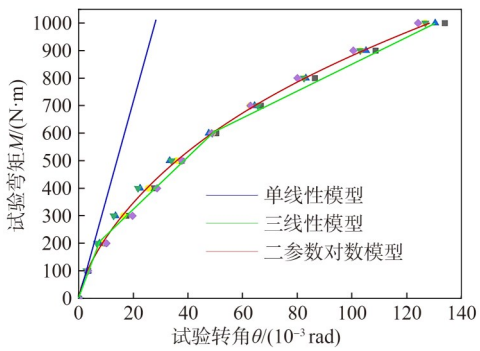


图 8　三根横杆连接时中间杆处节点 $M-\theta$ 关系

Fig. 8　$M-\theta$ curves of the joint at the middle cross bar with three connected cross bars

载方式与节点抗弯试验相同。节点构件连接一根横杆、两根呈直角横杆、两根呈平角横杆、三根横杆和四根横杆时的三维实体有限元模型如图 11 所示。

3.2　盘扣节点抗弯刚度有限元数值模拟结果分析

将 5 组盘扣节点构件有限元数值模拟计算得到的 $M-\theta$ 数据用式(6)和式(7)进行拟合，节点 $M-\theta$ 关系散点及拟合函数图形如图 12~17 所示。

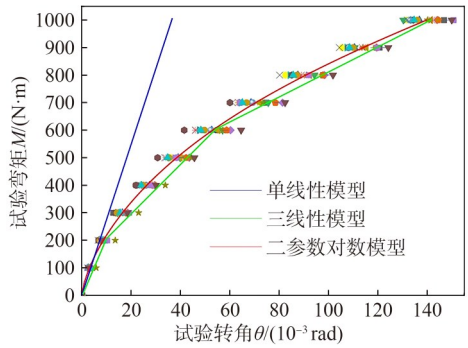


图 9　四根横杆连接时节点 $M-\theta$ 关系

Fig. 9　$M-\theta$ curves of the joint connected to four cross bars

表 2　节点构件抗弯试验模型的拟合参数

Table 2　Fitting parameters of mathematical models for bending test results of joint components

节点构件	三线性模型			二参数对数模型	
	k_1/(N·m·rad^{-1})	k_2/(N·m·rad^{-1})	k_3/(N·m·rad^{-1})	n	R_k/(N·m·rad^{-1})
一根横杆	28.2	10.7	6.8	545.8	28.6
两根 呈平角	27.4	10.4	6.7	485.3	29.5
横杆 呈直角	23.3	9.6	5.4	479.3	25.8
三根 两边杆	22.9	9.6	5.3	484.5	25.5
横杆 中间杆	23.3	9.5	4.8	478.2	24.5
四根横杆	24.4	9.3	4.8	484.0	25.0

注：三线性模型中节点抗弯刚度为 k_1 时，0 N·m ≤ M ≤ 200 N·m；为 k_2 时，200 N·m ≤ M ≤ 600 N·m；为 k_3 时，600 N·m ≤ M ≤ 1000 N·m。

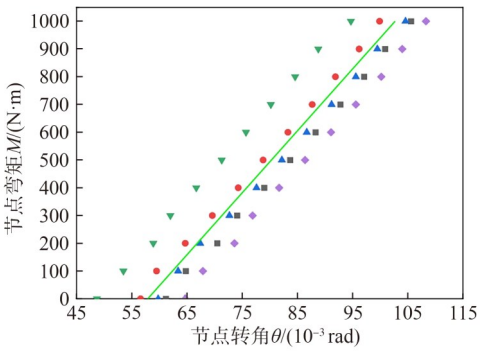


图 10　卸载时节点 $M-\theta$ 关系

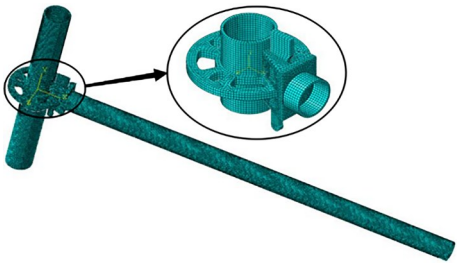
Fig. 10　$M-\theta$ curves of the joint during unloading

节点构件抗弯有限元数值模拟 $M-\theta$ 数据拟合结果见表 3。

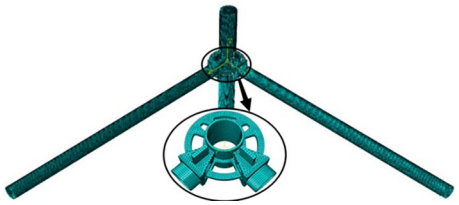
4　盘扣节点抗弯刚度结果分析

4.1　盘扣节点刚度试验和有限元计算结果分析

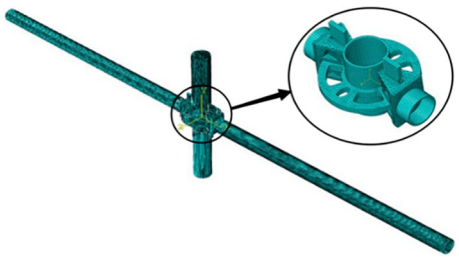
试验和 ABAQUS 有限元数值模拟得出的节点刚度值如表 4 所示。将试验中节点连接不同横杆时不同荷载工况的 5 组试验结果取平均值，6 种工况下



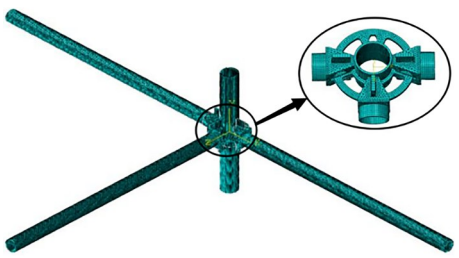
(a) 节点构件连接一根横杆



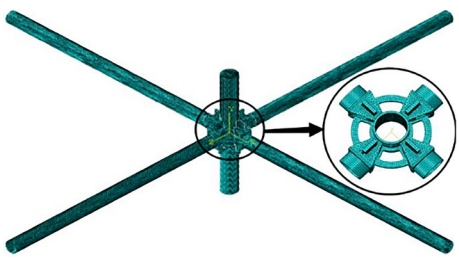
(b) 节点构件连接两根呈直角横杆



(c) 节点构件连接两根呈平角横杆



(d) 节点构件连接三根横杆



(e) 节点构件连接四根横杆

图11 节点构件连接不同横杆时的ABAQUS有限元模型

Fig. 11 ABAQUS finite element models of the joint component connected to different cross bars

节点$M-\theta$试验值关系曲线如图18所示,节点$M-\theta$有限元数值模拟计算值关系曲线如图19所示。每种工况下试验和ABAQUS有限元数值模拟得出的节点$M-\theta$关系曲线如图20所示。

由图18~20所示节点$M-\theta$关系曲线可知,试验

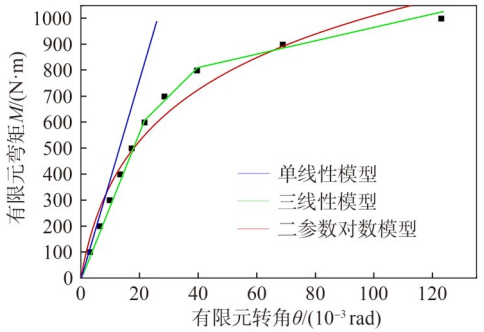


图12 一根横杆连接时节点$M-\theta$关系拟合函数

Fig. 12 $M-\theta$ fitting function of the joint connected to one cross bar

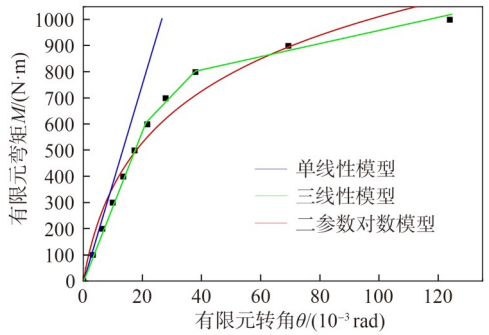


图13 两根横杆呈平角连接时节点$M-\theta$关系拟合函数

Fig. 13 $M-\theta$ fitting function of the joint connected to two cross bars at a 180-degree angle

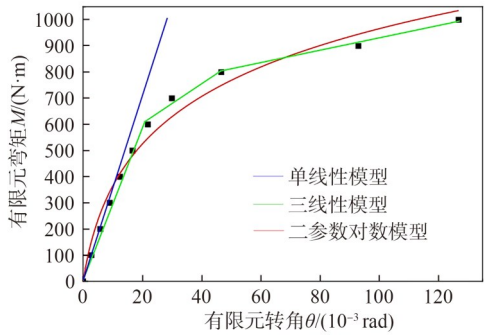


图14 两根横杆呈直角连接时节点$M-\theta$关系拟合函数

Fig. 14 $M-\theta$ fitting function of the joint connected to two cross bars at a right angle

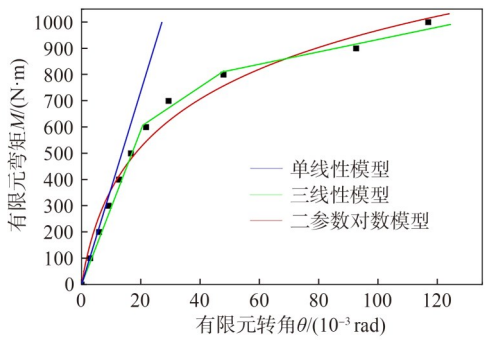


图15 三根横杆连接时两边杆处节点$M-\theta$关系拟合函数

Fig. 15 $M-\theta$ fitting function of the joint at the two side bars with three connected cross bars

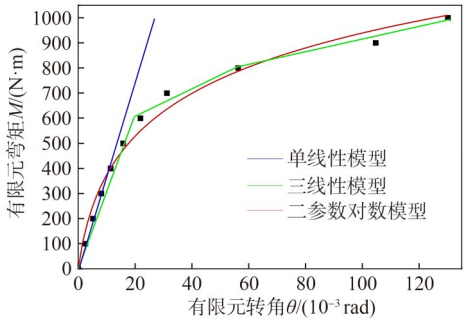


图 16　三根横杆连接时中间杆处节点 $M-\theta$ 关系拟合函数

Fig. 16　$M-\theta$ fitting function of the joint at the middle cross bar with three connected cross bars

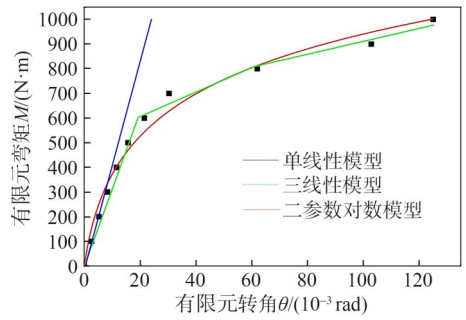


图 17　四根横杆连接时节点 $M-\theta$ 关系拟合函数

Fig. 17　$M-\theta$ fitting function of the joint connected to four cross bars

表 3　节点构件抗弯有限元数值模拟模型的拟合参数

Table 3　Fitting parameters of mathematical models for finite element simulation results of bending properties of joint components

节点构件		三线性模型			二参数对数模型	
		k_1/(N·m·rad^{-1})	k_2/(N·m·rad^{-1})	k_3/(N·m·rad^{-1})	n	R_k/(N·m·rad^{-1})
一根横杆		27.6	11.2	2.8	339.5	63.4
两根横杆	呈平角	27.7	12.3	2.7	338.2	64.0
	呈直角	27.4	8.1	2.5	302.9	70.4
三根横杆	两边杆	27.6	7.7	2.6	306.4	69.4
	中间杆	27.4	6.2	2.4	277.6	79.1
四根横杆		27.9	6.3	2.3	280.5	77.4

注：三线性模型中节点抗弯刚度为 k_1 时，0 N·m≤M≤600 N·m；为 k_2 时，600 N·m ≤ M ≤ 800 N·m；为 k_3 时，800 N·m ≤ M ≤ 1000 N·m。

和有限元数值模拟得出的节点 $M-\theta$ 关系曲线具有一定的差别，节点 $M-\theta$ 关系均具有明显的非线性。节点构件连接不同的横杆在不同荷载作用时，试验得出的节点 $M-\theta$ 关系曲线在弯矩大于 200 N·m 时就出现了明显的离散性，而 ABAQUS 有限元数值模拟得出的节点 $M-\theta$ 关系曲线在弯矩达到 600 N·m 时才表现出离散性，最后又趋于收敛，其原因在于有限元模拟是完全处于理想状态下的受力变形，而试验

表 4　节点刚度

Table 4　Stiffness values of joints　kN·m/rad

节点刚度		一根横杆	两根横杆		三根横杆		四根横杆
			平角	直角	两边	中间	
k_1	试验值	28.2	27.4	23.3	22.9	23.3	24.4
	有限元	27.6	27.7	27.4	27.6	27.4	27.9
k_2	试验值	10.7	10.4	9.6	9.6	9.5	9.3
	有限元	11.2	12.3	8.1	7.7	6.2	6.3
k_3	试验值	6.8	6.7	5.4	5.3	4.8	4.8
	有限元	2.8	2.7	2.5	2.6	2.4	2.3
R_k	试验值	28.6	29.5	25.8	25.5	24.5	25.0
	有限元	63.4	64.0	70.4	69.4	79.1	77.4

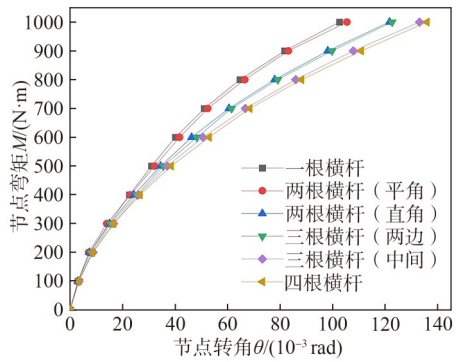


图 18　节点 $M-\theta$ 试验值关系曲线

Fig. 18　Experimental $M-\theta$ curves of joints

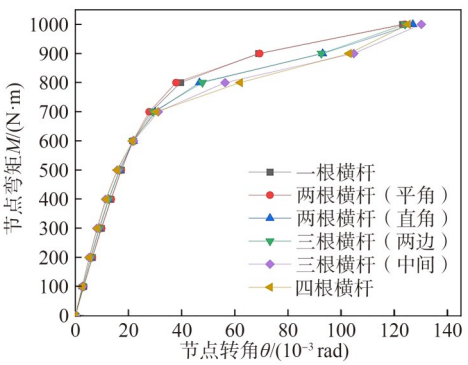


图 19　节点 $M-\theta$ 模拟值关系曲线

Fig. 19　Simulated $M-\theta$ curves of joints

结果影响因素较多，试验过程中插销松紧、盘扣焊接质量、分级加载间隔时间等均会影响节点的受力和变形结果，试验和 ABAQUS 有限元数值模拟得出的节点 $M-\theta$ 关系曲线变化趋势一致。在同一荷载作用下，二者之间的转角差先变大后变小，呈现出逐渐收敛的变化规律。

由表 4 和图 18~20 可知，根据试验和有限元数值模拟的节点 $M-\theta$ 关系曲线和节点刚度变化规律，表 4 的 6 种横杆连接情况的节点刚度可以分为

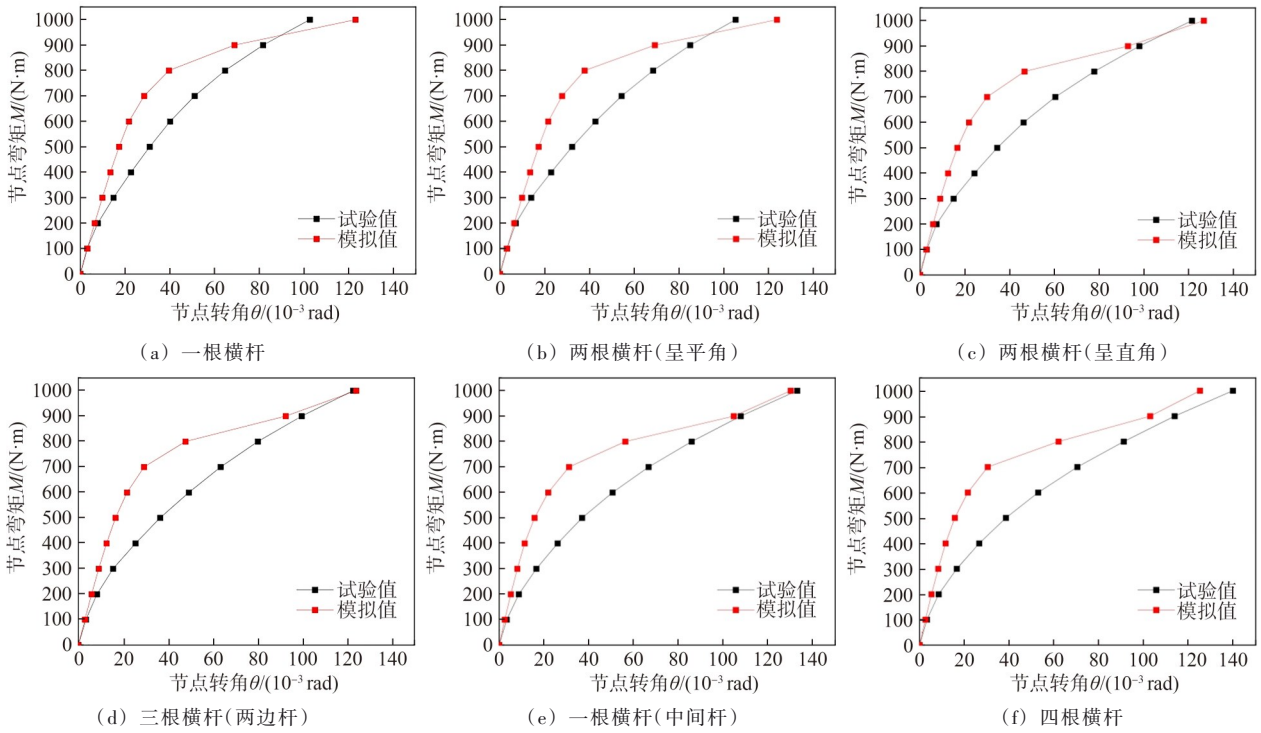


图20 试验及有限元模拟的节点$M-\theta$关系曲线

Fig. 20 $M-\theta$ curves of joints from tests and finite element simulations

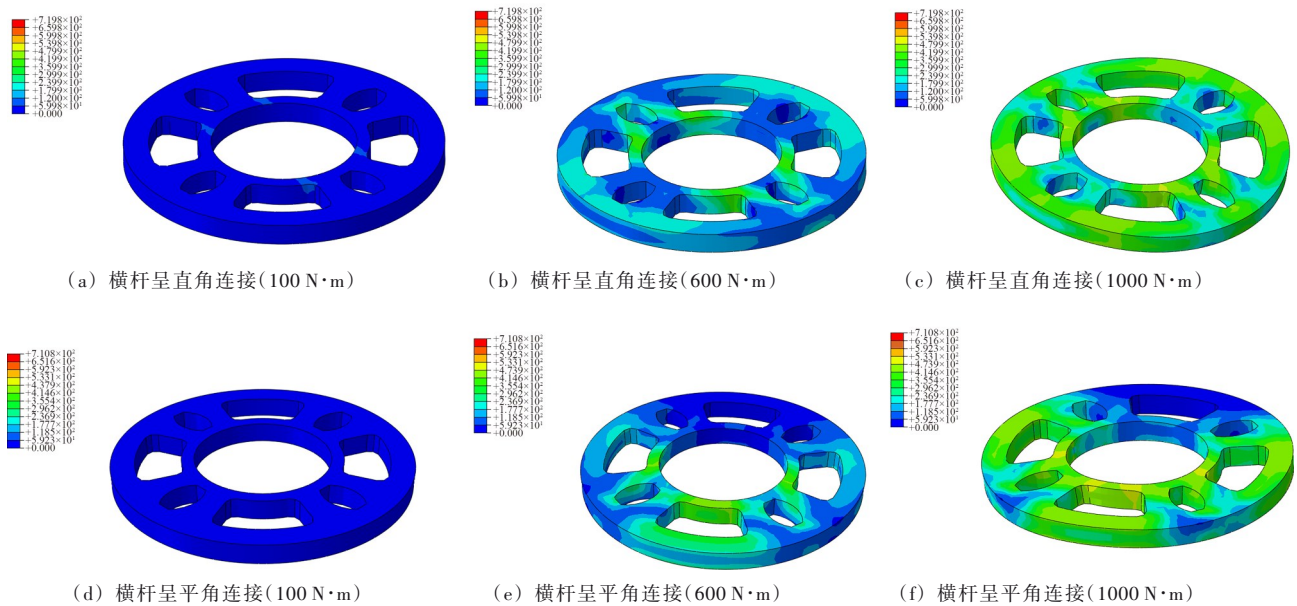


图21 两根横杆连接时盘扣应力云图 MPa

Fig. 21 Stress contour plots of the disc buckle connected to two cross bars

三组：节点构件在连接一根横杆和两根呈平角的横杆时，节点$M-\theta$关系曲线和刚度值变化规律最为接近；节点构件连接两根呈直角的横杆时，节点$M-\theta$关系曲线和刚度值与节点连接三根横杆时两边杆处计算得到的吻合度最高；节点构件连接四根横杆时，其节点$M-\theta$关系曲线和刚度值与节点连接三根横杆时按中间杆计算得出的差距最小。

综合表4节点刚度值和图18~20节点$M-\theta$关系曲线可得：当节点弯矩为0~200 N·m时，半刚性节点刚度值宜取20~30 kN·m/rad；当节点弯矩为200~600 N·m时，半刚性节点刚度值宜取9~11 kN·m/rad；当节点弯矩超600 N·m时，半刚性

节点刚度值宜取 2~6 kN·m/rad。

4.2　节点刚度非线性原因分析

在 ABAQUS 有限元数值模拟中，节点构件两根横杆呈直角和平角连接时，盘扣在 100，600，1000 N·m 弯矩作用下应力云图如图 21 所示。由图可知，节点构件在受到弯矩作用后盘扣应力首先出现在与该横杆相邻的两个斜杆插销孔根部；当盘扣弯矩达到 600 N·m 时，盘扣局部区域的应力值接近屈服应力，两根横杆呈直角连接时盘扣在两根横杆作用位置的中间区域应力重叠现象明显，而两根横杆呈平角连接时应力重叠现象并不明显。当盘扣弯矩达到 1000 N·m 时，盘扣根部与插销插孔处的应力区域已经接近盘扣屈服应力，盘扣、插销、锁头和立杆产生滑移和塑性变形。

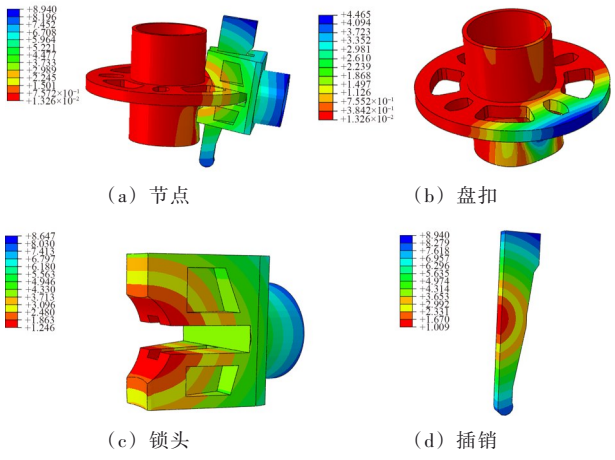
当节点构件弯矩为 1000 N·m 时，试验和有限元数值模拟中盘扣节点塑性变形如图 22 和图 23 所示。由图可知，当盘扣节点作用 1000 N·m 的弯矩时，盘扣、插销、锁头和立杆均发生了一定的位移和塑性变形，锁头上部与立杆表面分离，节点构件中横杆锁头与插销在接触面均有明显的塑性压痕，立杆与锁头下部接触的区域呈现出向内凹陷的塑性变形，节点构件中盘扣与插销接触的位置出现了较大的塑性变形。盘扣节点在荷载作用下有限元模拟的变形与试验中节点构件塑性变形一致，节点构件卸载时的 $M-\theta$ 试验关系曲线近似呈一次函数，节点刚度值保持恒定，卸载时节点构件的刚度值小于盘扣节点的初始刚度值，节点构件在卸载后存在一定的残余应变。因此盘扣节点抗弯刚度非线性的原因是节点处盘扣、插销、锁头和立杆之间发生了一定的塑性变形和相对滑移，故支架施工中要避免节点弯矩过大。



（a）盘扣　（b）插销　（c）立杆　（d）锁头

图 22　节点构件试验时塑性变形

Fig. 22　Plastic deformation diagrams of joint components during testing



（a）节点　（b）盘扣　（c）锁头　（d）插销

图 23　盘扣节点位移云图　mm

Fig. 23　Displacement contour plots of the disk-lock joint

5　结束语

1）对盘扣式钢管支架节点构件进行抗弯刚度试验，将抗弯试验数据用三线性模型和二参数对数模型进行拟合，得出了节点构件连接一根横杆、两根横杆、三根横杆和四根横杆时节点半刚性刚度值的变化规律，且盘扣式支架模板支撑体系中盘扣节点抗弯刚度值非线性关系明显。

2）以试验和有限元数值模拟的方法研究支架节点在连接不同数量横杆时盘扣节点刚度值的变化规律，提出了便于支架工程应用的三阶段节点抗弯刚度取值。当节点弯矩为 0~200 N·m 时，半刚性节点刚度值宜取 20~30 kN·m/rad；当节点弯矩为 200~600 N·m 时，半刚性节点刚度值宜取 9~11 kN·m/rad；当节点弯矩超 600 N·m 时，半刚性节点刚度值宜取 2~6 kN·m/rad，此时盘扣节点应力趋近于屈服应力，工程中应避免节点弯矩超过 600 N·m。

3）通过试验和有限元数值模拟对盘扣节点刚度取值和影响因素进行研究，结果表明盘扣式支架中立杆和横杆的连接属于半刚性连接，节点构件连接不同横杆在不同荷载作用时盘扣根部应力变化不同，盘扣节点抗弯刚度非线性的原因是由节点处盘扣、插销、锁头和立杆之间发生了一定的塑性变形和相对滑移引起的，支架施工中要避免节点弯矩过大。

4）用试验和有限元数值模拟得出的盘扣节点刚度值均小于JGJ 300—2013和JGJ/T 231—2021规定的抗弯刚度20 kN·m/rad和86 kN·m/rad。试验结果偏于安全。为方便起见工程中可以使用三线性模型拟合得到的盘扣节点刚度值。

参 考 文 献

[1] 郭正兴. 模板脚手架技术发展与展望[J]. 施工技术，2018，47(6)：79-83.

[2] 陈安英，郭正兴，杨启龙. 承插型盘销式钢管支架结构稳定性试验与参数分析[J]. 施工技术，2015，44(14)：76-82.

[3] 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.

[4] 闫雁军，陈鲁，张其林. 插盘式脚手架试验研究及受力分析[J]. 施工技术，2013，42(14)：94-97.

[5] 姜旭，张其林，顾明剑，等. 新型插盘式脚手架的试验和数值模型研究[J]. 土木工程学报，2008(7)：55-60.

[6] 朱德春，蔡小华，何竞飞，等. 承插型盘扣式脚手架节点结构改进分析[J]. 建筑安全，2016，31(10)：21-25.

[7] 王晓光，段亚辉，尹汝琨. 盘扣式脚手架节点半刚性试验研究[C]//第五届全国建筑结构技术交流会论文集. 杭州：2015：1098-1101.

[8] 王洲春. 承插型钢管脚手架试验研究[D]. 长沙：湖南大学，2013.

[9] 肖毅. 新型盘式钢管脚手架的应用研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2012.

[10] 钱晓军. 盘扣式及碗扣式钢管支架节点试验及应用技术研究[D]. 南京：东南大学，2016.

[11] 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.

[12] 陈桂香，郭泽群，胡德平，等. 承插型盘扣式钢管支架盘扣节点抗扭刚度影响因素[J]. 科学技术与工程，2020，20(8)：3231-3237.

[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工临时支撑结构技术规范：JGJ 300—2013[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2013.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工承插型盘扣式钢管脚手架安全技术标准：JGJ/T 231—2021[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2021.