

# 盘扣式脚手架节点抗弯性能研究

张东川<sup>1</sup>, 王月川<sup>1</sup>, 纪浩平<sup>2</sup>, 张昌龙<sup>2</sup>, 严仁章<sup>2\*</sup>, 赵中伟<sup>3</sup>

(1. 中交一公局第九工程有限公司, 广州 511300; 2. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074;  
3. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 盘扣式脚手架节点由于具有半刚性特征, 在荷载作用下呈现出明显的几何非线性特征, 对结构稳定性产生不利影响。本文通过节点足尺试验与数值模拟相结合的方法对盘扣式脚手架节点的抗弯性能开展研究。首先, 制作3组相同的足尺试验节点, 测得了节点的抗弯刚度和抗弯极限承载力, 并基于节点的荷载-位移曲线建立了盘扣式脚手架节点的三折线抗弯刚度计算模型; 之后, 利用ABAQUS有限元软件建立了试验节点的精细化有限元模型, 通过模拟结果与试验结果的对比, 验证了模型的准确性, 获取了加载过程中的节点应力分布情况及破坏模式; 最后, 将节点的抗弯刚度引入到脚手架结构整体模型中, 分析了节点抗弯刚度对结构整体稳定性的影响。研究发现, 考虑节点实际抗弯刚度后脚手架整体失稳模式虽无显著变化, 但结构的非线性极限承载力将下降20.84%。

**关键词:** 盘扣式脚手架节点; 半刚性; 抗弯试验; 精细化有限元模型; 整体稳定性; 失稳模式

中图分类号: TU731.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)12-0079-10

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240710001

## Study on Flexural Performance of Disk-Lock Scaffold Joints

ZHANG Dongchuan<sup>1</sup>, WANG Yuechuan<sup>1</sup>, JI Haoping<sup>2</sup>, ZHANG Changlong<sup>2</sup>,  
YAN Renzhang<sup>2\*</sup>, ZHAO Zhongwei<sup>3</sup>

(1. The 9th Engineering Co., Ltd. of China First Highway Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511300, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

\*Corresponding author: rz\_yan@cqjtu.edu.cn

**Abstract:** The semi-rigid properties of disk-lock scaffold joints cause considerable geometric nonlinearity under load, weakening structural stability. This study employs numerical simulation and full-scale test to examine the flexural performance of these joints. First, three identical full-scale specimens were fabricated to measure the joint bending stiffness and ultimate bending capacity. Based on the load-displacement curves, a tri-linear bending stiffness calculation model was developed for the disk-lock joints. Next, a detailed finite element model of the test joints was created using ABAQUS software, and this model was validated against experimental data to determine the stress distribution and failure modes during loading. Finally, the joints' bending stiffness was integrated into an overall scaffold structural model to analyze its impact on overall structural stability. The study reveals that while considering the actual bending stiffness of the joints does not significantly alter the overall buckling mode of the scaffold, it results in a 20.84% reduction in

收稿日期: 2024-07-10

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目 (KJQN202403002)

作者简介:

张东川 (1990—), 男, 学士, 工程师, 主要从事建筑结构施工和管理方面的研究。E-mail: 191987452@qq.com。

王月川 (1985—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事建筑结构施工方面的研究。

通信作者:

严仁章 (1987—), 男, 博士, 教授, 主要从事大跨空间结构和钢-混凝土组合结构方面的研究。E-mail: rz\_yan@cqjtu.edu.cn。

the structural nonlinear ultimate load-bearing capacity.

**Keywords:** disk-lock scaffold joint; semi-rigid; flexural test; refined finite element model; overall stability; buckling mode

盘扣式脚手架因其承载力高、整体性好、地形适应性强等优点得到市场认可,被广泛应用于土木工程中。盘扣式脚手架主要采用如图1所示节点将各个方向的杆件连成整体,其中立杆每隔500 mm便设置一连接圆盘,圆盘上开设4大4小8个孔,用于连接水平横杆和斜杆。横杆和斜杆两端设有连接头,楔形插销下部有突出圆点将其限位在横杆连接头内,这样借助插销可将横杆连接头与立杆上的连接圆盘进行承插连接。图1所示盘扣式节点作为立杆与横杆的连接节点,将承受两个方向的4根横杆传递来的弯矩和竖向剪力,节点受力复杂,尤其是节点在弯矩作用下的力学性能会直接影响结构的整体稳定性。

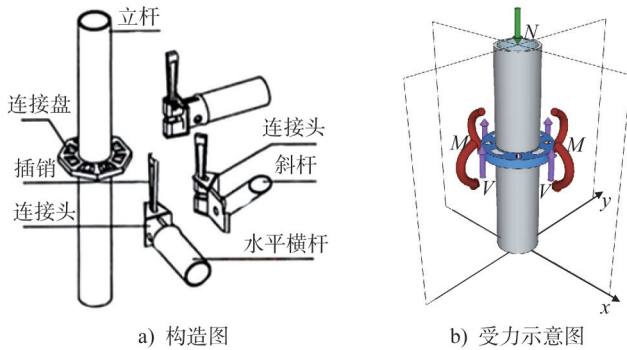


图1 盘扣式节点构造与受力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the construction and stress distribution of disk-buckle joint

国内外学者围绕该类节点的抗弯性能开展了大量研究。PIENKO等<sup>[1]</sup>运用数值模拟技术并考虑材料和接触状态的非线性,计算得到了盘扣式节点的抗弯承载力以及脚手架失稳时节点附近的应力分布情况。刘哲等<sup>[2]</sup>采用ANSYS随机有限元分析法分析了重型承插型盘扣式脚手架节点的抗弯性能,发现连接盘厚度、插销材料本构、插销厚度及插入深度对节点抗弯性能均有不同程度的影响,其中连接盘厚度影响最显著。钱晓军<sup>[3]</sup>对不同规格的盘扣节点进行了抗弯试验,得到了节点的弯矩-转角关系曲线,并提出抗弯刚度的多线性、指数和二参数对数模型。肖明葵等<sup>[4]</sup>对承插型盘扣式模板支撑体系进行了分级加载足尺试验和仿真模拟分析,研究了节点的半刚性特征及刚度取值,认为实际工程中节点转动刚度值应取 $50 \text{ kN}\cdot\text{rad}^{-1}$ ,比规范值大2.5倍,与钱晓军的研究也存在差异。肖红秀等<sup>[5]</sup>利用ABAQUS软件模拟了盘扣式节点的抗弯性能,发现用二参数对数模型拟合的荷载-位移曲线与试验相符,而三线性模型也满足工程精度要

求。张凌博等<sup>[6]</sup>通过数值模拟与试验研究分析了盘扣式节点的转动刚度及稳定承载力,结果表明盘扣式节点顺时针转动和逆时针转动的力矩-转角曲线及刚度变化规律相似。基于此,白万民等<sup>[7]</sup>进一步研究了盘扣式节点在顺、逆时针加载下的力矩-转角曲线,验证了数值模拟结果的准确性,所得曲线更适用于盘扣式钢管脚手架的稳定承载力计算。从上述研究可以看出,目前针对盘扣式脚手架节点抗弯性能的研究较多,但在具体的刚度取值上仍存在较大差异。盘扣式节点由于其装配化的构造,立杆与横杆具有一定的转动能力,表现出显著的半刚性特征<sup>[8]</sup>。因此,在荷载作用下,脚手架结构必然会表现出显著的几何非线性特征,结构整体的稳定承载力也将与节点的实际抗弯刚度存在密切关系。

为此,部分学者也围绕节点刚度对盘扣式脚手架结构整体承载能力的影响展开研究。刘京红等<sup>[9]</sup>通过足尺试验及有限元分析,发现立杆是结构的主要受力构件,而连接节点刚度对体系承载力有较大影响。董金凤等<sup>[10]</sup>基于轮扣式脚手架试验及有限元分析,发现节点抗弯刚度与结构稳定承载力成正比。此外,董金凤<sup>[11]</sup>还通过盘扣式节点试验,分析了节点抗弯刚度、构造参数、搭设形式及竖向斜撑布置形式等因素对高大支撑体系整体稳定性的影响规律,发现步距和节点抗弯刚度对支撑体系整体稳定性的影响最为显著。PENG等<sup>[12-13]</sup>也研究了不同脚手架结构的承载能力和破坏模式,发现节点刚度对脚手架结构承载能力有不同程度的影响。因此,为准确评估盘扣式脚手架的稳定承载力,确保结构使用安全性,有必要基于该类节点的半刚性特征,研究其抗弯性能的非线性行为及具体的极限承载力。本文通过节点足尺试验与数值模拟相结合的方法系统研究了盘扣式节点的抗弯性能,并将其抗弯刚度引入脚手架算例模型中,考察其对结构整体稳定性能的具体影响。

## 1 节点抗弯性能试验

### 1.1 试件设计

选取工程中使用频率较高的脚手架杆件开展节点的抗弯试验,如表1所示。试验过程中为保证结果的可靠性,制作3组完全相同的试件W1、W2、W3。节点处的弯矩通过在横杆上施加竖向集中力 $P$ 来实现,为尽可能减小节点区域的剪力影响,参考文献<sup>[14]</sup>,将加载点设置在距离节点中心500 mm处。为方便加载,立杆长度取为500 mm,即节点上、下端的立杆均长250 mm。试件详细构造如图2所示。

表1 试件规格

Table 1 Specimen specification

类型	外径 $D/mm$	壁厚 $t/mm$	长度 $/mm$	材质
立杆	48.3	3.5	500	Q355
横杆	48.3	2.5	1 000	Q235

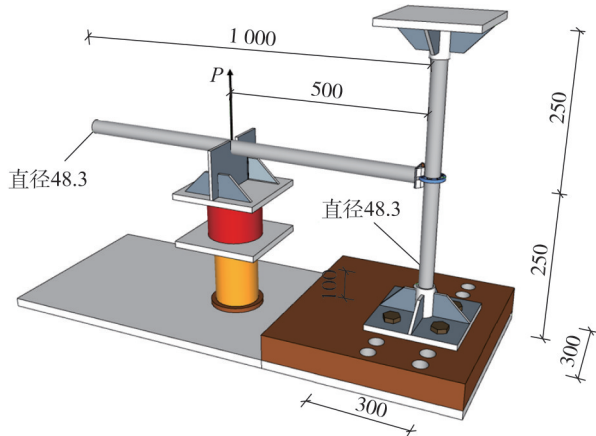


图2 试件构造(单位:mm)

Fig. 2 Construction details of the specimen (unit:mm)

1.2 材性试验

开展节点抗弯性能试验前,需要对所有类型的杆件开展材性试验。首先对试验选用的同一批次横杆和立杆各随机抽取3根杆件,参考文献[15]加工制作出相应的材性试验标准试件,并利用万能试验机对每组试件进行单向拉伸试验,得到各组试件的应力-应变曲线,如图3所示。

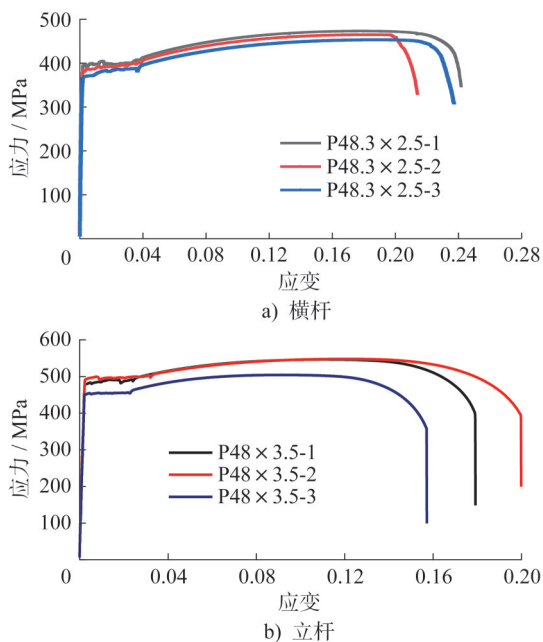


图3 标准材性试件应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of standard material test specimens

由图3得到各组试件的屈服强度 $f_y$ 、极限抗拉强度 $f_u$ 及弹性模量 $E$ 等,如表2所示,最终取各类杆件试验结果的平均值作为该类杆件的材性试验结果。值得说明的是,通过试验发现横杆材料的泊松比 $\nu$ 平均值为0.3,且3组试件的试验值均较为稳定,这也与《金属材料力学性能手册》<sup>[16]</sup>中的建议值相吻合,因此立杆材料未再测试其泊松比,计算时也按《金属材料力学性能手册》建议统一取为0.3。

表2 材性试验结果

Table 2 Results of material property test

试件		$f_u/MPa$	$f_y/MPa$	$E/MPa$	$\nu$	伸长率/%
类型	编号					
横杆 P48.3×2.5 Q235	1	468.8	387.45	$2.09 \times 10^5$	0.29	21.20
	2	467.32	393.83	$2.07 \times 10^5$	0.32	22.85
	3	463.41	382.27	$2.08 \times 10^5$	0.28	19.54
	平均值	466.51	387.85	$2.08 \times 10^5$	0.30	21.20
立杆 P48.3×3.5 Q355	1	545.96	476.83	$2.07 \times 10^5$	—	18.65
	2	547.87	490.92	$2.07 \times 10^5$	—	19.27
	3	504.10	448.73	$2.07 \times 10^5$	—	23.25
	平均值	532.64	472.16	$2.07 \times 10^5$	—	20.50

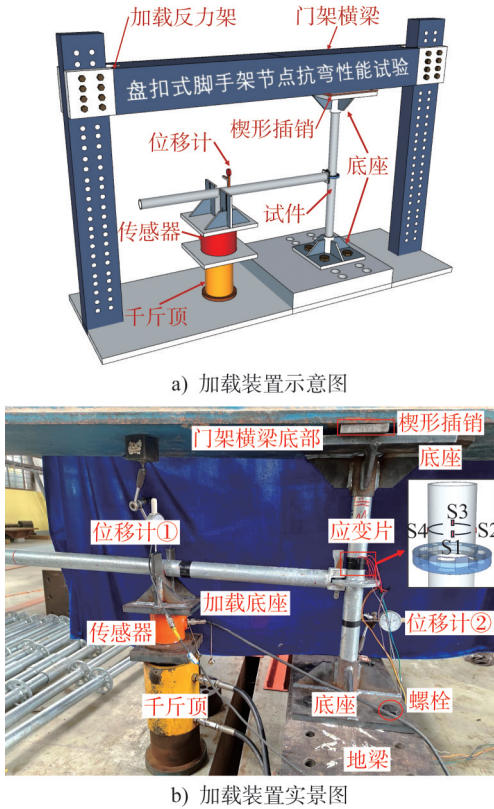
1.3 抗弯试验

1.3.1 试验加载方案

盘扣式节点的抗弯性能试验主要测定节点在弯矩作用下的转角变形情况,结合试验室现有条件制作如图4所示加载装置。立杆的上、下端均插入各自连接底座的套管内,其中套管高100 mm,内径为50 mm,稍大于钢管外径。上、下底座直接放置于加载横梁下方,同时为了保证立杆连同底座能完全卡紧固定于加载横梁下方,以实现刚性约束,实际安装时在上底座与横梁之间的缝隙内卡入楔形垫块,并锤击使其顶紧;下底座通过4颗8.8级高强螺栓与地梁连接,如图4a)所示。参考图1所示盘扣式节点的构造特征,以及前述文献[6-7]中的相关研究结论,可知盘扣式节点在顺时针弯矩和逆时针弯矩作用下的抗弯性能较为接近,仅插销的受力情况相差较大。因此,结合实验室的加载设备与场地条件,为方便加载,对节点采用顺时针加载方式,即对横杆施加竖直向上的集中力来模拟节点承受的弯矩作用。试验设计时,在距离节点中心500 mm处的横杆下方布置专用加载底座,再与传感器和加载千斤顶从上往下串联实现对横杆的竖向加载,加载装置实景图如图4b)所示。

1.3.2 试验测量

为测量节点的转角位移,在横杆加载点上方沿竖直方向布置位移计①,用于测定加载点的竖向位移 $\delta_1$ ;



b) 加载装置实景图

图4 加载装置

Fig. 4 Loading setup

同时在距离盘扣节点中心 100 mm 的立杆上沿水平方向布置位移计②,用于测定立杆在该点的水平位移  $\delta_2$ , 计算模型如图 5 所示。通过  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  以及水平杆本身的弯曲变形  $\delta_w$  即可计算出节点的转角位移  $\delta_\theta$ 。具体计算过程如下:

试验过程中横杆上的集中力  $F$  通过测力传感器直接读取,此时,节点所受弯矩  $M$  可根据式(1)计算。

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

式中:  $l_a$  为加载点到节点中心距离,取为 500 mm。

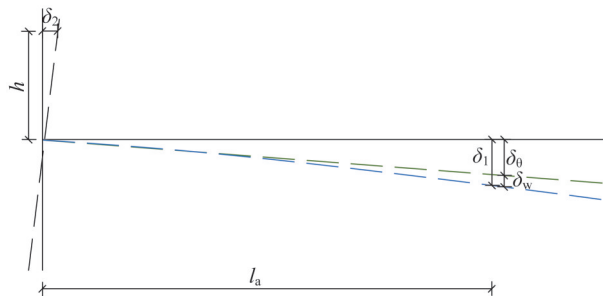


图5 节点受弯过程转角示意图

Fig. 5 Rotation diagram of joint during bending process

如图 5 所示,位移计①测得的  $\delta_1$  由 2 部分构成:节点转角  $\theta$  引起的变形  $\delta_\theta$ ;横杆弯曲引起的变形  $\delta_w$ ,可根据材

料力学基本理论按式(2)计算。

$$\delta_w = \frac{3Fl_a X^2 - FX^3}{6EI} \quad (2)$$

因此,节点转动引起的位移  $\delta_\theta$  为:

$$\delta_\theta = \delta_1 - \delta_w \quad (3)$$

得到  $\delta_\theta$  后,节点的转角位移  $\theta$  可按式(4)计算:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\delta_\theta}{X}\right) = \left(\frac{\delta_1 - \delta_w}{X}\right) \quad (4)$$

由于试验过程中立杆不可避免也会产生转动,因此,节点的相对转角位移应扣除立杆的转角,得到节点相对转角位移  $\theta_n$  为:

$$\theta_n = \theta - \arctan\left(\frac{\delta_3}{h}\right) = \arctan\left(\frac{\delta_1 - \delta_w}{X}\right) - \arctan\left(\frac{\delta_3}{h}\right) \quad (5)$$

式中:  $X$  为横杆位移测点到节点中心距离,取 500 mm;  $E$  为横杆弹性模量,根据材性试验取 2.08 GPa;  $I$  为横杆的惯性矩,计算得到  $I = 1.024 \times 10^5 \text{ mm}^4$ ;  $h$  为立杆位移测点到节点中心距离,取 100 mm。

此外,为获取弯矩作用过程中节点薄弱区域的应变发展情况,在距离盘扣式节点上方 50 mm 处沿立杆环向对称粘贴 4 个应变片,如图 4 所示。测试过程中,压力传感器、位移计以及应变片均与 DH3818Y 静态应变测试仪连接可自动采集数据。

### 1.3.3 试验加载过程与破坏状态

分别对试件 W1、W2、W3 开展抗弯试验研究,各组试件正式加载前均先进行预加载。正式加载时采用液压千斤顶分级加载,每级 0.5 kN,加载后持荷 1 min 待试件变形稳定后,记录荷载、位移后进行下一级加载。重复上述过程,直至盘扣式节点出现较大位移,且荷载不再增加,即认为节点达到破坏状态,停止加载,并记录试件破坏现象。

图 6 为试件 W1 加载至极限状态时的实景图。该试件在加载初期,并未出现明显变形,此时弯矩较小,节点的抗弯刚度较大;随着荷载增加,横杆随着节点变形而发生显著变形,节点的抗弯刚度也在逐渐减小;当荷载达到峰值时,即使节点处弯矩增加不大,横杆的竖向位移也会急剧增大,此时,节点发生破坏,但插销与构件没有发生断裂破坏,如图 6 所示,此时横杆接头下部与立杆的接触部位已发生分离,横杆相对于立杆发生很大转角。

其余 2 组试件的加载过程与 W1 类似,在此不再赘述,图 7 列出了 3 组试件破坏时的节点形态,可以看出节点达到极限状态时,均是插销出现弯曲变形,立杆与横杆接头接触位置发生局部凹陷。

## 2 节点抗弯性能有限元模拟

由于试验条件限制,试验过程中的测点布置数量与

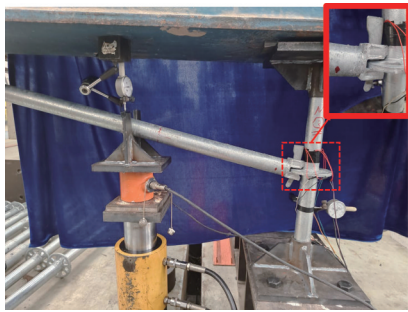
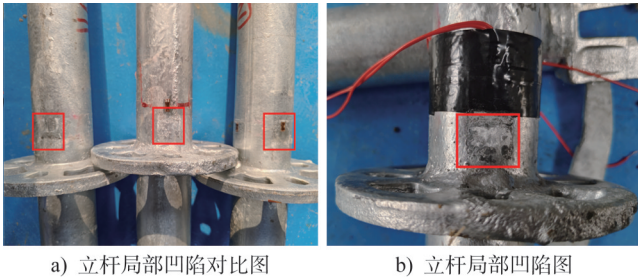


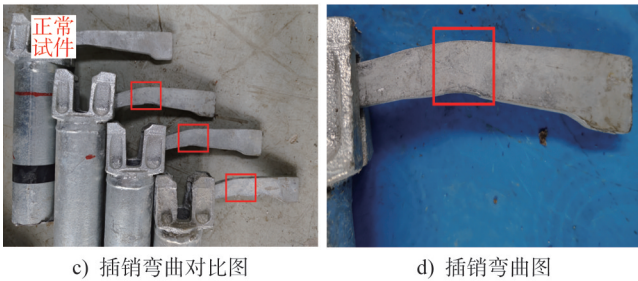
图 6 试件 W1 破坏图

Fig. 6 Failure of specimen W1



a) 立杆局部凹陷对比图

b) 立杆局部凹陷图



c) 插销弯曲对比图

d) 插销弯曲图

图 7 节点抗弯极限状态及各构件破坏图

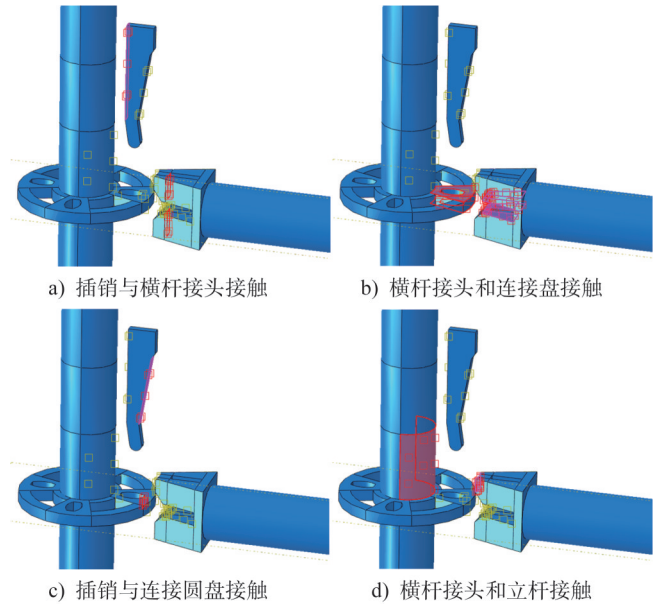
Fig. 7 Bending ultimate state of joints and failure of components

位置均有限,为更全面评估盘扣式脚手架节点的抗弯性能,利用有限元软件建立试件的精细化有限元模型,模拟节点加载全过程。

### 2.1 有限元模型的建立

利用 ABAQUS 有限元软件建立试件的数值模型,横杆、立杆的几何尺寸及材料属性均与试验试件完全相同。为真实模拟节点处横杆、立杆的工作状态,需要对节点区域不同配件之间设置相应的接触边界条件,横杆接头与盘扣之间、横杆接头与立杆之间、插销与横杆接头以及插销与盘扣之间均设置接触对,各接触对之间的切向按库仑原理考虑摩擦滑移,摩擦系数取为 0.3<sup>[17-18]</sup>,法向接触采用硬接触,接触对设置情况如图 8 所示。

施加荷载时,在横杆端部截面的中心位置建立加载控制点 RP,加载点距立杆中心为 500 mm,竖向荷载即通过对 RP 施加竖向位移来实现。为保证计算精度,所有杆



a) 插销与横杆接头接触

b) 横杆接头和连接盘接触

c) 插销与连接圆盘接触

d) 横杆接头和立杆接触

图 8 有限元模型接触对设置

Fig. 8 The setting of contact pairs in finite element model

件及节点均采用 C3D8R 实体单元模拟,横杆、立杆、插销及盘扣均按六面体网格划分,横杆接头与横杆交界处由于形状不规则划分为四面体网格。施加边界条件时,将立杆的上、下端分别固接,建立的有限元模型如图 9 所示。

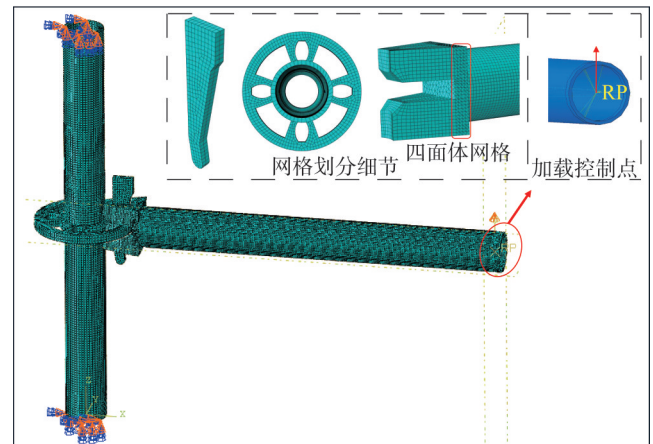


图 9 节点有限元模型

Fig. 9 Finite element model of joint

### 2.2 有限元计算结果与验证

有限元模拟可较为全面地获取节点在弯矩作用下的力学性能。根据试验结果,提取有限元模型在关键区域的应变以及节点转角位移,并与试验结果进行对比分析,以评估和验证有限元计算结果的准确性。

#### 2.2.1 应变计算结果

提取各组试件的 4 个应变片测量结果,绘制应变随

加载过程的变化曲线。由于试验之初,是将试件W1的应变片布置在距离盘扣式节点30 mm位置处,试验过程中由于应变片距离水平接头与立杆接触位置太近,受接头挤压应变片脱落,未能获取其有效数据;后期对试验测量方案进行了调整,将试件W2、W3的应变片布置于距离盘扣式节点50 mm处,测量获取了试件W2、W3的应变-荷载曲线,如图10所示。

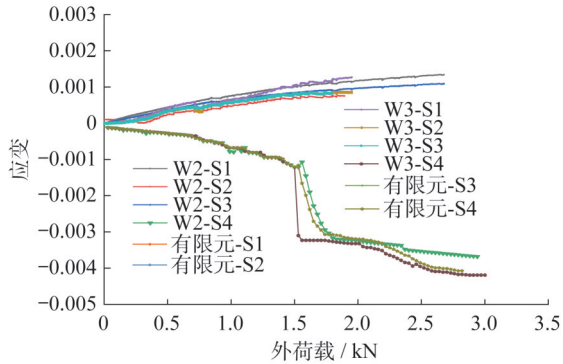


图10 试件W2、W3加载过程应变变化曲线

Fig. 10 Strain-load curves of specimens W2 and W3

由图10可以看出,在加载初期,随着荷载增加,各组应变均缓慢增加,其中应变片S1、S2与S3所测应变几乎相等,所在位置均处于受拉状态,应变片S4所在位置因盘扣受力产生挤压而一直处于受压状态。当外荷载达到1.6 kN时,盘扣开始出现塑性变形,水平接头与立杆产生接触,此时应变片S4所测应变由于立杆与连接头接触部位发生较大挤压而大幅增加,应变片S1、S2与S3所在位置因立杆与连接头接触部位挤压牵拉而始终处于受拉状态,应变值不断增加,但由于挤压影响范围有限,增长幅度较小。由图10可以看出,有限元计算得到的应变-荷载曲线变化趋势与试验试件的应变-荷载曲线变化趋势基本一致。

2.2.2 弯矩-转角位移曲线计算结果

提取有限元模型中的转角变形数据,并与第1节实测的3组试件的试验数据一起绘制盘扣式脚手架节点的弯矩-转角位移曲线,如图11所示。

由图11可以看出,有限元计算得到的弯矩-转角位移曲线变化趋势与3组试验试件的弯矩-转角位移曲线变化趋势基本一致,均呈现出明显的非线性特征。节点在弯矩作用下的工作过程可大致分为3个阶段:第1阶段为弹性阶段,弯矩与转角呈线性相关;第2阶段为弹塑性阶段,当弯矩达到0.8 kN·m时,节点变形速率逐渐超过弯矩增大速率;第3阶段为塑性阶段,当弯矩达到1.2 kN·m时,在相同弯矩增量下,节点位移会进一步增加,曲线慢慢向水平轴靠近,且此阶段随着结构变形还将发出响声,直至节点发生破坏。最终,3组试件

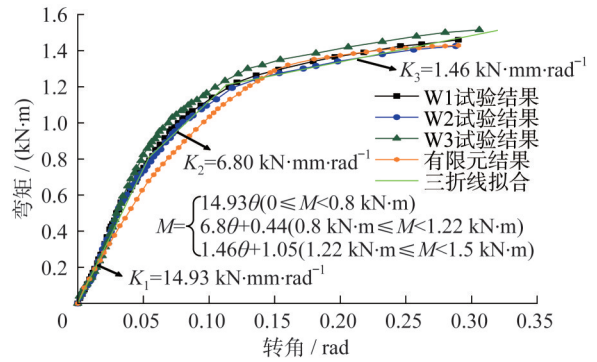


图11 节点抗弯有限元分析及试验弯矩-转角曲线

Fig. 11 Comparison of bending moment-rotation curves of joints between FEA and test

的抗弯极限承载力分别为1.46 kN·m、1.43 kN·m和1.52 kN·m,基本一致。

根据图11所示的三阶段变形规律,采用分段线性函数对节点刚度平均值进行拟合,建立了盘扣式节点的抗弯刚度三折线模型。由图11可知,当弯矩小于0.8 kN·m时,节点初始抗弯刚度为14.93 kN·m·rad<sup>-1</sup>;当弯矩大于0.8 kN·m而小于1.2 kN·m时,抗弯刚度为6.80 kN·m·rad<sup>-1</sup>;当弯矩大于1.2 kN·m时,抗弯刚度为1.46 kN·m·rad<sup>-1</sup>。

2.2.3 破坏模式

提取节点破坏时的 von Mises 等效应力云图,如图12所示,最大应力出现在与水平接头接触的立杆区域,最大值达到487.5 MPa。在水平杆传来的弯矩作用下,水平杆产生较大竖向刚体位移并带动连接头发生绕盘扣的转动变形,连接头发生较大转动后与立杆表面产生接触,随着荷载的进一步增加,立杆与连接头接触部位发生较大塑性变形,产生局部凹陷,使得节点发生破坏。此外,连接头发生转动时与立杆盘扣之间存在间隙,使得水平杆传递的力均由插销传递,随着荷载的增加,插销与盘扣接触位置的应力明显增大,导致插销发生弯曲变形。

由图12还可以看出弯矩作用下节点受力最不利的区域为连接头和立杆接触区域与插销和盘扣连接区域,为此分别提取这两个区域的破坏形态图,并与试验结果进行对比,如图13所示。可以看出,有限元模拟结果与试验结果完全吻合,弯矩作用下的节点破坏均是立杆表面由于横杆连接头的挤压而出现凹陷变形;同时,插销与盘扣接触位置发生较大的弯曲塑性变形。

3 节点抗弯刚度对盘扣式脚手架整体稳定性的影响

3.1 有限元模型

为考查节点抗弯刚度对脚手架结构整体稳定性的影

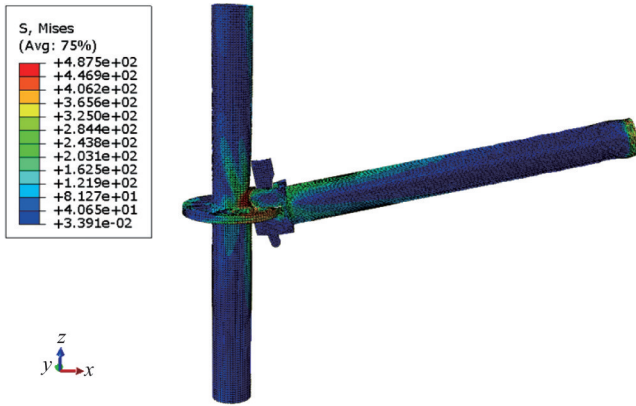
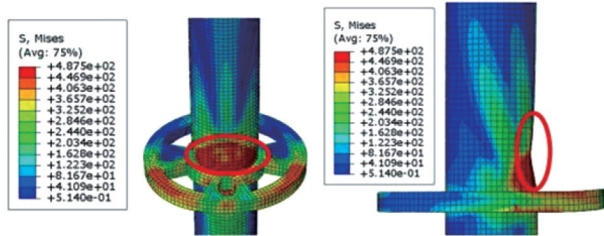
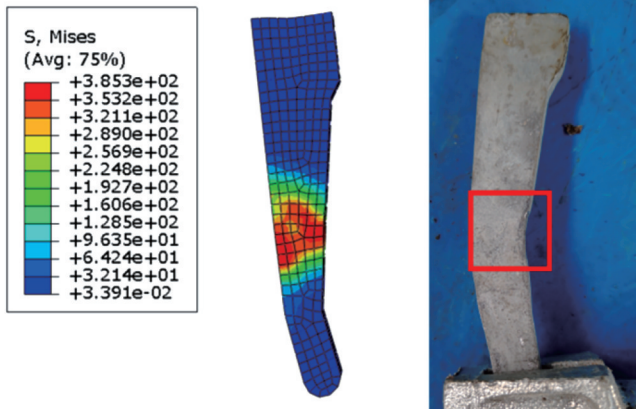


图 12 节点破坏时 von Mises 等效应力云图  
(单位:MPa)

Fig. 12 Contour of von Mises equivalent stress during joint failure (unit:MPa)



a) 立杆凹陷对比图



b) 插销弯曲对比图

图 13 破坏模式(单位:MPa)

Fig. 13 Failure modes (unit:MPa)

响,利用 ABAQUS 有限元软件建立一  $3 \times 3 \times 3$  (步数  $\times$  横向跨数  $\times$  纵向跨数) 盘扣式脚手架模型,开展结构的稳

定承载力分析,如图 14 所示。假设脚手架纵、横向跨度分别为  $l_x=1.5\text{ m}$ 、 $l_y=0.9\text{ m}$ ,步距  $l_z=1.5\text{ m}$ 。由于选取的脚手架算例规模较小,且未考虑水平荷载,结构布置时未考虑设置连墙件。单位施工活荷载作用在脚手架顶层,即中间区域纵、横向水平杆上的活荷载  $q_1$  取为  $1.0\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ ,边缘横杆上的活荷载  $q_2$  取为  $0.5\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 。约束立杆底端节点的所有线位移。各类杆件的截面尺寸和材料属性分别按表 1、表 2 进行设置。所有杆件均采用 B31 两节点空间线性梁单元模拟,各类杆件之间的连接节点通过定义 Spring2 弹簧单元的非线性刚度来模拟竖向抗剪刚度和抗弯刚度。

$$N = \begin{cases} 75.6\delta & (0 \leq N < 13\text{ kN}) \\ 23.3\delta + 9 & (13\text{ kN} \leq N < 19\text{ kN}) \\ 5.9\delta + 16.5 & (19\text{ kN} \leq N < 22\text{ kN}) \end{cases} \quad (6)$$

其中节点的抗剪刚度参考文献[19],按式(6)进行取值。节点抗弯刚度考虑两种情况并据此建立两组模型:① 对照组模型,参考规范《建筑施工临时支撑结构技术规范》(JGJ 300—2013)<sup>[8]</sup>取  $k_{w,x}=k_{w,y}=20\text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{rad}^{-1}$ ;② 试验组模型,按本文试验结果,参照图 11 中的三折线模型进行取值。

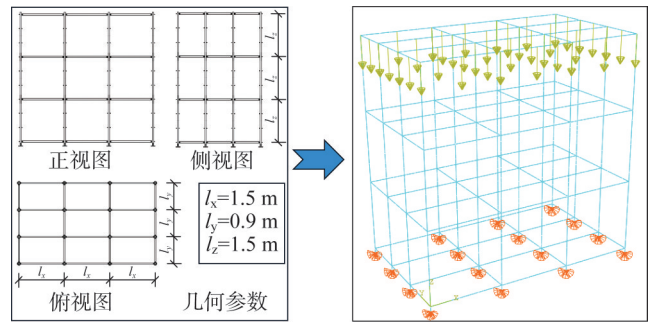


图 14  $3 \times 3 \times 3$  脚手架结构示意图

Fig. 14 Schematic diagram of  $3 \times 3 \times 3$  scaffold structure

节点刚度的模拟方法如下:如图 15 所示,在  $x$  向、 $y$  向横杆与立杆交汇处建立 3 组节点: $N_{x,i}$ 、 $N_{x,j}$  节点用以建立  $x$  向横杆, $N_{y,i}$ 、 $N_{y,j}$  节点用以建立  $y$  向横杆, $N_{z,i}$  节点用以建立立杆。首先,将同一位置处的节点  $N_{x,j}$ 、 $N_{x,i+1}$ 、 $N_{y,j}$ 、 $N_{y,i+1}$  和  $N_{z,i}$  的 2 个方向的线位移  $U_x$ 、 $U_y$  进行耦合以模拟盘扣节点对所有杆件的线位移约束;然后,将节点  $N_{x,j}$ 、 $N_{x,i+1}$  和  $N_{z,i}$  绕  $x$  轴的扭转自由度  $\text{Rot}_x$  耦合,将节点  $N_{y,j}$ 、 $N_{y,i+1}$  和  $N_{z,i}$  绕  $y$  轴的扭转自由度  $\text{Rot}_y$  耦合;最后,在节点  $N_{z,i}$  和  $N_{x,j}$  之间,节点  $N_{z,i}$  和  $N_{x,i+1}$  之间分别建立 Spring2 弹簧单元模拟  $x$  向横杆与立杆间的  $z$  向抗剪刚度和绕  $y$  轴转动的抗弯刚度;在节点  $N_{z,i}$  和  $N_{y,j}$  之间,节点  $N_{z,i}$  和  $N_{y,i+1}$  之间也分别建立 Spring2 弹簧单元来模拟  $y$  向横杆与立杆间的  $z$  向抗剪刚度和绕  $x$  轴转动的抗弯刚度。

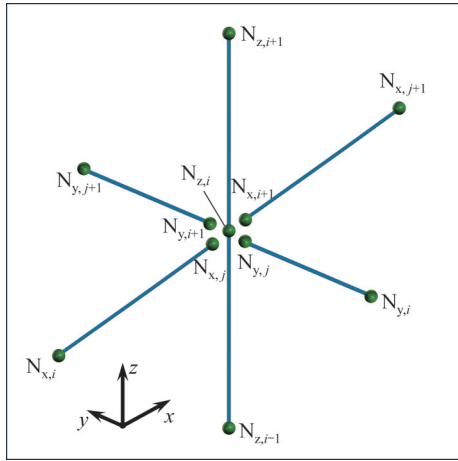


图15 节点布置示意图

Fig. 15 Schematic diagram of joint layout

### 3.2 稳定性计算结果

#### 3.2.1 特征值屈曲分析

分别对对照组模型和试验组模型开展特征值屈曲分析,提取2组模型的第1阶屈曲模态,如图16所示。对照模型与试验模型的第1阶屈曲特征值分别为12.802和10.194,对应的中间区域横杆上的屈曲荷载为12.80 kN·m<sup>-1</sup>和10.19 kN·m<sup>-1</sup>,试验模型相比对照模型,其线弹性屈曲特征值降低了20.37%。此外,由图16还可以看出,两组模型的第1阶屈曲模态均为结构发生整体侧移,可见节点刚度对其失稳模式无显著影响,主要是降低了结构的稳定承载力。

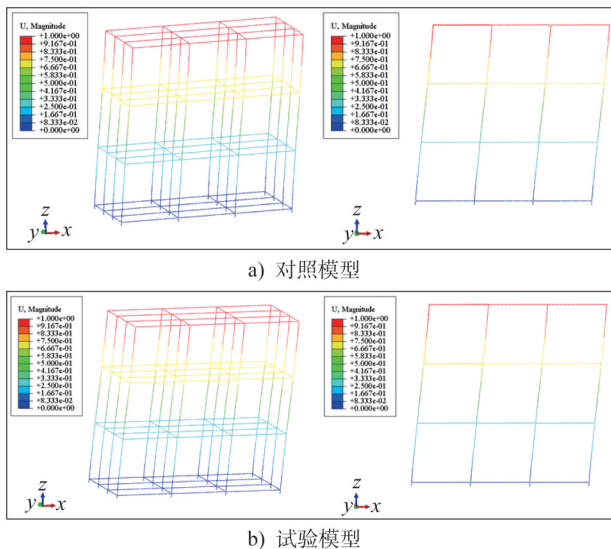


图16 第一阶屈曲模态

Fig. 16 First buckling mode

#### 3.2.2 非线性极限承载力分析

脚手架作为一种临时结构,搭设过程不可避免会产

生各种误差缺陷,又由于脚手架刚度较小,各种误差缺陷会增加结构内部的二阶效应,进一步降低结构的极限承载力。为此,在特征值屈曲分析基础上,采用一致缺陷模态法对脚手架施加最大缺陷值为H/100的初始缺陷(H为脚手架高度),考虑材料和几何双重非线性,对2组模型分别开展极限承载力分析。图17为两组模型x方向的荷载-位移曲线,由图可以看出,对照模型达到极限承载力时中间区域横杆上的荷载为11.71 kN·m<sup>-1</sup>,而按节点实际抗弯刚度计算的试验模型中间区域横杆上的荷载为9.27 kN·m<sup>-1</sup>,相比于对照模型降低了20.84%,相较于线弹性屈曲值降低幅度更大。此外,与线弹性屈曲特征值相比,对照模型的稳定承载力降低了8.53%,试验模型的稳定承载力降低了9.06%,仍然是试验模型降低幅度更大。可见,节点抗弯刚度降低对结构的稳定承载力有不利影响。

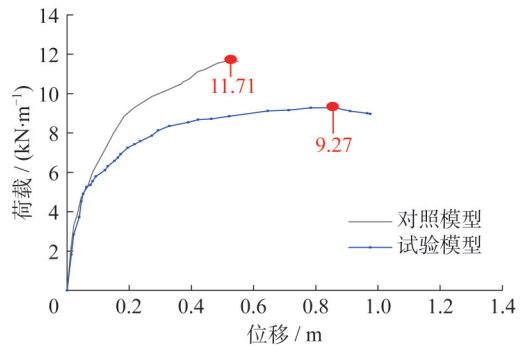


图17 荷载-位移曲线

Fig. 17 Load-displacement curves

## 4 结论

本文采用节点足尺试验与数值模拟相结合的方法对盘扣式节点的抗弯性能进行了研究,得到的主要结论如下:

- (1) 弯矩作用下盘扣式脚手架节点的抗弯刚度呈现出明显的非线性特征,其受力过程可分为三个阶段,并可采用三折线模型对三个阶段的抗弯刚度进行拟合。
- (2) 节点在弯矩作用下的破坏模式表现为立杆与连接头接触部位发生较大塑性变形,产生局部凹陷,使得节点发生破坏。此外,插销与盘扣接触位置的应力较大,插销发生明显弯曲变形。
- (3) 考虑节点实际抗弯刚度后脚手架整体失稳模式虽无显著变化,但结构的非线性极限承载力将下降20.84%。

## 参考文献:

[1] PIENKO M, BLAZIK-BOROWA E. Numerical analysis of load-bearing capacity of modular scaffolding nodes [J].

- Engineering Structures, 2013, 48: 1-9. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.08.028.
- [2] 刘哲,刘战伟,张兆龙,等.重型承插型盘扣式钢管脚手架连接节点抗弯性能研究[J].施工技术(中英文),2024,53(2):110-116.DOI:10.7672/sjgs2024020110.
- LIU Zhe, LIU Zhanwei, ZHANG Zhaolong, et al. Bending performance of heavy-duty socket-type disk lock steel tubular scaffold connection joints[J].Construction Technology, 2024, 53(2):110-116.DOI:10.7672/sjgs2024020110.(in Chinese)
- [3] 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.
- QIAN Xiaojun. Experimental research and technical application of joint mechanical behavior of disk lock and cuplok steel tubular falsework [D]. Nanjing: Southeast University, 2016. (in Chinese)
- [4] 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.
- 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.(in Chinese)
- [5] 肖洪秀.盘扣式钢管支架节点刚度及支架稳定性研究[D].昆明:昆明理工大学,2022.
- XIAO Hongxiu. Research on joint stiffness and support stability of buckled steel tube supports [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.(in Chinese)
- [6] 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.tbit1001-0645.2022.184.
- 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.tbit1001-0645.2022.184.(in Chinese)
- [7] 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)
- [8] 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.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Temporary Support Structures in Construction: JGJ 300—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.(in Chinese)
- [9] 刘京红,李文坡,张凌博,等.承插型盘扣式钢管支撑脚手架试验及有限元分析[J].北京理工大学学报,2023,43(5):478-484.DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2022.133.
- LIU Jinghong, LI Wenpo, ZHANG Lingbo, et al. Experiment and finite element analysis for disk lock steel tubular scaffold [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(5): 478-484. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.133.(in Chinese)
- [10] 董金凤,刘海卿,雷明,等.轮扣式支模架结构整体稳定性分析[J].中国安全科学学报,2022,32(7):85-92.DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2022.07.1917.
- DONG Jinfeng, LIU Haiqing, LEI Ming, et al. Overall structural stability analysis on wheel coupler formwork support [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(7): 85-92. DOI: 10.16265/j. cnki. issn1003-3033.2022.07.1917. (in Chinese)
- [11] 董金凤.考虑节点半刚性盘扣式支模架稳定承载力理论与试验研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2022.
- DONG Jinfeng. Theoretical and experimental study on stability bearing capacity of disc-buckle type formwork support considering semi-rigid joints [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.(in Chinese)
- [12] PENG J L, WANG P L, CHAN S L, et al. Experimental study on load-bearing capacities of frame-type scaffolds used in precast construction [J]. International Journal of Steel Structures, 2020, 20(2): 400-414. DOI: 10.1007/s13296-019-00292-6.
- [13] PENG J L, WU C W, CHAN S L, et al. Experimental and numerical studies of practical system scaffolds [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 91: 64-75. DOI: 10.1016/j.jcsr.2013.07.028.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.承插型盘扣式钢管支架构件:JG/T 503—2016[S].北京:中国标准出版社,2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Disk Lock Steel Tubular Scaffold Components: JG/T 503—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.(in Chinese)
- [15] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.金属材料拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.(in Chinese)
- [16] 刘鸣放,刘胜新.金属材料力学性能手册[M].北京:机械工业出版社,2011.
- LIU Mingfang, LIU Shengxin. Handbook of mechanical properties of metal materials [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.(in Chinese)
- [17] 张国发.弦支穹顶结构施工控制理论分析与试验研究[D].杭州:浙江大学,2009.
- ZHANG Guofa. Theoretical and experimental research for the construction control of suspen-dome structures [D]. Hangzhou:

- Zhejiang University, 2009.(in Chinese)
- [18] 张国发,董石麟,卓新,等.弦支穹顶结构施工滑移索研究[J].浙江大学学报(工学版),2008,42(6):1051-1057.DOI:10.3785/j.issn.1008-973X.2008.06.030.
- ZHANG Guofa, DONG Shilin, ZHUO Xin, et al. Research on sliding cable in construction of suspend-dome structures [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(6): 1051-1057. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2008.06.030.(in Chinese)
- [19] 张昌龙.盘扣式脚手架节点刚度及立杆稳定性试验研究[D].重庆:重庆交通大学,2024.
- ZHANG Changlong. Experimental study on node stiffness and upright bar stability of disk-buckled scaffolding[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.(in Chinese)