

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.S2.006

# 碗扣式模板支撑体系节点半刚性研究

李 闯

(辽宁工程技术大学 建筑工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:**碗扣式模板支撑体系中上碗扣的拧紧程度对节点初始刚度有较大影响,而节点初始刚度大小又决定架体稳定承载力的大小。使用 MATLAB 应用程序对两者之间进行二阶及三阶数值拟合,发现三阶拟合结果的精确度要高于二阶拟合结果,并给出三阶拟合表达式。应用 ANSYS 有限元软件建立与实体相对应的模型,模拟节点在铰接、刚接以及不同初始刚度情况下支撑体系稳定承载力的变化情况,并将模拟结果与实际架体稳定承载力进行对比。发现节点为铰接和刚接连接状态时的模拟结果与实际架体相差较大。当节点拧紧力矩在 35 N·m~50 N·m(节点初始刚度在 39.25 kN/rad~54.07 kN/rad)之间的节点半刚性模型模拟结果与实际架体承载力较为接近。

**关键词:** MATLAB 拟合;碗扣式节点;承载力;半刚性节点

**中图分类号:** TU755.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2013)S2-0024-04

## Analysis on the Cuplock Template Support System with Semi-Rigid Connection

Li Chuang

(School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning Project Technology University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

**Abstract:** The Cuplock Template supports system joint initial rigidity and bowl buckle tightening torque was closely linked, with MATLAB applications for the two order and three order numerical fitting between them, found that three order fitting accuracy was higher than two order fitting results. Using ANSYS finite element software to establish the corresponding with the entity model, the changes in simulated nodes hinged, rigid and different initial stiffness condition for supporting system, and the simulation results were compared with the actual bearing capacity of the frame body stability. Find node is hinged and rigid connection simulation results state and actual frame difference. When the simulation results between node tightening torque of the 35N·m~50N·m and the actual time the frame carrying capacity is close, the node for the semi-rigid connection state. In order to show that the semi-rigid joint model can simulate accurately with the actual capacity of the Cuplock Template supports system.

**Key words:** MATLAB fitting; bowl-button-type connection; bearing capacity; semi-rigid connection

随着社会的进步,建筑行业迅速发展,大型建筑数量与日俱增。如大型的博物馆、影剧院等。这些建筑以其跨度较大、建筑内部高度高、荷载较大等共同特点使施工人员在施工过程中必须严谨科学的建立高大模板支撑体系,以确保施工安全有序的进行。碗扣式模板支撑体系以其施工方便、承载能力高被广大施工人员所接受。应用有限元软件建立正确的模板支撑体系模型计算架体的稳定承载力对于指导施工具有重要作用。

在国外,Weesner 等<sup>[1]</sup>曾对 4 种不同形式的 5 m 高承重脚手架进行了整架极限承载力试验研究,应用有限元软件 ANSYS 分析脚手架的几何非线性和特征屈曲,认为几何非线性分析得到的极限承载力数值低于特征值屈曲荷载,但与试验数值相近。Peng 等<sup>[2]</sup>通过数值分析的方法得到各种荷载形式下支撑的承载能力。在中国,刘宗仁等<sup>[3]</sup>认为扣件式钢管脚手架水平杆件与竖向杆件的连接节点属于半刚性节点,试验表明,扣件的拧紧程度对整体稳定承载力有较大影

响。徐崇宝等<sup>[4]</sup>等对刚性和半刚性的扣件连接方式的双排扣件式钢管脚手架的整体稳定性做过理论分析,发现用刚性连接计算的分析结果明显高于临界荷载的试验值,而按半刚性连接分析的理论结果与试验值相比较为接近。

本文应用有限元软件 ANSYS 建立与实际架体<sup>[5]</sup>相对应的模型,将节点在铰接、刚接以及不同初始刚度情况下的模拟结果与实际架体承载力进行分析对比,发现当节点拧紧力矩在 35~50 N·m(即节点初始刚度在 39.25~54.07 kN/rad)之间的节点半刚性模型模拟结果与实际架体承载力较为接近。

### 1 不同拧紧力矩数值与初始刚度的 MATLAB 拟合

在碗扣式脚手架中,横杆与立杆的固定方式是通过立杆上的上碗扣拧紧后将横杆端头固定在立杆的下碗扣中。上碗扣的拧紧程度对节点的刚性影响很大。浙江大学结构工

收稿日期:2013-09-30

作者简介:李闯(1986-),男,硕士生,主要从事高大模板支撑体系仿真分析及优化研究,(E-mail)lichuang4567@126.com。

程研究所鲁征<sup>[6]</sup>对脚手架扣件进行了抗扭试验。该试验考虑了扣件拧紧力矩分别为 20、30、40、50、60 N·m 5 种情况下节点的形状系数和初始刚度数值,见表 1。

表 1 不同扣件螺栓拧紧力矩下的形状系数和初始刚度

$T/(N \cdot m)$	20	30	40	50	60
$n$	1.166	0.8951	0.7447	0.6877	0.6692
$R/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$	16.84	31.65	46.85	54.07	71.27

由于表 1 中只列出了拧紧力矩为 20、30、40、50、60 N·m 5 种情况,连续性不强,而形状系数和初始刚度与拧紧力矩为非线性关系,因此在不同拧紧力矩数值下无法进行线性插值求得形状系数和初始刚度。应用 MATLAB 软件对拧紧力矩与初始刚度进行二阶、三阶拟合。

二阶拟合表达式为: $R_2 = P_1 T^2 + P_2 T + P_3$

三阶拟合表达式为: $R_3 = Q_1 T^3 + Q_2 T^2 + Q_3 T + Q_4$

其中: $P_1 = -0.002 3$   $P_2 = 1.495 7$   $P_3 = -11.576 0$

$Q_1 = 0.000 8$   $Q_2 = -0.098 2$   $Q_3 = 5.059 9$

$Q_4 = -51.854 0$

从而可得不同扣件螺栓拧紧力矩下 T-R 的二阶、三阶拟合表达式如下:

$$R_2 = -0.002 3T^2 + 1.495 7T - 11.576 0 \quad (1)$$

$$R_3 = 0.000 8T^3 - 0.098 2T^2 + 5.059 9T - 51.854 0 \quad (2)$$

表 2 不同扣件螺栓拧紧力矩下的初始刚度插值结果

$T/(N \cdot m)$	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$R/(kN \cdot m \cdot rad^{-1})$	16.84	25.77	31.65	39.25	46.85	49.89	54.07	62.49	71.27

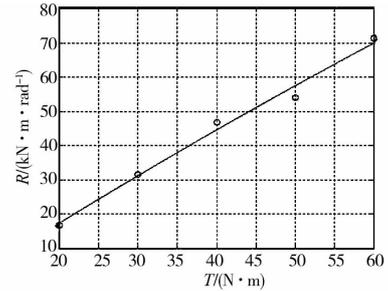
## 2 不同节点初始刚度情况下数值模拟

### 2.1 不同节点初始刚度情况下模板支架承载力分析

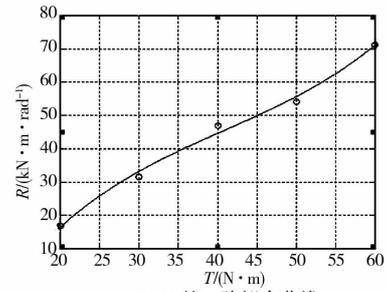
在高支模体系承载力的计算过程中,节点的刚性会对计算结果起着显著影响。在当前的计算模型中,节点的连接情况有铰接连接、刚接连接以及半刚性连接。铰接连接虽然计算简单,但过于保守,没有充分考虑上碗扣对横杆的拧紧固定作用;而刚接连接夸大了节点的刚性,忽略了材料的初始缺陷、上碗扣拧紧程度不一致以及在施工过程中上碗扣松动对节点刚度的虚弱的影响,这两种假设均与实际情况不符。下面通过有限元软件 ANSYS 对节点在铰接、刚接、以及不同初始刚度下进行模板支架承载力模拟并与实际情况对比,从而得出架体中节点的刚性程度。

### 2.2 模型假设

1)模板支架立杆底部与地面为铰接



(a) T-R的二阶拟合曲线



(b) T-R的三阶拟合曲线

图 1 不同扣件螺栓拧紧力矩下 T-R 拟合曲线

观察图 1.1 可知,T-R 关系的三阶拟合曲线误差较小,精确度较高。因此应用 T-R 关系的三阶拟合表达式  $R_3 = 0.000 8T^3 - 0.098 2T^2 + 5.059 9T - 51.854 0$  进行初始刚度插值,得到的结果见表 2。

2)在实际情况中模板支撑体系会跟周围结构进行固定,因此架体外立面角部立杆假设为铰接。

3)立杆之间是通过套管承插接头连接,因此假设为刚接。

4)对于节点不同的初始刚度,通过在横杆两端假设弹簧单元来模拟横杆与立杆节点的半刚性状态。

5)立杆为轴心受压,架体失稳时的轴压值为架体的稳定承载力。

6)忽略地震荷载、水平荷载和风荷载的影响。

### 2.3 有限元建模及参数选取

为了将有限元软件模拟结果与实际模型承载力进行对比,有限元建模时参照文献[5]中工况 5~8 实体模型建立 4 跨×4 跨×6 步。模型中的架体搭设参数、钢管截面特性以及钢管材料参数分别见表 3、表 4、表 5。

表 3 架体搭设参数

模型	步距	纵距	横距	剪刀撑	扫地杆	天杆高度
1	1.2×6	1.2	1.2	竖向	0.2	0.6
2	1.2×6	1.2	1.2	无	0.35	0.45
3	1.8×4	1.2	1.2	竖向	0.35	0.45
4	1.2×6	1.2	1.2	竖向	0.35	0.45

表 4 钢管截面特性

kg, m

外径 $d$	壁厚 $t$	截面积 $A$	惯性矩 $I$	截面模量 $W$	回转半径 $i$	密度
0.048	0.003 5	$4.89 \times 10^{-4}$	$1.22 \times 10^{-7}$	$5.08 \times 10^{-6}$	$1.58 \times 10^{-2}$	7 840

表 5 钢管材料参数

弹性模量 $E$ /Pa	泊松比 $\mu$	屈服强度 $f$ /Pa
$2.06 \times 10^{11}$	0.3	$2.05 \times 10^8$

应用通用有限元软件 ANSYS 建立模型,模型中立杆与横杆单元采用 PIPE16 管单元进行模拟,其特性参数见表 6。模型中采用 COMBIN39 单元来模拟横杆两端的转动弹簧,进而实现节点的半刚性。模型中采用 COMBIN14 来模拟剪刀撑,剪刀撑与立杆的连接为铰接。以模型 2 为例有限元模型图见图 2。

表 6 PIPE16 管单元特性

单元名称	简称	自由度	节点	性质
PIPE16	3D 弹性直管	6	2	拉压、弯曲及扭转的单轴单元

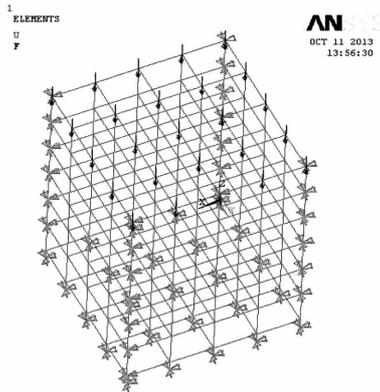


图 2 模型 2 有限元模型

## 2.4 不同节点刚度情况下架体承载力的变化情况

### 1) 有限元模拟结果

对不同节点刚度的高支撑体系进行线性屈曲分析,得到立杆失稳时架体承受的荷载为稳定承载力。模拟结果见表 7。

表 7 不同节点拧紧力矩下架体的稳定承载力

节点拧紧力矩/ ( $N \cdot m^{-1}$ )	模型 1/ kN	模型 2/ kN	模型 3/ kN	模型 4/ kN
铰接	21.5	10.7	14.6	21.6
20	23.4	11.6	15.3	22.1
25	24.9	15.3	17.5	26.3
30	32.2	23.2	24.3	30.8
35	38.3	29.6	30.2	37.4
40	40.2	33.6	33.3	40.3
45	42.9	36.8	36.7	44.1
50	44.6	37.6	38.9	46.3
55	52.3	45.7	44.6	55.1
60	59.8	50.1	48.3	64.3
刚接	66.7	52.3	51.2	69.8

文献[5]中实体模型工况 5~工况 8 架体稳定承载力见表 8。

节点拧紧力矩变化时架体稳定承载力的变化情况如图 3。图中横轴为节点拧紧力矩,节点拧紧力矩值小于  $20 N \cdot m$  时由于上碗扣起不到对横杆端头的固定作用,因此被认为铰接。节点拧紧力矩大于  $60 N \cdot m$  被认为刚接。

表 9 实体模型工况 5~工况 8 架体稳定承载力

工况序号	步距/m	纵距/m	剪刀撑	地杆高度/m	天杆高度/m	试验承载力/kN
5	$1.2 \times 6$	1.2	竖向	0.20	0.60	43.6
6	$1.2 \times 6$	1.2	无	0.35	0.45	33.0
7	$1.8 \times 4$	1.2	竖向	0.35	0.45	34.4
8	$1.2 \times 6$	1.2	竖向	0.35	0.45	41.9

### 2) 有限元模拟结果与实体模型承载力对比

将模型 1 至模型 4 中架体稳定承载力分别与文献[5]中工况 5~8 中实际架体承载力进行比值对比。对比结果见表 10。

由表 10 可知,模型 1~4 中节点为铰接时的承载力明显低于实际架体的承载力,这是由于忽略了横杆对立杆的约束作用。当节点为刚性连接时,模型 1~4 中架体的稳定承载力

过分高于实际架体的承载力,因为没有考虑的材料初始缺陷以及施工过程中扣件松动等原因对节点刚性的削弱。当节点拧紧力矩在  $35 \sim 50 N \cdot m$  之间变化时,此时节点处于铰接与刚接之间的“半刚性”状态,模型 1~4 中架体稳定承载力与实际架体承载力非常接近,比值变化率分别为  $88\% \sim 102\%$ 、 $90\% \sim 113\%$ 、 $88\% \sim 113\%$ 、 $89\% \sim 111\%$ 。

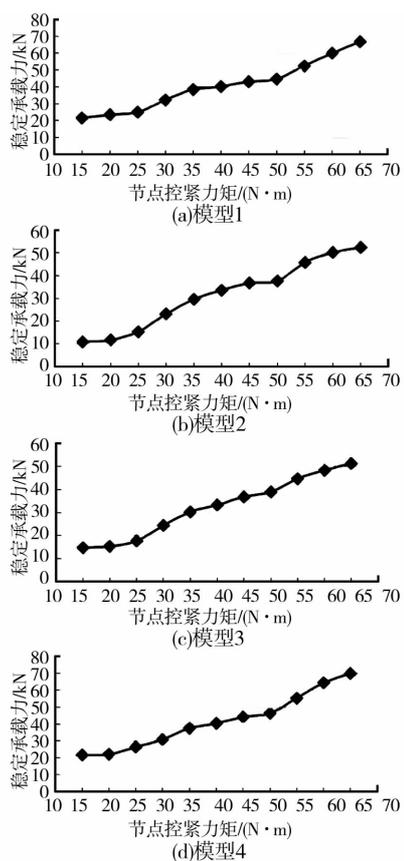


图 3 架体承载力随节点拧紧力矩的变化情况

表 10 模型 1 至模型 4 中架体稳定承载力与实际值对比

节点拧紧力矩/ (N·m)	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
铰接	49%	32%	43%	52%
20	53%	35%	45%	53%
25	57%	46%	51%	63%
30	74%	70%	71%	74%
35	88%	90%	88%	89%
40	92%	102%	97%	96%
45	98%	111%	107%	105%
50	102%	113%	113%	111%
55	120%	138%	130%	131%
60	137%	151%	141%	153%
刚接	153%	158%	149%	167%

### 3 结 论

在碗扣式脚手架中,立杆上碗扣的拧紧程度直接影响到节点的初始刚度,通过对不同拧紧力矩与节点初始刚度分析发现,二者之间的关系并非线性。运用 MATLAB 程序将二者进行拟合发现,三阶拟合曲线较二阶拟合曲线误差较小,精确度较高,进而给出三阶拟合曲线表达式。

通过模型 1~4 中架体稳定承载力的模拟结果与实际架体的承载力对比发现,当模型中架体节点为铰接或刚接连接时模拟结果与实际架体稳定承载力相比相差较大。因此在用有限元软件建立模型计算架体承载力时,节点铰接模型与节点刚接模型均与实际情况不符。在模型 1~4 中节点拧紧力矩在 35~50 N·m 之间变化时(即节点初始刚度在 39.25~54.07 kN/rad 变化),模拟结果与实际架体稳定承载力非常接近,吻合良好。比值变化率分别为 88%~102%、90%~113%、88%~113%、89%~111%,此时节点处于铰接与刚接之间的“半刚性”状态。因此用有限元软件建立模型计算架体稳定承载力时,选取节点拧紧力矩在 35~50 N·m(即节点初始刚度在 39.25~54.07 kN/rad)之间的节点半刚性模型所得的模拟结果与实际架体承载力较为接近。

#### 参考文献:

- [1] Weesner L B, Jones H L. Experimental and analytical capacity of frame scaffolding [J]. Engineering Structures, 2001, 23 (6)
- [2] Peng J. L, Pan A. D, Rosowsky Dr. V, etal. High clearance scaffold Systems during construction II. Structural modeling and modes of failure [J]. Engineering Structures, 1996, 18(3).
- [3] 刘宗仁,涂新华,丁永胜. 扣件式钢管脚手架临界力下限计算方法[J]. 建筑技术,2001(5).
- [4] 徐崇宝,张铁铮,潘景龙,等. 双排扣件式钢管脚手架工作性能的理论分析与实验研究 [J]. 哈尔滨建筑工程学院学报,1989(2).
- [5] 周康喆. 碗扣式钢管模板支架承载力试验与分析[D]. 天津:天津大学,2010:26-27.
- [6] 鲁征. 扣件式脚手架及模板支架施工期安全性研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.

(编辑 王 宣)