



# 基于有侧移半刚性连接框架理论的无支撑模板支架 稳定承载力分析及试验研究

陈志华<sup>1</sup>, 陆征然<sup>1</sup>, 王小盾<sup>1</sup>, 刘红波<sup>1</sup>, 刘 群<sup>2</sup>

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

**摘要:**在考虑节点半刚性性质的基础上,利用有侧移三层柱的框架模型推导有侧移半刚性连接钢框架中柱的计算长度系数方程,并将这一方法引入无支撑扣件式模板支架稳定承载力计算中,将模板支架的整体稳定简化成立杆的稳定,进而得到无支撑扣件式模板支架的理论稳定承载力。利用 ANSYS 软件,考虑直角扣件的半刚性性质,建立了6组不同搭设情况下无支撑扣件式模板支架的有限元模型,对其稳定承载力及失稳情况进行分析。对照有限元模型的搭设情况,对模板支架进行试验研究,得到相应的稳定承载力,试验结果与有限元结果基本吻合。将理论计算结果与试验及有限元分析结果进行对比可知,在其他搭设参数相同的情况下,模板支架的整体稳定承载力随步距、立杆间距的减少而提高,而且理论计算结果更加偏于安全,进一步说明有侧移半刚性连接框架理论在无支撑扣件式模板支架稳定承载力计算中的可行性及适用性,并可以考虑将此理论应用到规范中,为今后对扣件式模板支架稳定承载力的进一步分析及研究提供理论参考。

**关键词:**模板支架; 直角扣件; 半刚性连接; 有侧移框架; 模型试验; 稳定承载力

**中图分类号:**TU392.3 TU317.1 **文献标志码:**A

## Experimental and theoretical research on capacity of unbraced steel tubular formwork support based on sway frame with semi-rigid connection theory

CHEN Zhihua<sup>1</sup>, LU Zhengran<sup>1</sup>, WANG Xiaodun<sup>1</sup>, LIU Hongbo<sup>1</sup>, LIU Qun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Based on the three-column subassemblage model, the governing equations for determining the effective length factor of columns in sway frames were derived considering the semi-rigid character of beam-to-column connections. Through transforming stability analysis of the formwork support into that of single post, the bracing capacity of steel tubular formwork support without X-bracing was calculated using the theory of sway frame with semi-rigid connection. Advanced non-linear finite element models of six steel tubular formwork supports with different geometric parameters were established considering the semi-rigid character of the couplers to evaluate the critical loads and failure modes under idealized conditions in ANSYS. Six steel tubular formwork supports were built and tested to failure in order to examine their stability behavior and failure modes. The FEM results were well consistent with those of the test. Compared with the results of tests and FEM, the theoretical results have the same changing rulers with the tests and FEM, and more conservative. It can conclude that the sway frame with semi-rigid connection theory presented in this paper has feasibility and applicability in forecasting the critical load of unbraced steel tubular formwork support with coupler under uniform load, and it is considerable to apply this theory in code (Technical code for safety of steel tubular scaffold with couplers). The results obtained in this paper can be a significant reference for later research and design.

**Keywords:** formwork support; right angle coupler; semi-rigid connection; sway frame; model test; bearing capacity

基金项目:天津市应用基础及前沿技术研究重点项目(08JCZDJC19600),新世纪优秀人才支持计划(NCET)。

作者简介:陈志华(1966—),男,河北井陘人,工学博士,教授。E-mail:zhchen@tju.edu.cn

通讯作者:王小盾(1968—),女,北京人,工学博士,副教授。E-mail:maodun2004@126.com

收稿日期:2009年3月

## 0 引言

扣件式模板支架是一种由纵、横向水平杆及立杆用扣件连接而成的空间框架体系。我国从上世纪60年代开始研究和开发直角扣件式模板支架体系,该类型模板支架体系具有加工简单,杆配件数量少,装卸方便,利于施工操作,搭设灵活,能搭设高度大,坚固耐用,可多次周转及通用性强等特点,已成为我国使用最为普遍的模板支架体系,其设计及使用直接关系着施工质量和安全。

国内学者对直角扣件式模板支架的研究主要包括:在试验方面,张曼莉等<sup>[1]</sup>对扣件式钢管模板支架体系进行了现场试验研究,该试验证明了模板支架体系中各立杆受力不均匀。李维滨等<sup>[2,3]</sup>对扣件式钢管模板支架体系进行了整架试验研究,并对单扣件抗滑控制的支架稳定承载力、单扣件支架水平钢管挠度等进行了对比分析,此外还给出了单跨钢管作为横向水平钢管的挠度验算公式。尹德生<sup>[4]</sup>对直角扣件的半刚性进行了试验研究,该研究证明了在弹性阶段,直角扣件连接的转动刚度是一个常数。

在理论计算方面,刘建民等<sup>[5]</sup>利用三维弹性有限元方法,分别研究了立杆步距、立杆纵横间距、竖向剪刀撑设置、扫地杆等诸多因素对扣件式钢管模板支架体系立杆稳定承载力的影响。杜荣军在文献<sup>[6]</sup>中曾提出用钢结构理论中的有侧移框架模型对双排脚手架进行稳定分析,后又提出将此种分析方法应用于模板支架体系的计算。施炳华<sup>[7,8]</sup>从升板式建筑结构群柱稳定性研究成果中引申出计算扣件式钢管模板支架体系的排架模型。认为模板支架体系是上下两端铰接的多层排架,其稳定性可以简化为一根两端铰接的等代柱的稳定性。但是采用此种方法的计算结果偏于保守,与实际情况不相符合。肖焱等<sup>[9]</sup>提出了扣件式钢管格构支架稳定承载力计算理论及设计方法,并对立杆格构柱进行了相应的稳定承载力试验研究。对于扣件式模板支架的稳定承载力,国内已作过试验研究和部分理论分析,但是在进行模板支架整体稳定承载力分析中,并没有考虑直角扣件作为一种半刚性连接对其产生的影响,从以往的计算与试验结果的比较中可以看出,直角扣件的半刚性性质对扣件式钢管模板支架稳定承载力的影响非常显著<sup>[10-15]</sup>。

本文在以上研究成果的基础上,对直角扣件式模板支架分别进行了考虑初始缺陷的非线性有限元分析及试验研究。并考虑直角扣件的半刚性性质,针对无支撑扣件式模板支架侧向刚度弱,且容易发生整体失稳的特点,提出将有侧移半刚性连接三层

柱的框架计算理论引入无支撑扣件式模板支架稳定承载力计算中,进而将模板支架的整体稳定性问题简化成立杆进行稳定计算。

## 1 有侧移半刚性连接框架理论中柱的计算长度

与文献<sup>[16]</sup>中有侧移刚接框架柱计算长度系数的推导相似,采用弹簧模拟梁柱连接处节点的半刚性性质,计算模型如图1所示。有侧移半刚性连接框架理论基本假定:①梁所受到的轴力很小,可以忽略;②在同一层中的各柱同时发生失稳;③各梁近端及远端的转角大小相等,且方向相同,即梁按双向曲率屈曲。

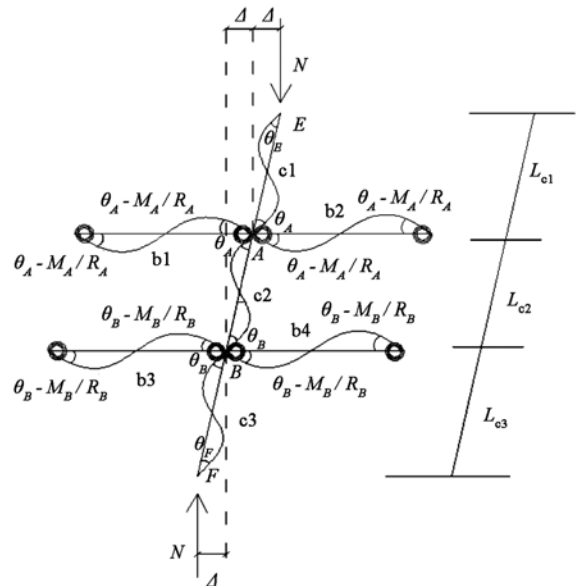


图1 有侧移三层柱的框架模型

Fig. 1 Three-column model for sway frame

### 1.1 梁单元

如图2所示为两端半刚性约束梁, $L_b$ 为梁长度, $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 为梁端转角, $R_{k1}$ 、 $R_{k2}$ 为梁两端弹簧刚度。由于轴力对横梁的影响常常远小于梁端弯矩,故忽略不计。在端部弯矩 $M_1$ 、 $M_2$ 的作用下,梁左端、右端相对转角分别为 $\theta_1 - M_1/R_{k1}$ 和 $\theta_2 - M_2/R_{k2}$ <sup>[17]</sup>, $EI_b$ 为梁截面的抗弯刚度。

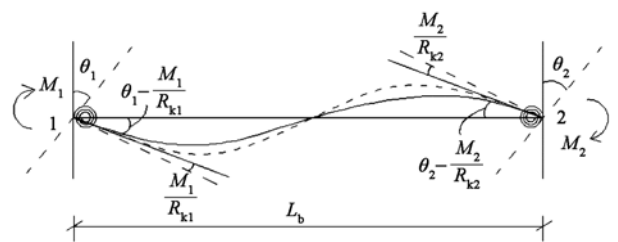


图2 两端半刚性约束时的梁单元

Fig. 2 Beam element restrained by semi-rigid connections

当梁两端为半刚性连接时,其转角-位移方程为:

$$M_1 = \frac{EI_b}{L_b R^*} \left[ \left( 4 + \frac{12EI_b}{L_b R_{k2}} \right) \theta_1 + 2\theta_2 \right] \quad (1)$$

$$M_2 = \frac{EI_b}{L_b R^*} \left[ 2\theta_1 + \left( 4 + \frac{12EI_b}{L_b R_{k1}} \right) \theta_2 \right]$$

其中:

$$R^* = \left( 1 + \frac{4EI_b}{L_b R_{k1}} \right) \left( 1 + \frac{4EI_b}{L_b R_{k2}} \right) - \left( \frac{EI_b}{L_b} \right)^2 \frac{4}{R_{k1} R_{k2}} \quad (2)$$

当框架产生侧移时,  $\theta_1 = \theta_2$ , 则梁端弯矩  $M_1$  为:

$$M_1 = \alpha_{uf} \left( \frac{6EI_b}{L_b} \right) \theta_1 \quad (3)$$

其中,无侧移框架梁端约束条件影响系数为:

$$\alpha_{uf} = \left( 1 + \frac{2EI_b}{L_b R_{k2}} \right) / R^* \quad (4)$$

## 1.2 柱单元

如图3所示,柱长度为  $L_c$ , 两端承受轴力  $N$  和弯矩  $M_A$ 、 $M_B$ , 两端相对侧移为  $\Delta$ , 柱截面的抗弯刚度为  $EI_c$ 。柱的转角-位移方程用稳定函数表示如式(5)所示<sup>[17]</sup>。

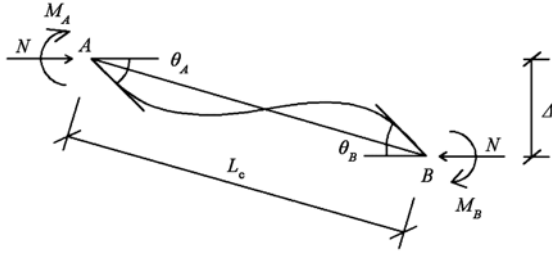


图3 柱单元

Fig. 3 Column element

$$M_A = \frac{EI_c}{L_c} \left[ S_{ii} \theta_A + S_{ij} \theta_B - (S_{ii} + S_{ij}) \frac{\Delta}{L_c} \right] \quad (5)$$

$$M_B = \frac{EI_c}{L_c} \left[ S_{ji} \theta_A + S_{jj} \theta_B - (S_{ji} + S_{jj}) \frac{\Delta}{L_c} \right]$$

其中,  $S_{ii}, S_{jj}, S_{ij}, S_{ji}$  为稳定函数。令  $\mu = \frac{\pi}{kL_c}$ ,

$k = \sqrt{\frac{N}{EI_c}}$ , 则:

$$S_{ii} = S_{jj} = \frac{\frac{\pi}{\mu} \sin \frac{\pi}{\mu} - \left( \frac{\pi}{\mu} \right)^2 \cos \frac{\pi}{\mu}}{2 - 2 \cos \frac{\pi}{\mu} - \frac{\pi}{\mu} \sin \frac{\pi}{\mu}} \quad (6)$$

$$S_{ij} = S_{ji} = \frac{\left( \frac{\pi}{\mu} \right)^2 - \frac{\pi}{\mu} \sin \frac{\pi}{\mu}}{2 - 2 \cos \frac{\pi}{\mu} - \frac{\pi}{\mu} \sin \frac{\pi}{\mu}}$$

## 1.3 柱的计算长度系数

根据节点  $A$ 、 $B$  处平衡方程及变形协调条件,得到有侧移半刚性框架柱的有效长度系数方程<sup>[18-20]</sup>:

$$\det \begin{vmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{vmatrix} = 0$$

$$a_{11} = S_{ii} + 6K'_A - K_{Ac1} S_{ij}^2 / S_{ii}, a_{12} = K_{Ac2} S_{ij},$$

$$a_{13} = -S_{ii} - S_{ij}, a_{21} = K_{Bc2} S_{ij},$$

$$a_{22} = S_{ii} + 6K'_B - K_{Bc3} S_{ij}^2 / S_{ii},$$

$$a_{23} = -S_{ii} - S_{ij}, a_{31} = a_{32} = S_{ii} + S_{ij}。$$

其中,

$$K'_A = \frac{\sum_A \alpha_{uf} EI_b / L_b}{\sum_A EI_c / L_c}, K'_B = \frac{\sum_B \alpha_{uf} EI_b / L_b}{\sum_B EI_c / L_c} \quad (7)$$

$K'_A$  和  $K'_B$  为修正后的有侧移框架柱上、下端约束系数。相对柱刚度系数  $K_{Ac1}$  和  $K_{Bc1}$  为:

$$K_{Ac1} = \frac{EI_{ci} / L_{ci}}{\sum_A EI_c / L_c}, K_{Bc1} = \frac{EI_{ci} / L_{ci}}{\sum_B EI_c / L_c} \quad (8)$$

$i = 1, 2, 3$  表示柱子编号。最后,可以得到柱  $c1$  和  $c3$  远端为铰接时,有侧移框架柱计算长度系数  $\mu$  的计算方程如式(9)所示。

$$\left[ 36K'_A K'_B - \left( \frac{\pi}{\mu} \right)^2 \right] \tan \left( \frac{\pi}{\mu} \right) + 6(K'_A + K'_B) \frac{\pi}{\mu} = 0 \quad (9)$$

以上是有侧移半刚性连接框架理论中柱的计算长度方程。直角扣件作为连接纵、横向水平杆与立杆之间的节点,是一种半刚性连接,可以把上述理论方法应用到无支撑扣件式模板支架的计算中,将模板支架的整体稳定简化成立杆的稳定,利用式(9)得到立杆的计算长度系数,进而得到无支撑扣件式模板支架的理论稳定承载力。

## 2 直角扣件转动刚度试验

通过试验测定不同初始螺栓拧紧力矩下直角扣件转动刚度,拟合试验结果,得到直角扣件的弯矩-转角关系式。

试验所用装置如图4所示。每个扣件安装在两根互相垂直的钢管上。横管长 2100mm,在距中心 1000mm 处的横管上施加荷载  $P$ 。在竖管、横管上距离中心 200mm 处的  $d$ 、 $e$  两点安装位移计,测量两点处的位移值  $\delta_d$ 、 $\delta_e$ 。利用实验室现有标准砝码进行逐级加载,所加各级弯矩值见表1。测量出  $d$ 、 $e$  两点的位移值  $\delta_d$  和  $\delta_e$  后,按式(10)计算出两点的相对转角。

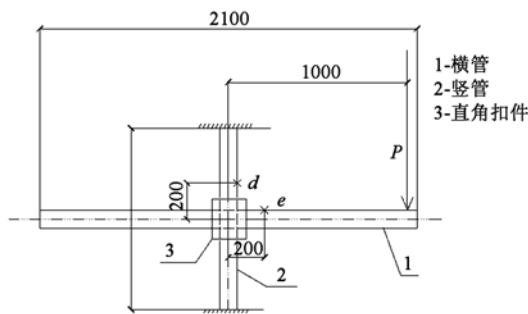
$$\theta = \arctan(\delta_d - \delta_e) / 200 \quad (10)$$

因为试件的随机性以及差异性,所以选取测量结果的平均值作为这组试验的最终结果。试验中所测量的  $d$ 、 $e$  两点位移值以及用式(10)求出的扣件转角见表1。

表1 按照式(10)计算的扣件转角

Table 1 Rotation of coupler calculated using formula (10)

扣件拧紧力矩为 30N·m				扣件拧紧力矩为 40N·m				扣件拧紧力矩为 50N·m			
M/kN·m	$\delta_d$ /mm	$\delta_c$ /mm	$\theta$ /rad	M/kN·m	$\delta_d$ /mm	$\delta_c$ /mm	$\theta$ /rad	M/kN·m	$\delta_d$ /mm	$\delta_c$ /mm	$\theta$ /rad
0.2	2.046	7.474	0.0270	0.2	0.244	5.281	0.0252	0.2	0.224	3.444	0.0161
0.4	2.281	11.921	0.0482	0.4	0.440	7.020	0.0373	0.4	0.506	4.486	0.0199
0.5	2.434	14.054	0.0581	0.5	0.584	8.644	0.0403	0.5	0.624	5.124	0.0225
0.6	2.544	16.144	0.0680	0.6	0.760	10.680	0.0496	0.6	0.728	6.088	0.0268
0.7	2.672	18.752	0.0804	0.7	0.960	13.220	0.0613	0.7	0.940	7.640	0.0335
0.8	—	—	变形过大	0.8	1.170	14.810	0.0682	0.8	0.948	8.968	0.0401
				0.9	1.360	16.460	0.0755	0.9	1.118	11.158	0.0502
				1.0	1.562	18.702	0.0857	1.0	1.266	13.486	0.0611
								1.1	1.410	15.410	0.0700
								1.2	1.522	17.502	0.0799



(a) 试验装置示意图



(b) 测试现场

图4 直角扣件转动刚度性能试验示意图

Fig. 4 Schematic of torsional stiffness test on right angle coupler

扣件拧紧力矩为 30N·m、40N·m 及 50N·m 三种情况下,节点弯矩  $M$ -转角  $\theta$  关系曲线如图 5 所示。分别对三种情况下扣件的弯矩-转角曲线用二次函数

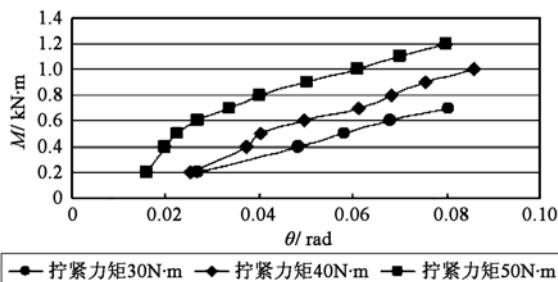


图5 三种情况下扣件的弯矩-转角关系曲线

Fig. 5 Comparison of three different  $M$ - $\theta$  curves

拟合,得到直角扣件的弯矩-转角关系如下:

扣件拧紧力矩为 30N·m 时,弯矩-转角关系式:

$$M = -10.4892\theta^2 + 10.5958\theta - 0.0802 \quad (11)$$

扣件拧紧力矩为 40N·m 时,弯矩-转角关系式:

$$M = -64.0653\theta^2 + 19.8674\theta - 0.2422 \quad (12)$$

扣件拧紧力矩为 50N·m 时,弯矩-转角关系式:

$$M = -174.1022\theta^2 + 30.187\theta - 0.1426 \quad (13)$$

三种情况下,扣件的初始转动刚度分别为 10.5958kN·m/rad、19.8674kN·m/rad 和 30.1870kN·m/rad。从表 1 中可以看出,在扣件的拧紧力矩为 30N·m、40N·m 和 50N·m 的情况下,当扣件的转角约达到 0.08rad 时,所承受的外力矩分别为 0.7kN·m、0.9kN·m 和 1.2kN·m,即在转角相同的情况下,所能承受的外力矩随扣件拧紧力矩的增加而提高。

### 3 模板支架力学性能的有限元分析

为了研究立杆步距、立杆间距对模板支架稳定承载力的影响,利用有限元软件 ANSYS,建立 6 组不同搭设参数下的无支撑扣件式模板支架有限元模型,进行考虑初始缺陷的非线性稳定性分析。参照 JGJ 130—2001《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》<sup>[21]</sup>中对模板支架的搭设要求,将模板支架有限元特征值屈曲分析所得第一阶失稳形态按照一定比例作为初始缺陷添加到非线性屈曲分析模型中。采用弹簧单元 COMBIN14 模拟直角扣件的半刚性性质,钢材的弹性模量为  $2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ,密度为  $7.8 \times 10^{-6} \text{kg/mm}^3$ ,泊松比为 0.3,立杆底部与地面铰接。实际扣件的拧紧力矩一般都在 40~50N·m 之间,所以弹簧的刚度取为前述试验中当拧紧力矩为 40N·m 时,扣件的初始转动刚度 19kN·m/rad。6 组模型的搭设参数及有限元计算结果如表 2 所示,模型的失稳形态如图 6 所示。

表 2 不同搭设参数下模板支架稳定承载力的有限元计算结果

Table 2 Bearing capacity of formwork support without bridging in different geometric parameters

模型编号	立杆步距/m	立杆间距/m	立杆伸出顶层水平杆长度 a/m	架高/m	稳定承载力/kN
1	1.80	1.50 × 1.50	0.55	8.05	8.25
2	1.50	0.90 × 0.90	0.55	8.25	19.54
3	1.50	1.20 × 1.20	0.55	8.25	10.21
4	1.20	0.90 × 0.90	0.55	8.05	20.39
5	0.90	0.60 × 0.60	0.55	8.05	16.08
6	0.60	0.40 × 0.40	0.55	8.05	22.80

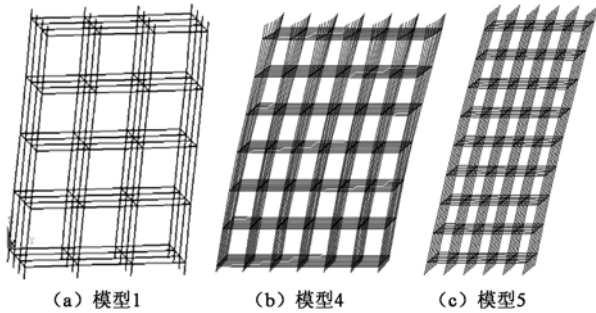


图 6 有限元分析中模板支架的失稳情况

Fig.6 Failure modes of formwork support test model 1, 4, and 5 in FEM

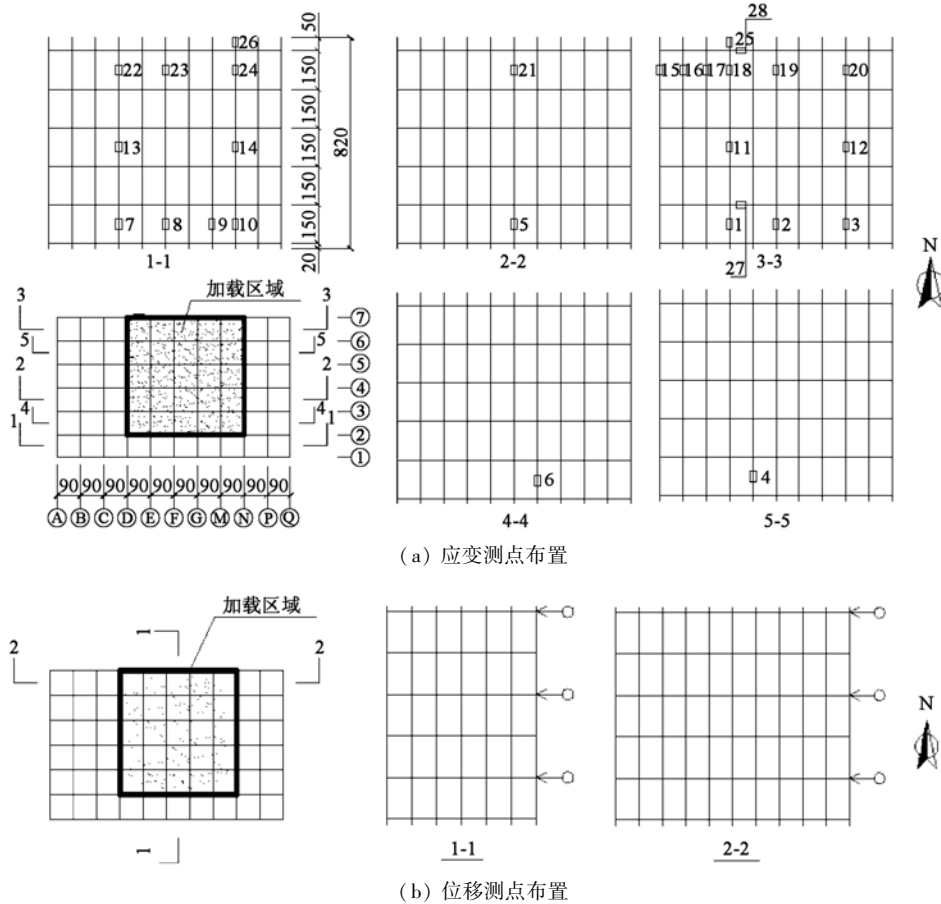


图 7 试件 2 测点布置示意图

Fig.7 Measuring points of specimen 2

从图 6 中可以看出,无支撑扣件式模板支架失稳时,均发生大波鼓曲整体失稳破坏。

## 4 模板支架稳定承载力试验研究

### 4.1 材料性能试验

在进行模板支架原型试验之前,对试验中所要用到的钢管进行了材性试验,试验结果如表 3 所示。

表 3 钢管材料性能试验结果

Table 3 Results of material coupon test

试件编号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	弹性模量 /MPa	断后伸长率 /%	面积收缩率 /%
1	455.45	403.40	$2.07 \times 10^5$	10.00	44.14
2	418.95	350.45	$2.08 \times 10^5$	13.76	39.27
3	436.35	370.90	$2.02 \times 10^5$	14.92	42.01
均值	436.92	374.92	$2.06 \times 10^5$	12.89	41.81

### 4.2 扣件式模板支架原型试验

为了研究无支撑扣件式模板支架的整体力学性能,进行了 6 组无支撑模板支架的原型试验。分别进行步距相同、立杆间距不同及立杆间距相同、步距不同两种情况下的对比试验,同时,研究步距较大和较小情况下模板支架的整体力学性能。根据有限元分

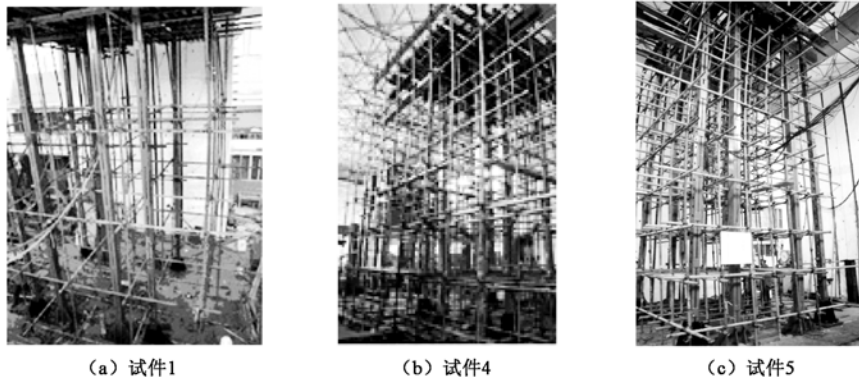
析结果,在立杆及水平杆上均相应地布置了应变和位移测点,试件 2 的应变及位移测点布置如图 7 所示。加载过程分为预加载、正式加载二个阶段。预加载阶段共分两级,每级中加到单根立杆上的荷载为 2.5kN。正式加载阶段,每级加载到单根立杆上的荷载为 0.25kN,持续 3min。待接近模型稳定承载力时,每级荷载增量减为原来的 1/2 (0.125kN),每级荷载持续时间延长,待应变和位移不再发展时,进入下一级加载,直至试验模型破坏。试验中采用两对反力架,利用八个液压千斤顶,通过两道型钢分配梁将荷载均匀传至脚手架上,加载装置如图 8 所示。



图 8 试验加载装置  
Fig. 8 Test set-up

从试验过程中可以观察到,6 组模型均发生大波鼓曲的整体失稳破坏,与有限元计算所得模板支架失稳形态相一致。在其他搭设参数相同的情况下,模板支架的稳定承载力随立杆步距及立杆间距的增大而减小。试验模型参数及稳定承载力试验结果如表 4 所示,试验中部分试件的失稳情况如图 9 所示。将有限元计算结果与试验结果进行比较,见表 5。

从表 5 中可以看出,有限元计算结果与试验结果之间可能存在一定误差。由于在有限元计算中,模拟直角扣件半刚性性质的弹簧,其刚度均取为直角扣件转动刚度试验中拧紧力矩为 40N·m 时的初始转动刚度 19kN·m/rad,而在试验中,并不一定保证所有的直角扣件均能达到此种拧紧情况。但有限元及



(a) 试件1 (b) 试件4 (c) 试件5

图 9 无支撑模板支架模型试验的失稳情况

Fig. 9 Typical failure modes of formwork support test 1, 4, and 5

表 4 试件参数及试验结果

**Table 4 Summary of geometric dimensions and critical loads for formwork support during test**

试件编号	立杆步距/m	立杆间距 /m	立杆伸出顶层水平杆长度 a /m	架高 /m	稳定承载力 /kN
1	1.80	1.50 × 1.50	0.50	8.00	6.40
2	1.50	0.90 × 0.90	0.50	8.20	15.40
3	1.50	1.20 × 1.20	0.50	8.20	12.11
4	1.20	0.90 × 0.90	0.50	8.00	17.18
5	0.90	0.60 × 0.60	0.50	8.00	21.16
6	0.60	0.40 × 0.40	0.50	8.00	20.52

表 5 模板支架稳定承载力有限元计算结果与试验结果比较

**Table 5 Comparison of bearing capacity between FEM analysis and test results**

试件编号	1	2	3	4	5	6
试验结果/kN	6.40	15.40	12.11	17.18	21.16	20.52
有限元结果/kN	8.25	19.54	10.21	20.39	16.08	22.80
误差/%	28.90	26.89	-15.69	18.68	-24.00	11.11

试验结果所反映出的立杆步距、立杆间距这两个搭设参数对模板支架整体稳定承载力的影响趋势具有一致性:在立杆步距相同情况下减小立杆间距或者在立杆间距相同情况下减小步距均将使模板支架的整体稳定承载力提高。由此证明了有限元模型建立的正确性。

## 5 理论、试验及有限元结果比较

采用前述有侧移半刚性连接框架理论对无支撑扣件式模板支架稳定承载力进行计算。扣件的拧紧力矩一般都在 40 ~ 50N·m 之间,所以这里偏于安全地选取拧紧力矩为 40N·m,扣件转角达到 0.08rad,扣件的转动刚度 8kN·m/rad 作为梁两端弹簧刚度  $R_{ki}$  的取值,并假设柱 c1 和 c3 远端约束均为铰接。对应于所做的 6 组无支撑条件下模板支架原型试验的模型参数,分别按式(2)和(4)计算出  $R^*$  和  $\alpha_{uf}$ ,将

表6 理论、试验及有限元结果之间的比较

Table 6 Comparison of bearing capacity with all results

试件编号	步距/m	立杆间距/m	稳定承载力 试验结果/kN	稳定承载力 有限元结果/kN	稳定承载力 理论计算结果/kN	理论与试验 误差/%	理论与有限元 误差/%
1	1.80	1.50 × 1.50	6.40	8.25	7.56	18.13	-8.36
2	1.50	0.90 × 0.90	15.40	19.54	9.59	-37.73	-50.92
3	1.50	1.20 × 1.20	12.11	10.21	9.52	-21.39	-6.76
4	1.20	0.90 × 0.90	17.18	20.39	11.65	-32.19	-42.86
5	0.90	0.60 × 0.60	21.16	16.08	16.47	-22.16	2.43
6	0.60	0.40 × 0.40	20.52	22.80	25.36	23.59	11.23

$\alpha_{uf}$  的数值代入到式(7)中得到  $K'_A, K'_B$ , 并由式(9)计算出立杆的计算长度系数  $\mu$ , 进而通过式(14)得出模板支架的稳定承载力。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu L_c)^2} \quad (14)$$

理论分析结果与试验及有限元计算结果相比较,如表6所示。

从表6中可以看出,三种结果所反映出的步距、立杆间距这两个搭设参数对无支撑扣件式模板支架稳定承载力的影响规律是一致的,即在其他搭设参数相同的情况下,模板支架的整体稳定承载力随步距、立杆间距的减小而提高,证明了采用有侧移半刚性连接框架理论来计算无支撑扣件式模板支架的适用性及可行性。从三种结果对比中能够看出,误差相对较大的为第2、4个试件,说明此理论的应用仍有待于进一步研究,但这两个试件中理论计算结果与试验及有限元结果相比,是偏于安全的。在实际工程中,由于钢管锈蚀、钢管及扣件的多次反复使用、脚手架搭建整体缺陷等随机因素的影响,理论、试验及有限元计算结果之间存在一定误差是无法避免的。应用有侧移半刚性连接框架理论在计算模板支架稳定承载力时,考虑了相邻的其他杆件以及直角扣件的半刚性性质对中间立杆稳定承载力的影响,更加符合实际情况。但是,采用有侧移半刚性连接框架理论计算无支撑式模板支架稳定承载力时,并没有考虑到实际搭设中所设置的各种支撑的影响,故在实际应用时,可将各种支撑对模板支架的强化作用作为一种安全储备。

## 6 结论

对6组无支撑扣件式钢管模板支架模型进行了原型试验和有限元分析,并基于有侧移半刚性连接框架理论,对无支撑式模板支架的稳定承载力进行了相应的理论计算,得到如下结论:

(1)从不同拧紧力矩下的直角扣件转动刚度试验中可以看出,转角相同时,扣件能承受的外力矩随扣件拧紧力矩的增加而提高。在  $30N \cdot m$  的基础上,

拧紧力矩每增加30%,扣件的承载能力相应地增加30%左右,这充分证明直角扣件连接是一种半刚性连接。

(2)在其他搭设参数相同的情况下,模板支架的稳定承载力随立杆步距、立杆间距的增加而降低。

(3)建立了6组模板支架有限元模型,进行了考虑初始缺陷的非线性稳定分析。从有限元与试验结果的对比中可以看出,两者反映的无支撑扣件式模板支架稳定承载力规律相一致,证明了有限元分析的正确性。

(4)在试验研究及有限元分析的基础上,采用有侧移半刚性连接框架理论对无支撑式模板支架稳定承载力进行了计算,并将理论计算与试验及有限元结果进行对比,可以发现,三种结果反映的立杆步距、立杆间距这两个搭设参数对无支撑式模板支架稳定承载力的影响规律是一致的,即在立杆步距相同情况下减小立杆间距或者在立杆间距相同情况下减小立杆步距均将使模板支架的整体稳定承载力提高。有较大误差的两个试件结果,理论计算较试验及有限元结果偏于安全,证明了可以采用有侧移半刚性连接框架理论计算无支撑扣件式模板支架的稳定承载力,但是理论的应用仍有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] 张曼莉, 刘晓薇. 扣件钢管支架承载力的实验研究与分析[J]. 黑龙江矿业学院学报, 1998, 8(4): 50-53. (Zhang Manli, Liu Xiaowei. Experimental study and analysis of load-bearing force about steel supports with retaining ring[J]. Journal of Heilongjiang Mining Institute, 1998, 8(4): 50-53. (in Chinese))
- [2] 李维滨, 刘桐, 郭正兴. 扣件式钢管模板支架安全性研究与施工建议[J]. 建筑技术, 2004, 35(8): 593-595. (LI Weibing, LIU Tong, GUO Zhengxing. Research on the safety of tube-and-coupler formwork support and construction suggestions[J]. Architecture Technology, 2004, 35(8): 593-595. (in Chinese))
- [3] 刘桐, 刘训良, 李维滨. 扣件式钢管模板支架底模挠度试验研究[J]. 施工技术, 2004, 3(2): 13-19. (LIU Tong, LIU Xun-liang, LI Wei-bing. Test study of flexivity of bottom formwork of fastener-style steel pipe

- formwork support[J]. Construction Technology, 2004, 33(2): 13-19. (in Chinese))
- [4] 尹德生. 钢管支架节点转动刚度的测定方法[J]. 实验力学, 1994, 9(4): 390-393. (Yin Desheng. A method for testing rotational stiffness of connector in steel pipe support frames[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1994, 9(4): 390-393. (in Chinese))
- [5] 刘建民, 李慧民. 扣件式钢管模板支撑架立杆承载力的影响因素分析[J]. 工业建筑, 2005, 35(增刊1): 3-9. (Liu Jianmin, Li Huimin. Analysis of the factors influencing buckling load of steel tubular formwork support with couplers [J]. Industrial Construction, 2005, 35 (Suppl. 1): 3-9. (in Chinese))
- [6] 杜荣军. 脚手架结构的稳定承载能力[J]. 施工技术, 2001, 30(4): 1-5. (DU Rong-jun. Stable bearing capacity of scaffolding structure [J]. Construction Technology, 2001, 30(4): 1-5. (in Chinese))
- [7] 施炳华. 探讨扣件式钢管模板支架的稳定计算问题[J]. 施工技术, 2004, 33(2): 21-22. (SHI Bing-hua. Discussion of calculation problems on fastener-style steel pipe falsework stability [J]. Construction Technology, 2004, 33(2): 21-22. (in Chinese))
- [8] 施炳华. 建筑施工现场模板支架与脚手架的设计计算[J]. 建筑科学, 2007, 23(7): 81-85. (SHI Bing-hua. Design calculation of formwork support and scaffolding at construction site [J]. Building Science, 2007, 23(7): 81-85. (in Chinese))
- [9] 肖焱, 周观根, 刘扬. 扣件式钢管格构支架整体稳定性计算理论和试验研究[J]. 施工技术, 2007, 36(11): 25-30. (XIAO Chi, ZHOU Guan-gen, LIU Yang. Theoretical and experimental study on integral stability calculation of fastener-style steel pipe lattice falsework [J]. Construction Technology, 2007, 36(11): 25-30. (in Chinese))
- [10] Milojkovic B, Beale R G, Godley M H R. Determination of the factors of safety of standard scaffold structures [C]// Advances in Steel Structures: Proceeding of the Third International Conference on Advances in Steel Structures. Amsterdam: Elsevier, 2002, 2(1): 303-310.
- [11] Vaux S, Wong C, Hancock G. Sway stability of steel scaffolding and formwork Systems [C]// Advances in Steel Structures; Proceedings of the Third International Conference on Advances in Steel Structures. Amsterdam: Elsevier, 2002, 2(1): 311-319.
- [12] Peng J L, Pan A D, Rosowsky D V, et al. High clearance scaffold systems during construction-I: Structural modeling and modes of failure [J]. Engineering Structures, 1996, 18(3): 247-257.
- [13] Peng J L, Pan A D, Rosowsky D V, et al. High clearance scaffold systems during construction-II: Structural analysis and development of design guidelines [J]. Engineering Structures, 1996, 18(3): 258-267.
- [14] 敖鸿斐, 李国强. 双排扣件式钢管脚手架的极限稳定承载力研究[J]. 力学季刊, 2004, 25(2): 213-218. (AO Hong-fei, LI Guo-qiang. Investigation of overall load-bearing stability capacity of tube-and-couple scaffolds [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2004, 25(2): 213-218. (in Chinese))
- [15] 袁学霞, 金伟良, 鲁征, 等. 扣件式钢管支模架稳定承载能力研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 43-50. (Yuan Xuexia, Jin Weiliang, Lu Zheng, et al. A study on the stability bearing capacity of fastener-style tubular steel formwork-supports [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 43-50. (in Chinese))
- [16] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (Chen Ji. Stability of steel structures theory and design [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [17] 王静峰, 李国强. 有侧移半刚性连接组合框架柱的有效长度系数[J]. 工程力学, 2007, 24(3): 71-77. (WANG Jing-feng, LI Guo-qiang. Effective length factor of columns in sway and semi-rigid composite frames [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(3): 71-77. (in Chinese))
- [18] 陈惠发. 钢框架稳定设计[M]. 上海: 上海世界图书出版公司, 2001. (Chen W F. Stability design of steel frames [M]. Shanghai: World Publishing Corporation, 2001. (in Chinese))
- [19] Kishi N, Chen W F, Goto Y. Effective length factor of columns in semirigid and unbraced frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(3): 313-320.
- [20] 王静峰, 李国强. 竖向荷载下半刚接组合框架的有限元分析[J]. 工程力学, 2007, 24(12): 59-64. (WANG Jing-feng, LI Guo-qiang. Finite element analysis of semi-rigid composite frames under vertical loads [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(12): 59-64. (in Chinese))
- [21] JGJ 130—2001 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范[S]. (JGJ 130—2001 Technical code for safety of steel tubular scaffold with couplers in construction[S]. (in Chinese))