

# 扣件式钢管模板支架的直接分析法研究

曾凡奎<sup>1</sup>, 张君策<sup>1</sup>, 王金鑫<sup>1</sup>, 范玉川<sup>1</sup>, 胡长明<sup>2</sup>

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 直接分析法作为基于二阶非线性分析的高等分析方法, 可以真实的反映出结构的初始缺陷、节点半刚性、结构和材料的非线性行为, 反映出更准确的结构内力。扣件式钢管模板支架作为细长临时支撑结构, 针对其杆件和连接非线性行为显著、明显的二阶效应、初始缺陷较大等特点, 采用直接分析法对扣件式钢管模板支架设计, 可获取更准确的整架体系非线性行为和失效模式, 在设计过程中即可考虑失效后果。通过对结构整体缺陷、构件缺陷和节点半刚性的量化讨论, 并利用 SAP2000 软件对在构件初始缺陷、节点半刚性和二阶效应耦合作用下的扣件式钢管模板支架进行直接分析法分析, 其分析结果与试验结果对比分析表明: 采用直接分析理论得到的结果与试验数据相吻合, 说明了直接分析法在扣件式钢管模板支架内力计算的准确可靠, 在扣件式钢管模板体系稳定设计中具备适用性, 为制定相关规范提供新思路。

**关键词:** 扣件联接钢结构; 直接分析法; 稳定性分析; 初始缺陷; 二阶效应

**中图分类号:** TU755. 2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2021)04-0472-07

## Study of direct analysis method for coupler-style steel tubular formwork supports

ZENG Fankui<sup>1</sup>, ZHANG Junce<sup>1</sup>, WANG Jinxin<sup>1</sup>, FAN Yuchuan<sup>1</sup>, HU Changming<sup>2</sup>

(1. School of Civil & Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** As an advanced analysis method based on second-order nonlinear analysis, the direct analysis method can truly reflect the initial defects of the structure, the semi-rigidity of the joint, the nonlinear behavior of the structure and the material, and reflect the more accurate internal forces of the structure. As a slender temporary support structure, coupler-style steel tubular formwork support has the characteristics of significant nonlinear behavior of bars and connections, obvious second-order effect and large initial defects. So, the direct analysis method can be used to design coupler-style steel tubular formwork support to obtain more accurate nonlinear behavior and failure modes of the entire frame system, and the failure consequences can be considered in the design process. Based on the quantitative discussion of the overall defects of the structure, the defects of the component and the semi-rigidity of the joint, the direct analysis method is used to analyze coupler-style steel tubular formwork support under the coupling action of initial defects of the component, the semi-rigidity of the joint and second-order effect by means of SAP2000 software, and then the analysis results are compared with the test results. The results show that the results obtained by using the direct analysis theory are consistent with the test data, which indicates that the direct analysis method is accurate and reliable in the calculation of the internal forces of the coupler-style steel tubular formwork support, and has applicability in the stable design of coupler-style steel tubular formwork supports system, and provides a new idea for the formulation of relevant codes.

**Key words:** coupler-style steel tubular formwork supports; direct analysis; stability analysis; initial defects; second order effect

扣件式钢管模板支架广泛应用于安装和施工过程中, 具备易安装拆除、可重复利用等优点。但与此同时, 扣件式钢管模板支架在工作中存在较

大初始缺陷且杆件和连接的非线性行为显著, 如不严格从设计阶段对杆件内力及其稳定性控制, 容易造成脚手架安全事故。2019 年 6 月 10 日, 贵

州毕节七星关区碧阳街道一施工工地发生支架垮塌事故,造成7人受伤,2人被困。2020年1月5日,武汉市江夏区的旅游开发项目在进行混凝土浇筑时发生高支模整体坍塌事故,事故造成6人死亡5人受伤。在加强脚手架的安全施工管理的同时,设计阶段中充分考虑脚手架的初始缺陷和二阶效应,更加真实的反映出结构响应变得尤为重要。目前现行规范中,传统的计算长度系数法被广泛接受,但是由于通过经验系数考虑缺陷的影响,并简化了节点,导致无法准确分析杆件的内力及其变形后的内力重分布情况<sup>[1]</sup>,特别是对于扣件式钢管模板支架这种二阶效应明显的结构,再采取一阶线弹性分析不能得到结构内力的真实响应。而直接分析法采用二阶非线性分析来获取结构的真实内力,更加精确的反映结构在荷载作用下的塑性发展,进而获取精确的结构响应<sup>[2-3]</sup>。刘伟等<sup>[4]</sup>基于钢结构理论对不同类截面的受压构件的综合初始缺陷进行了推导计算,并通过直接分析软件验证其理论的正确性。直接分析法在分析设计中仅需对构件截面的承载力进行校验,而无需对其稳定性再次校核,无疑优化了设计流程,具备较为明显的优势。本文将通过应用直接分析法对脚手架体系进行受力分析,并与试验结果进行比较,来验证其准确可靠性,表征该方法对扣件式钢管模板支架的稳定性设计具有重要意义。

## 1 对初始缺陷、节点半刚性的量化讨论

### 1.1 构件的综合初始缺陷

钢管脚手架由于其临时杆系结构、重复使用等特性,其缺陷是灵敏度较高,《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ130-2011)中规定<sup>[5]</sup>,以 $3L/1000$ 作为钢管弯曲的允许偏差。但由于重复使用,对缺陷产生积攒效应,实际弯曲会高于规范规定。杨青雄等<sup>[6]</sup>对钢管初始弯曲实测为 $L/220$ 。本文以此作为钢管初始弯曲参考值,并参考《钢结构设计标准》GB 50017-2017<sup>[7]</sup>中对构件初始缺陷的规定情况,以半个正弦波进行模拟见图1,通过下面表达式进行规定。

$$\delta_0 = e_0 \sin \frac{\pi x}{l} \quad (1)$$

式中:  $\delta_0$  为距离构件端部  $x$  处的初始变形值;  $e_0$  为构件中点处的初始变形值;  $x$  离构件端部的距离;  $l$  为构件的总长度;  $e_0/l$  为构件的综合初始缺

陷代表值。构件的初始缺陷包含构件的初始弯曲和残余应力,综合考虑以上两个因素,采用 perry 公式分别反算出考虑  $3L/1000$ 、 $L/220$  的初始弯曲和特定残余应力下的构件综合初始缺陷参考值,以此来表征构件的  $P-\delta$  效应,将构件的初始缺陷定量化为直接分析法设计的实现做好铺垫。

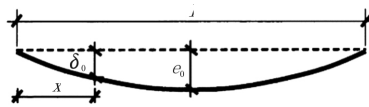


图1 构件初始几何缺陷

Fig. 1 Initial geometric defects of the component

本文通过 ANSYS 分析  $3L/1000$ 、 $L/220$  的初始弯曲和特定残余应力下的钢管的极限承载力,通过对不同计算长度和初始缺陷的批量计算最终绘制出不同初始缺陷下的柱子曲线,结合 17 钢标中 Q235b 类截面的柱子曲线和计算公式,通过 MATLAB 拟合得到考虑初始缺陷的参数取值,由此反算出构件的综合初始缺陷参考值,具体步骤如下:采用 ANSYS 模拟,以 beam188 单元模拟钢管,以半个正弦波模拟初始弯曲,两端铰接,上侧施加在上侧施加轴心力  $F$  直到钢管屈服。打开高阶形函数开关,采用弧长法进行非线性分析。所建模型见图2(考虑  $L/1000$  初始弯曲放大 20 倍呈现),钢管材料特性为 Q235b 类截面,几何特性见表 1。

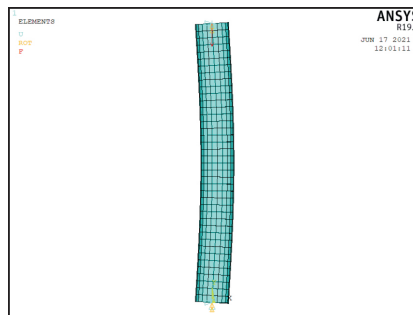


图2  $L/1000$  初弯曲轴压钢管模型

Fig. 2  $L/1000$  Initial bending crankshaft compression steel tube model

17 钢标中考虑了  $L/1000$  的初始弯曲和特定残余应力, b 类截面  $\varphi-\lambda_n$  计算公式为<sup>[7]</sup>。

当  $\lambda_n \geq 0.215$  时,

$$\varphi = 1 - a_1 \lambda^2 \quad (2)$$

当  $\lambda_n > 0.215$  时,

$$\varphi = \frac{1}{2\lambda_n^2} \left[ (a_2 + a_3 \lambda_n + \lambda_n^2) - \sqrt{(a_2 + a_3 \lambda_n + \lambda_n^2)^2 - 4\lambda_n^2} \right] \quad (3)$$

表1 钢管的几何特性

Tab.1 Geometric characteristics of steel tubes

外径 $D/\text{mm}$	壁厚 $t/\text{mm}$	截面积 $A/\text{mm}^2$	惯性矩 $I/\text{mm}^4$	截面模量 $W/\text{mm}^3$	回转半径 $i/\text{mm}$	每米质量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$
48	3	424.12	107 831.20	4 492.97	15.95	3.33

其中:  $a_1=0.65$ ,  $a_1=0.965$ ,  $a_1=0.300$

欧拉公式给出的计算公式为

$$\varphi = 1/\lambda_n^2 \quad (4)$$

对比三者得到的稳定系数  $\varphi$  与正则化长细比  $\lambda_n$  的曲线图, 见图3.

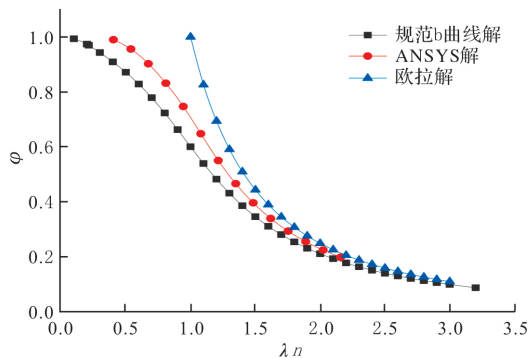


图3 L/1000 初弯曲下的柱子曲线

Fig.3 Column curve under initial bending of L/1000

从图可得, 欧拉解为柱子曲线的上界, 所得到的 ANSYS 解略大于规范解, 以此差值作为钢管特定残余应力对钢管稳定系数的影响量, 便可做出考虑 3L/1000、L/220 初弯曲和特定残余应力的柱子曲线见图4.

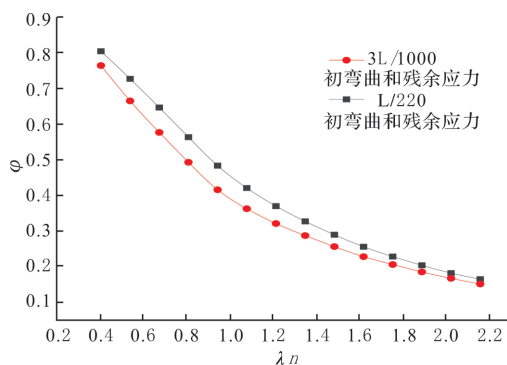


图4 考虑不同初弯曲和残余应力的柱子曲线

Fig.4 Column curves considering different initial bending and residual stresses

将上述综合考虑几何和材料初始缺陷的柱子曲线拟合成规范表达式形式:

$$\varphi = \frac{1}{2\lambda_n^2} \left[ (b_1 + b_2 \lambda_n^2) - \sqrt{(b_1 + b_2 \lambda_n + \lambda_n^2)^2 - 4\lambda_n^2} \right] \quad (5)$$

其中,  $b_1$ 、 $b_2$  参数见表2.

表2  $b_1$ 、 $b_2$  参数表Tab.2 Parameters of  $b_1$  and  $b_2$ 

参数	3L/1000		L/220	
	$b_1$	$b_2$	$b_1$	$b_2$
参值值	0.9306	0.6896	0.8585	1.026

由 Perry 公式:

$$\varphi = \frac{1}{2\lambda_n^2} \left\{ (1 + \epsilon_0) + \lambda_n^2 - \sqrt{[(1 + \epsilon_0) + \lambda_n^2]^2 - 4\lambda_n^2} \right\} \quad (6)$$

其中

$$\epsilon_0 = \frac{Ae_0}{W} \quad (7)$$

$\epsilon_0$  为等效初始偏心率,  $e_0$  为构件的初始弯曲跨中挠度,  $A$  为截面面积,  $W$  为截面模量, 对比表达式(5)可以将  $\epsilon_0$  用  $b_1$ 、 $b_2$  表示.

$$\epsilon_0 = b_1 + b_2 \lambda_n - 1 \quad (8)$$

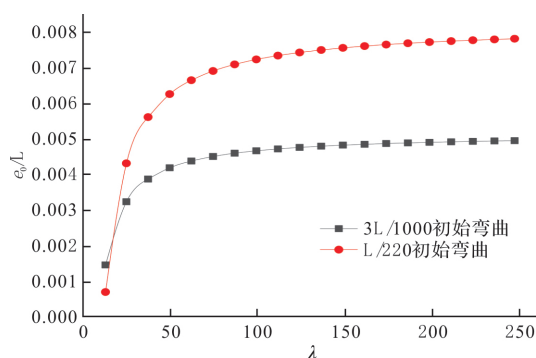
由于  $b_1$ 、 $b_2$  在计算时同时考虑了杆件的几何和材料缺陷, 故此  $\epsilon_0$  将构件的综合初始缺陷用几何缺陷表示, 于是将式(7)化简得到构件的综合初始缺陷参考值  $e_0/l$ .

$$\frac{e_0}{l} = \frac{i}{y\lambda} \cdot \left( b_1 + b_2 \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} - 1 \right) \quad (9)$$

式中:  $\lambda$  为长细比;  $i$  为回转半径;  $f_y$  为屈服强度;  $E$  为弹性模量. 由上式得到  $e_0/l$  与  $\lambda$  关系, 由于  $\lambda_0 > 0.215$ , 并且钢管作为满堂支架支撑的最大容许长细比 250<sup>[5]</sup>, 故此时长细比  $\lambda$  取值范围  $11.63 < \lambda \leq 250$ , 在此范围下可得到求得不同初始弯曲下的  $e_0/l - \lambda$  曲线见图5. 取最大值  $e_0/l$  作为等效初始缺陷参考值, 由图5可得当考虑 3L/1000 初弯曲时, 综合初始缺陷取值为 L/210, 当考虑 L/220 初弯曲时, 综合初始缺陷取值为 L/130. 由此结论给出建议: 当钢管为周转使用次数较少时, 建议以钢管长度的 1/210 作为综合初始缺陷考虑  $P - \delta$  效应, 当钢管周转次数较多时, 建议以钢管长度的 1/130 作为钢管综合初始缺陷考虑  $P - \delta$  效应.

## 1.2 整体初始缺陷

扣件式钢管模板支架属于缺陷敏感性结构, 整体初始缺陷的取值对其稳定承载力会有较为明显的影响, 因此有必要对整体初始缺陷的取值进

图5 不同初始弯曲下的  $e_0/l-\lambda$  曲线图Fig. 5  $e_0/l-\lambda$  curves at different initial bends

行量化讨论,才能使分析结果更为精确.模拟结构整体初始缺陷主要有以下三种方法:①通过直接施加结构的初始水平位移获取,施加放向考虑荷载最不利组合放向,最大水平位移在结构顶部取得,其余位置进行线性调整.最大水平位移取值参考《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ130-2011)中在脚手架检查与验收章节规定,满堂支撑架立杆垂直度的允许偏差为立杆高度的  $3/1000$ <sup>[5]</sup>,也可根据现场预拼装精确测量获得.②通过施加假想水平力来模拟结构的整体初始缺陷.胡长明<sup>[8]</sup>提出施加极限承载力的  $1.2\% \sim 2.5\%$  作为假想水平力来考虑整体初始缺陷,其有限元结果与试验结果拟合度较好.③一致缺陷模态法:即以特征值屈曲分析的最低阶屈曲模态作为初始缺陷的模拟形态,此方法求得的结构整体势能最小,可得到结构最低极限承载力,偏于安全.整体初始缺陷取值可参考 17 钢标中取结构高度的  $1/250$  考虑结构的  $P-\Delta$  效应.

### 1.3 节点半刚性连接

直接分析法对扣件式钢管模板支架分析除了考虑  $P-\Delta$  效应、 $P-\delta$  效应以外,连接节点的半刚性也是重要考虑因素之一.在此很多学者对扣件式钢管支架节点半刚性做了深入研究,郭艳<sup>[9]</sup>通过节点试验研究数值分析得出节点刚度在  $20 \sim 60 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}$  范围变化时对其模板支架极限承载力影响较大.胡长明<sup>[8]</sup>给出直角扣件节点抗扭初始刚度建议值为  $60 \sim 90 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}$ .陆征然<sup>[11]</sup>通过试验与有限元结果对比,建议在实际计算中取  $19 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}$  作为节点转动刚度.由此可见扣件节点半刚性离散性较大,建议在进行扣件式钢管模板支架的设计计算前,进行节点刚度试验确定节点半刚性取值,在分析计算中可采用初始刚度考虑节点转动刚度,或直接带入试验得到的节点非线性弯矩转角曲线,如此可得到较为精确的结果.

## 2 试验实测

### 2.1 试验目的

本试验旨在测得扣件式钢管模板支架在不同工况下的极限稳定承载力与立杆的实际变形,来探究在直接分析法下得到的计算结果与实际测量结果是否一致.以此来制定搭设方案以及分级加载足尺试验<sup>[12-13]</sup>.

### 2.2 搭设方案介绍

为测得脚手架实际承载力以及在不同搭设参数下的承载力和杆件变形,试验采用五种不同的搭设方案来对整架承载力和杆件变形进行考察.其中包括步距、横距、剪刀撑三种搭设参数对整架承载力的影响,五种方案见表 3,其中每种方案的搭设高度为  $6 \text{ m}$ ,扫地杆距地  $150 \text{ mm}$ ,立杆顶端伸出长度为  $100 \text{ mm}$ .工况一为参照试验项,不设剪刀撑,纵距  $1.16 \text{ m}$ ,横距  $1.2 \text{ m}$ ,步距  $1.436 \text{ m}$ ,支架尺寸为  $5.8 \text{ m} \times 3.6 \text{ m} \times 5.994 \text{ m}$ ,其他四种工况为对比试验考察该参数对整体承载力的影响.加载情况为采用千斤顶对分配梁系统施加竖向荷载,分配梁系统可将竖向荷载均匀传递至立杆顶端,以保证施加的竖向荷载传递到立杆时同步、均匀,直至到千斤顶出现回油现象,整架体系丧失承载能力.

表3 不同搭设参数设置的搭设方案

Tab. 3 Setting schemes of different setting parameters

搭设方案	纵距	横距	步距	剪刀撑 (纵向)	剪刀撑 (横向)
1	1.16	1.20	1.436	无	无
2	1.16	1.436	1.436	无	有
3	1.16	1.20	1.436	有	有
4	1.16	1.20	1.148	有	有
5	0.90	1.20	1.148	有	有

### 2.3 测点布置

为了探究杆件在不同荷载下的实际变形,试验选用单项应变片贴于各个立杆并用经纬仪测量在荷载作用下沿  $x$ 、 $y$  方向的变形,其中立杆测点布置见图 6,立杆应变片所贴位置见图 7.

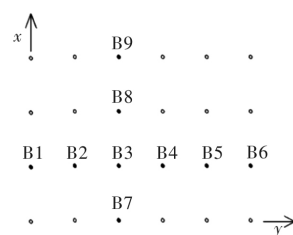


图6 立杆测点平面布置

Fig. 6 Plane arrangement of measuring points of vertical



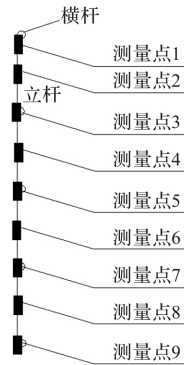


图 7 立杆纵向监测点布置

Fig. 7 Arrangement of vertical monitoring points of vertical poles

## 2.4 实验结果

通过上述试验,测得各个搭设模式下整架的极限稳定承载能力,见表 4;测量并绘制工况 4 下 B1、B3、B6 杆顶端在不同荷载下的变形位移,测量并绘制工况 3、4、5 下(带剪刀撑)的 B1 立杆杆端变形位移,见图 8、图 9。

表 4 各工况极限稳定承载力

Tab. 4 Ultimate stable bearing capacity under various working conditions

工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
31.25	37.25	72.5	82.5	85.00

注:单位 kN

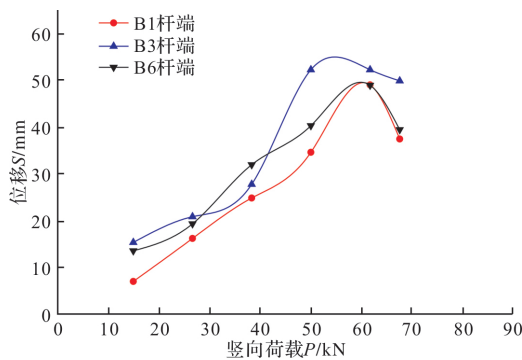


图 8 工况 4 下的 B1、B3、B6 杆端荷载位移曲线

Fig. 8 Load displacement curve of B1, B3, B6 rod end under working condition 4

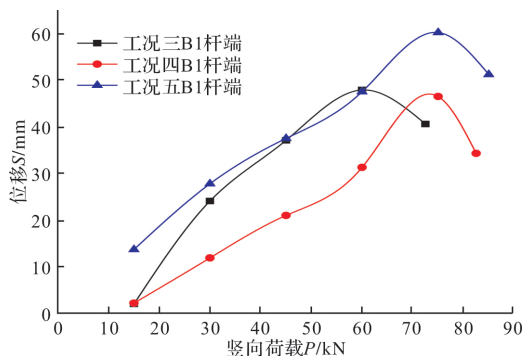


图 9 工况 3、4、5 下的 B1 杆端荷载位移曲线

Fig. 9 Load displacement curve of B1 rod end under working condition 3, 4, 5

## 3 模拟分析验证

### 3.1 扣件式钢管模架直接分析法介绍

扣件式模板支架体系节点由扣件连接,因此节点在受力过程中会发生转动变形,即节点刚度存在半刚性情况,半刚性是介于刚接和铰接之间的,在受力状态下既会发生转动,又能承受弯矩<sup>[14]</sup>。另外,由于该体系杆件存在初弯曲等初始缺陷会存在较大的  $P-\Delta-\delta$  效应,在对扣件式钢管模架进行内力计算时需要考虑这两种因素的影响。

直接分析法是一种二阶非线性分析方法,是在考虑结构和构件的初始变形下的几何和材料的非线性分析方法,在受力分析中可获得真实的结构响应,在杆件承载力校验方面只需校核截面承载力即可,在设计过程中具有简单真实高效等优点。该方法目前已进入到钢结构规范中,对于扣件式钢管模板支架体系,该方法可以更加真实反映结构响应,在分析过程中考虑到初始缺陷和二阶效应以及节点半刚性对结构内力分布的影响,并优化设计流程,比传统的计算长度系数法有明显的优势<sup>[15-16]</sup>。

### 3.2 SAP2000 模拟分析

为验证直接分析法在扣件式模板支架体系中有较好的适用性,本文采用 SAP2000 软件对试验所得的五个工况进行模拟分析,通过 SAP2000 对试验测得的五个工况进行屈曲分析和非线性静力分析,绘制荷载位移曲线并依据荷载位移曲线收敛的极值点确定该工况下的极限荷载,并与试验所得极限稳定承载力进行对比分析,以此来考察直接分析法在扣件式钢管脚手架的适用性。其中,将结构的初始几何缺陷、 $P-\Delta$  效应、 $P-\delta$  效应、节点半刚性等处理叙述如下:

(1)结构的初始几何缺陷顶部以结构高度的  $3/1000$  施加水平位移,其余位置进行线性调整。

(2) $P-\Delta$ : 通过定义荷载工况进行设置,采用非线性、P-Delta,后续分析(包含模态分析)为了保持结构的刚度一致,均记做 P-Delta,并采用线性分析。

(3) $P-\delta$ : 在 P-Delta 下来定义构件的挠度,通过杆件剖分确定  $\delta$ ,该模拟过程采用 4 个剖分点。

(4)节点半刚性:节点半刚性可以通过释放水平杆两端的端部刚度来实现。本文设置转动弹簧,释放水平杆两端的端部刚度为  $40 \text{ kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{[9]}$ ,

来模拟该体系下的节点半刚性问题。

(5)其他：本模型所有工况下立杆与底部约束视为铰接，剪刀撑与立杆及横杆的交接处视为铰接。

3.3 计算对比分析

模拟分析得到不同工况下的极限稳定承载力与试验结果误差见表 5，B1 杆顶端在工况 3、4、5 下的荷载位移曲线并与试验测得的数据进行对比分析，见图 10、图 11、图 12。通过对比分析可以

看出，在误差允许范围内，模拟分析与实验数据吻合度较好，表 5 中工况 1 极限稳定承载力误差值最低。在图 10、图 11、图 12 中 B1 杆端位移的数据下，工况 3、工况 4 和工况 5 的杆端位移荷载曲线与试验检测数据相符。综上分别从极限稳定承载力以及杆端位移两角度表明，采用直接分析法所得结果与试验有较好的吻合度。分析表明，直接分析法对扣件式钢管模架体系具备适用性和可靠度。

表 5 各工况在 SAP2000 模拟下极限稳定承载力与误差值

Tab. 5 Ultimate stability bearing capacity and error value of each working condition under sap2000 simulation

工况	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
模拟极限稳定承载力/kN	29.63	34.34	67.28	75.98	78.54
误差值/%	5.2	7.8	7.2	7.9	7.6

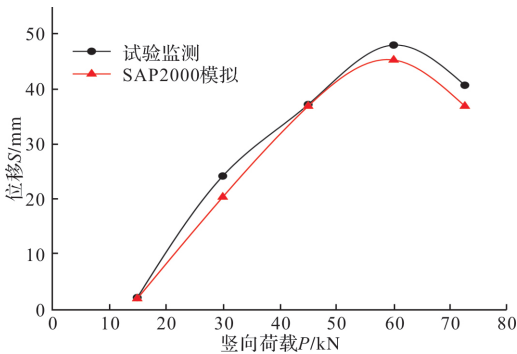


图 10 工况 3 下 B1 杆端位移荷载曲线对比分析

Fig. 10 Comparative analysis of B1 rod end displacement load curve under working condition 3

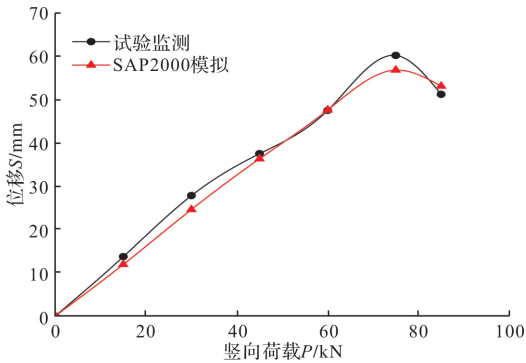


图 12 工况 5 下 B1 杆端位移荷载曲线对比

Fig. 12 Comparative analysis of B1 rod end displacement load curve under working condition 5

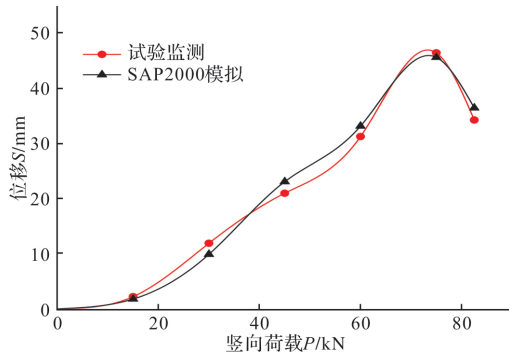


图 11 工况 4 下 B1 杆端位移荷载曲线对比分析

Fig. 11 Comparative analysis of B1 rod end displacement load curve under working condition 4

4 结论

本文通过直接分析法对试验实测的扣件式模板支架体系进行受力分析，得到以下结论：

(1)从定量分析来看，分析结果表明该方法与试验所测数据吻合度较高。从定性分析来看，该方法相比于传统的计算长度系数法更为直观精确，

在扣件式钢管模板支架体系中具有有良好的适用性。

(2)直接分析法对扣件式模板支架体系的初始缺陷、二阶效应、节点半刚性等特点具备明确性和针对性，能较好的适用于扣件式钢管模架体系，为该体系更好的进行内力分析设计奠定基础。

(3)直接分析法摒弃计算长度系数，转而在结构内力计算中直接考虑二阶效应和初始缺陷等因素，将稳定性计算过程转化为截面强度校核过程从而优化了设计流程，提高了设计结果的准确度和设计效率。后续需要对扣件式钢管模板支架的整体和构件初始缺陷以及非线性节点半刚性取值进行规范，才能更好的将直接分析设计应用于扣件式钢管模板支架体系中。

参考文献 References

[1] 舒赣平,刘伟,陈绍礼.半刚性钢框架的直接分析方法理论研究[J].建筑结构学报,2014,35(8):142-150.  
SHU Ganping, LIU Wei, CHEN Shaoli. Theoretical research on direct analysis method for semi-rigid steel

- frames[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(8):142-150.
- [2] 刘坚. 基于结构极限承载力的轻型钢框架结构的计算理论及应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2003.
- LIU Jian. Study on the calculation theory and application for lightweight steel frame structure based on structural ultimate bearing capacity[D]. Chongqing University, 2003.
- [3] 潘新忠. 钢管脚手架的非线性分析模型、现场试验及规范校准研究[D]. 南宁:广西大学,2018.
- PAN Xinzong. Study on Nonlinear analysis model, field test and specification calibration of steel tubular scaffold[D]. Nanning:Guangxi University, 2018.
- [4] 刘伟,舒赣平. 直接分析设计法中的受压构件等效初始缺陷研究[J]. 建筑结构学报,2021,42(6):199-205.
- LIU Wei, SHU Ganping. Research on equivalent initial imperfections of compression members in direct analysis design method[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(6):199-205.
- [5] 住房和城乡建设部. 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范:JGJ 130-2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- MOHURD. Technical code for safety of steel pipe scaffold with coupler in construction: JGJ 130-2011 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.
- [6] 杨青雄. 实测缺陷对扣件式钢管脚手架结构极限承载力的影响分析[D]. 西安:长安大学,2014.
- YANG Qingxiong. The ultimate bearing capacity of fastener type steel pipe scaffold structure influence analysis based on measured imperfection[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [7] 住房和城乡建设部. 钢结构设计规范:GB 50017-2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- MOHURD. Code for design of steel structures: GB 50017-2017[S]. Beijing: China Building and Building Press, 2017.
- [8] 胡长明,曾凡奎. 扣件式钢管模板支架的试验和数值模型研究[J]. 工程力学,2010,27(S2):280-283,293.
- HU Changming, ZENG Fankui. A study of experiment and numerical model on coupler steel tube falsework[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(S2):280-283,293.
- [9] 郭艳. 模板支架承载特性及其节点半刚性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.
- GUO Yan. Study on the bearing capacity and semi-rigid node of steel tubular scaffold[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2016.
- [10] 胡长明. 扣件联接钢结构的试验及其理论研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.
- HU Changming. Studies on experiment and theory of steel construction connected with fasteners[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [11] 陆征然. 扣件式钢管满堂支架体系理论分析与试验研究[D]. 天津:天津大学,2010.
- LU Zhengran. Theoretical analysis and experimental research on coupler type full steel tube supporting system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [12] 曾凡奎,李昌华,李新闻,等. 扣件式钢管高大模板支架现场试验研究[J]. 施工技术,2009,38(8):60-61,69.
- ZENG Fankui, LI Changhua, LI Xinwen, et al. Experimental study on high formwork support system of fastener-style steel pipe[J]. Construction Technology, 2009, 38(8):60-61,69.
- [13] 曾凡奎,胡长明,闫鑫,等. 扣件式钢管模板支架稳定性试验研究[J]. 工业建筑,2010,40(2):28-31.
- ZENG Fankui, HU Changming, YAN Xin, et al. Experimental study on stability of coupler steel tube falsework[J]. Industrial Construction, 2010, 40(2):28-31.
- [14] 王智,范立军,杨迪,等. 考虑节点半刚性与二阶效应的高大模板支撑体系分析模型[J]. 施工技术,2017,46(S1):385-389.
- WANG Zhi, FAN Lijun, YANG Di, et al. Analysis model of high formwork support system considering semi-rigid connection characteristic and second-order effect[J]. Industrial Construction, 2017, 46(S1):385-389.
- [15] 钟鑫伟,窦超,王垆涛,等. 直接分析法与计算长度法的对比应用[C]//第十八届全国现代结构工程学术研讨会论文集(四). 北京:工业建筑,2018.
- ZHONG Xinwei, DOU Chao, WANG Lutaotao, et al. Comparison and application between the direct analysis method and the effective length method[C]//Proceedings of the 18th National Symposium on Modern Structural Engineering (IV). Beijing: Industrial Construction, 2018.
- [16] 胡长明,郭艳,梅源,等. 模板支撑系统承载性能的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49(2):179-186.
- HU Changming, GUO Yan, MEI Yuan, et al. Experimental research on the bearing capacity of fastener tubular steel scaffold[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(2):179-186.

(编辑 桂智刚)