

DOI: 10.7672/sjgs2026080139

# 地下工程盘扣式钢管支撑架侧向承载性能与 计算方法研究\*

施耀锋

(上海隧道工程有限公司, 上海 200032)

[摘要] 在地下工程混凝土侧墙浇筑过程中, 盘扣式脚手架常被用作侧向支撑结构以承受侧向水平荷载, 这对其侧向承载力和刚度提出了要求。盘扣式脚手架侧向承载性能与竖向承载性能存在明显不同。为此, 对盘扣式钢管支撑架侧向承载性能与计算方法开展试验研究、有限元分析与理论分析。侧向荷载下的足尺承载力试验结果表明: 支撑架表现出中部侧向位移大、上下两端侧向位移小的基本变形特征, 破坏模式包括下部立杆弯剪破坏、斜撑杆受压屈曲破坏及连墙件破坏。通过采用线性梁单元模拟钢管构件、采用弹簧单元模拟盘扣式节点的半刚性特性, 所建立的有限元模型能准确模拟盘扣式钢管支撑架侧向承载性能。基于刚度特征, 可将下端地锚梁简化为铰支座、上端连墙件简化为弹簧支座, 从而建立设置弹簧支座的简支梁模型, 用于计算侧向荷载作用下盘扣式钢管支撑架最大侧向位移。

[关键词] 地下工程; 钢管支撑架; 试验; 有限元分析; 位移

[中图分类号] TU745.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0139-05

## Lateral Bearing Performance and Calculation Method of Disk Lock Steel Tubular Support Frame in Underground Engineering

SHI Yaofeng

(Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

**Abstract:** In side-wall concrete pouring projects of underground engineering, the disk lock scaffold was often used as a lateral support structure to bear lateral horizontal loads, which required to concerned its lateral bearing capacity and lateral stiffness. The lateral load-bearing behavior and vertical load-bearing behavior of disk lock scaffold were significantly different. The experimental research, finite element analysis and theoretical analysis on the lateral bearing performance and calculation method of disk lock steel tubular support frame were conducted. The full-scale bearing capacity tests of the disk lock steel tubular support frame under lateral load showed that the support frame exhibited the deformation characteristics of large lateral displacement in the middle and small lateral displacement in the upper and lower parts. The failure modes included the bending and shearing failure of the lower standards, the compression and buckling failure of the diagonal braces, and the failure of the tie components. The linear beam elements were adopted to simulate the steel tube components, and the spring elements were used to simulate the semi-rigid characteristics of the disk lock joints. The established finite element model could accurately simulate the lateral bearing performance of disk lock steel tubular support frame. Through the simply supported beam model with spring supports, the maximum lateral displacement of the disk lock steel tubular support frame under lateral load could be calculated. According to its stiffness characteristics, the lower ground anchor beam was simplified as a hinged support, while the upper wall tie was simplified as a spring support, so as to establish a simply supported beam model with a spring support, which was used to calculate the maximum lateral displacement of the disk lock steel tubular

\* 上海市科技计划项目(23DZ1202903)

[作者简介] 施耀锋, 高级工程师, E-mail: syfstec@163.com

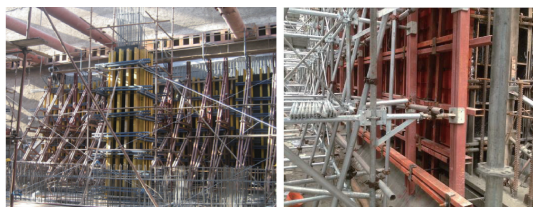
[收稿日期] 2025-10-10

support frame under lateral load.

**Keywords:** underground engineering; steel tubular support frame; testing; finite element analysis; displacement

## 0 引言

脚手架作为工人的操作平台及支撑结构构件的临时性结构,在土木工程施工领域扮演着极为重要的角色。其中,盘扣式脚手架因优良的力学性能、便于安拆的特点逐渐得到大力推广和广泛应用<sup>[1-2]</sup>。在地下工程混凝土侧墙浇筑过程中,盘扣式脚手架常被用作侧向支撑结构,承受侧向水平荷载<sup>[3-4]</sup>,如图1所示,这对其侧向承载力和侧向刚度提出了要求。



a 三角桁架式支撑架 b 盘扣式钢管支撑架

图1 承受侧向荷载的钢管支撑架结构

Fig.1 Steel tubular support frame structure bearing lateral load

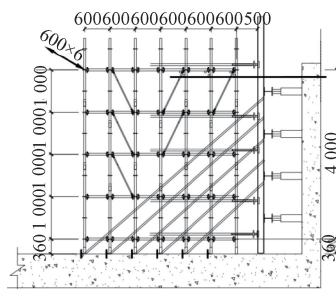
现有研究主要关注在竖向荷载作用下脚手架承载性能,包括节点性能、整架性能及计算理论。文献[5-6]研究了盘扣式节点转动特性,研究结果表明,盘扣式节点为半刚性节点,其转动刚度为 $30\sim 40(\text{kN}\cdot\text{m})/\text{rad}$ 。文献[7-9]针对扣件式钢管脚手架在竖向荷载作用下的承载性能开展了足尺试验研究,试验结果表明,立杆受压屈曲和扣件断裂为其主要破坏模式。文献[10-11]采用有效长度法,提出了盘扣式脚手架在竖向荷载作用下极限承载力的计算方法,但在横向荷载作用下,脚手架立杆将承受弯剪作用,横杆成为传递侧向荷载的重要构件,侧向固定构造措施和斜撑杆更重要,这与盘扣式脚手架竖向承载性能显著不同,使已有结论和方法不再适用。

在上述背景下,本文开展了盘扣式钢管支撑架侧向承载性能与计算方法研究,进行侧向荷载作用下盘扣式钢管支撑架承载性能足尺试验,完成盘扣式钢管支撑架侧向承载性能有限元分析,并提出盘扣式钢管支撑架侧向位移计算方法。研究成果可为盘扣式钢管支撑架用作侧向支撑结构提供设计依据。

## 1 试验研究

### 1.1 试验设计

为测试盘扣式钢管支撑架在侧向荷载作用下极限承载力,在实验室搭设足尺试件,并进行侧向加载试验,如图2所示。支撑架沿加载方向和垂直于加载的水平方向均设置6跨,横杆步距为1m,立杆纵、横距均为0.6m。立杆为直径48mm钢管,材质为Q355B钢;横杆为直径48mm钢管,材质为Q235B钢。支撑架下部侧移由6道地锚梁限制,上部侧移由3道直径48mm纵向钢管与连墙杆扣件连接限制,中部侧移由5道斜撑杆限制。斜撑杆与盘扣式钢管通过旋转扣件相连,两端分别支承于地基和分配架。



a 架体布局与尺寸



b 试验现场

图2 盘扣式钢管支撑架侧向承载力足尺试验

Fig.2 Full-scale test of lateral bearing capacity of disk lock steel tubular support frame

侧向荷载由8台并联的50t液压千斤顶施加。由千斤顶施加的水平集中力,通过由12根工字钢梁组成的分配架传递给脚手架,分配架可模拟混凝土浇筑过程中侧墙模板的作用。脚手架与分配架间由横向钢管及水平托撑相连。

采用分级加载制度,每级总荷载增加100kN,并持荷5min,荷载由力传感器显示和控制。当侧向荷载达到峰值无法继续增大时,停止加载,此时可认定脚手架失效并达到最大承载力。

在支撑架两侧布置位移传感器,测试其各部位沿加载方向的侧移值,如图3所示。

### 1.2 试验现象分析

随着侧向荷载增大,架体中部在加载方向产生较明显的侧向弯曲变形,如图4所示。这是由于脚手架上部和下部分别被连墙杆和地锚梁约束刚度,具有较大侧向刚度;而脚手架中部变形主要由斜撑杆和立杆抗弯约束,其抗侧刚度小于连墙杆和地锚

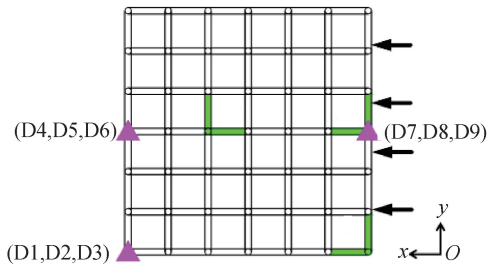


图3 位移计布置平面

Fig. 3 Layout plan of displacement meters

梁约束刚度,因此架体侧向位移分布表现出中部大、上下两端小的基本特征。



图4 侧向荷载作用下盘扣式钢管支撑架整体变形模式

Fig. 4 Overall deformation mode of disk lock steel tubular support frame under lateral load

加载期间,由于连墙杆及斜撑杆处扣件变形,不断发生响声。当加载至约 1 200kN 时,伴随几声巨响,上部连墙杆处扣件断裂掉落,荷载突降,脚手架达到极限状态。

前排立杆由于向侧方弯曲变形,其底部脱离地面,如图 5a 所示。立杆底部在地锚梁反力作用下弯剪变形显著,如图 5b 所示。斜撑杆因承受较大压力而发生屈曲变形,其上扣件发生断裂脱落,如图 5c 所示。架体上部与连墙杆扣接的纵向钢管向加载方向弯曲变形显著,如图 5d 所示。

### 1.3 侧向荷载-位移曲线分析

盘扣式钢管支撑架在侧向荷载作用下,各部位侧向荷载-位移曲线如图 6 所示。可以看出,当荷载接近极限值时,侧向位移增长速度变快,表明其侧向刚度减弱。脚手架下部被地锚梁约束,侧向位移最小;中部和上部侧向位移较大,中部侧向位移略大于上部,这与 1.2 节中观察到的试验现象一致。

试验中,盘扣式钢管支撑架在侧向荷载作用下的极限承载力为 1 230kN、最大侧向位移为 41.6mm,侧压力为 40kN/m<sup>2</sup> 时的最大侧向位移为 15.5mm。试验结果可为盘扣式钢管支撑架用作地

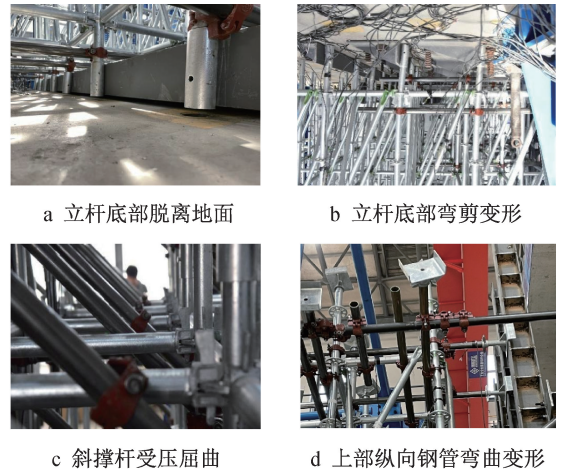


图5 侧向荷载下盘扣式钢管支撑架局部破坏模式

Fig. 5 Local failure modes of disk lock steel tubular support frame under lateral load

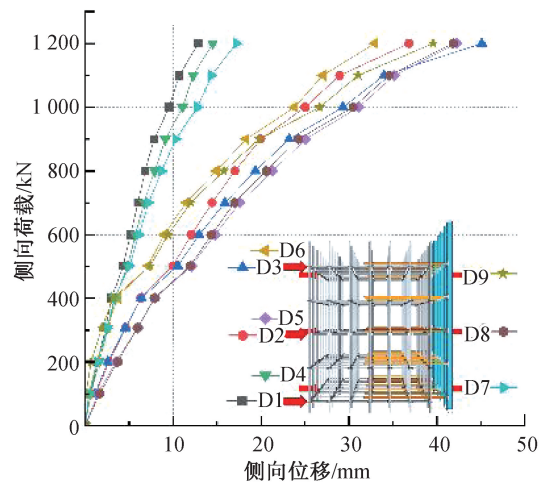


图6 荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves

下工程侧墙模板支撑结构及其他侧向支撑结构提供参考。

## 2 有限元分析

### 2.1 有限元模型建立

采用空间 2 结点线性梁单元(B31)模拟盘扣式钢管支撑架立杆、横杆和斜撑杆,钢管材料特性采用理想弹塑性。鉴于盘扣式节点的半刚性特性<sup>[5-6]</sup>,采用弹簧单元将横杆与立杆盘扣节点绑定,弹簧转动刚度设置为 35(kN·m)/rad;斜杆则铰接于立杆盘扣式节点。限制立杆上、下两端沿加载方向的侧向位移,以模拟地锚梁、连墙件对盘扣式钢管支撑架的侧向约束;对支撑架模型施加侧向集中力。建立的有限元模型如图 7 所示。

### 2.2 计算结果与分析

有限元分析计算结果如图 8 所示。由图 8a 可知,支撑架斜撑杆及靠近地锚梁和连墙件的立杆、

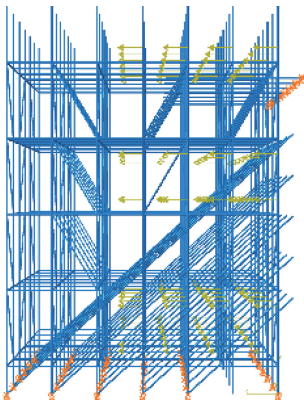


图 7 盘扣式钢管支撑架有限元模型

Fig. 7 Finite element model of disk lock steel tubular support frame

斜杆、横杆应力较大。这是由于地锚梁和连墙件附近的杆件传递较大支座反力。横杆在横向荷载传递中也起到至关重要的作用,这与竖向荷载工况下的传力路径明显不同。由图 8b 可知,有限元模型的变形模式与试验结果基本一致,呈中部侧向位移最大、下部侧向位移最小的特征。

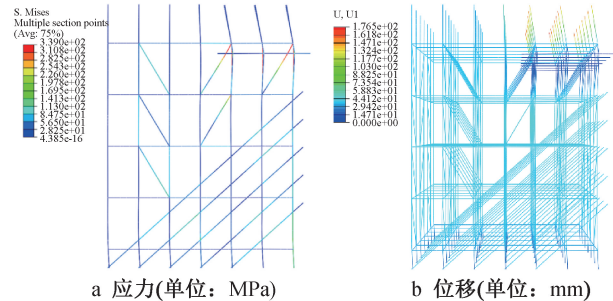


图 8 有限元分析计算结果

Fig. 8 Calculation results of finite element analysis

盘扣式钢管支撑架在侧向荷载作用下侧向位移的试验结果与有限元分析计算结果对比如图 9 所示。由图 9 可知,本文建立的有限元模型能较好地反映盘扣式钢管支撑架在侧向荷载作用下的变形模式。

### 3 盘扣式钢管支撑架侧向位移计算方法

#### 3.1 计算模型简化

由图 4 可知,盘扣式钢管支撑架在侧向荷载作用下的整体变形模式表现为中部大、上下两端小的基本特征,立杆变形特征与简支梁在多组集中荷载作用下的变形特征基本一致。因此,采用简支梁模型计算盘扣式钢管支撑架侧向位移;下端地锚梁侧向刚度较大,简化为铰支座;上端连墙件侧向刚度弱于地锚梁,简化为弹簧支座,如图 10 所示。简支梁截面参数同立杆。

由试验结果可知,斜撑杆也为支撑架提供了较大侧向刚度,可减小支撑架中部侧向位移。可通过

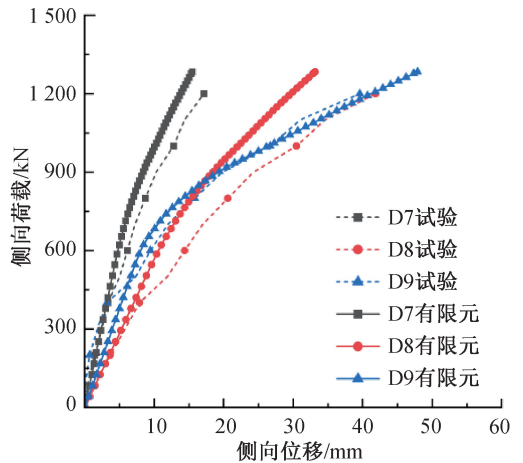


图 9 侧向位移试验结果与有限元分析计算结果对比  
Fig. 9 Comparison of lateral displacement between test and finite element analysis results

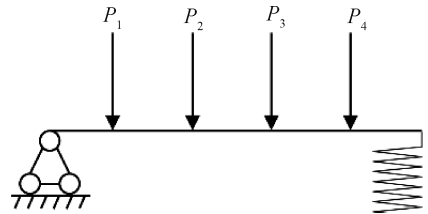


图 10 边界条件简化

Fig. 10 Simplification of boundary conditions

在简支梁下方设置弹簧支座,以考虑斜撑杆的支承作用,如图 11 所示。

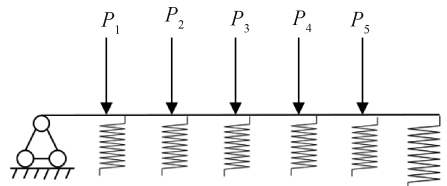


图 11 斜撑杆布置

Fig. 11 Arrangement of diagonal struts

#### 3.2 侧向位移计算

在单个集中荷载作用下,图 10 中一端带弹簧支座的简支梁挠度  $w(x)$  可采用式(1)计算<sup>[12]</sup>:

$$w(x) = \begin{cases} \frac{Px(L-a)}{6EI} \left[ L^2 - (L-a)^2 - x^2 + \frac{6EI}{kL} \right] + \frac{P(L-a)}{kL} & 0 \leq x \leq a \\ \frac{P(L-a)}{6EI} \left\{ \frac{L}{L-a} (x-a)^3 + \left[ L^2 - (L-a)^2 + \frac{6EI}{kL} \right] x - x^3 \right\} + \frac{P(L-a)}{kL} & a < x \leq L \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P$ 为集中荷载; $x$ 为计算截面与支座距离; $L$ 为梁跨度; $a$ 为集中荷载与支座距离; $k$ 为弹簧刚度; $EI$ 为梁(立杆)抗弯刚度。

在多个集中荷载作用下,将式(1)计算结果进行叠加,可得到图10中梁(立杆)各截面挠度。

在图11中,当简支梁下方设置有弹簧支座时,其任意截面挠度 $w(x)$ 可通过求解微分方程式(2)得到<sup>[13]</sup>:

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + kw(x) = q(x) \quad (2)$$

式中: $q(x)$ 为作用于梁上的均布荷载,可将图10中集中荷载转换为均布荷载。

结合式(1)、式(2)及试验得到的侧向位移(挠度 $w(x)$ )结果,可得到弹簧刚度 $k$ 。将其代入式(2),可计算不同搭设尺寸下支撑架最大侧向挠度。弹簧刚度和侧向位移计算结果如表1所示,并与有限元分析计算结果(模型SM1,SM2步距均为1.5m,立杆纵、横距均为0.9m,架体高度分别为4.5,5m)进行对比。由表1可知,采用带弹簧支座的简支梁模型可计算盘扣式钢管支撑架在侧向荷载作用下的最大侧向位移,计算结果误差合理。

表1 理论计算与有限元分析最大侧向位移对比

Table 1 Comparison of the maximum lateral displacement between theoretical calculation and finite element analysis

模型	弹簧刚度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$w_{\text{理论}}/mm$	$w_{\text{有限元}}/mm$	误差/ %
SM1	15.3	26.1	28.6	9.6
SM2		42.0	39.9	5.1

## 4 结语

1)在侧向荷载作用下,盘扣式钢管支撑架表现出中部侧移大、上下两端侧移小的基本变形特征。

2)在侧向荷载作用下,盘扣式钢管支撑架破坏模式包括下部立杆弯剪破坏、斜撑杆受压屈曲破坏及连墙件破坏。

3)采用线性梁单元模拟钢管构件,采用弹簧单元模拟盘扣式节点的半刚性特性,可建立盘扣式钢管支撑架有限元模型。

4)采用设置弹簧支座的简支梁模型,可计算盘扣式钢管支撑架在侧向荷载作用下的最大侧向位移。

## 参考文献:

[1] 周潭飞. 盘扣式钢管模板支撑架稳定承载力研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2019.  
ZHOU T F. Study on stability bearing capacity of disc-fastened steel tube formwork supporting frame[D]. Xi'an:Xi'an University

of Architecture and Technology,2019.

- [2] 韩源彬. 盘扣式模板支撑架承载性能研究与应用[D]. 北京:清华大学,2018.  
HAN Y B. Research and application on load-bearing capacity of socket plate fastener type scaffold [D]. Beijing: Tsinghua University,2018.
- [3] 梁斌. 插插式盘扣支架支撑体系在某地铁明挖车站侧墙施工中的应用[J]. 现代隧道技术,2022,59(S2):167-172.  
LIANG B. Application of disk lock steel tubular scaffold system in side wall construction of an open-cut subway station[J]. Modern tunnelling technology,2022,59(S2):167-172.
- [4] 王雁青. 基于承插盘扣式脚手架明挖隧道支撑体系施工[J]. 兰州石化职业技术学院学报,2022(2):19-22.  
WANG Y Q. Construction of open-cut tunnel support system based on socket and ring lock scaffold[J]. Journal of Lanzhou Petrochemical Polytechnic,2022(2):19-22.
- [5] ZHENG Y F, GUO Z X. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplock steel tubular scaffold [J]. Journal of constructional steel research,2021,177:106415.
- [6] PIENKO M, BŁAZIK-BOROWA E. Numerical analysis of load-bearing capacity of modular scaffolding nodes [J]. Engineering structures,2013,48:1-9.
- [7] CHEN Z H, LÜ J C, LIU H B, et al. Experimental and analytical studies on stability of ultra-strong thin-walled steel tube and coupler scaffolds [J]. Engineering structures,2023,275:115255.
- [8] LIU H B, JIA L, WEN S L, et al. Experimental and theoretical studies on the stability of steel tube-coupler scaffolds with different connection joints [J]. Engineering structures,2016,106:80-95.
- [9] LIU H B, ZHAO Q H, WANG X D, et al. Experimental and analytical studies on the stability of structural steel tube and coupler scaffolds without X-bracing [J]. Engineering structures,2010,32(4):1003-1015.
- [10] DONG J F, LIU H Q, LEI M, et al. Effective length correction factor of disc-buckle type scaffolding by considering joint bending stiffness and geometrical size [J]. PLoS one,2022,17(10):e0276340.
- [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 J F. Theoretical and experimental study on stability bearing capacity of disc-buckle type formwork support considering semi-rigid joints [D]. Fuxin: Liaoning Technical University,2022.
- [12] 孙训方. 材料力学(上册)[M]. 北京:高等教育出版社,1994.  
SUN X F. Mechanics of materials (volume I) [M]. Beijing: Higher Education Press,1994.
- [13] 廖俊. 预应力锚索框架梁计算机辅助设计研究[D]. 长沙:中南大学,2014.  
LIAO J. Research on computer-aided design of prestressed anchor frame beam [D]. Changsha:Central South University,2014.