

新型盘扣式钢管支架单元体受力性能研究

王 婧¹, 郑七振¹, 让 梦¹, 龙莉波²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海建工二建集团有限公司, 上海 200080)

摘要: 针对传统承插型盘扣式钢管支架在实际应用中存在的问题, 优化设计了一种新型全工况适应型盘扣式钢管支架体系。为检验新型体系的安全稳定性, 对螺丝盘节点受力性能进行了基本单元体试验研究和节点半刚性有限元分析, 然后对该基本单元体进行 SAP2000 建模分析, 通过对比分析试验值和理论值, 验证有限元分析及试验结果的合理性, 确定节点刚度值的取值范围。研究表明: 螺丝盘与丝杆连接可靠, 节点不会先于构件发生破坏; 节点刚度值是影响结构稳定承载力的重要因素, 建议在工程应用中, 半刚性节点的刚度值取 $70 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$ 。

关键词: 螺丝盘; 钢管支架; 有限元分析; 半刚性

中图分类号: TU 731.2 **文献标志码:** A

Mechanical Properties of a New Type of Disk Lock Steel Pipe Scaffold

WANG Jing¹, ZHENG Qizhen¹, RANG Meng¹, LONG Libo²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Construction No.2(Group) Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

Abstract: The optimized design of a new full-work condition adaptive steel pipe scaffold system was proposed to improve the limitations of traditional socket-type disc button steel scaffolds in practical application. In order to test the safety and stability of the new system, the basic unit body test and the semi-rigid finite element analysis of the steel pipe scaffold joints were carried out. Then, a SAP2000 modeling analysis was performed out on the basic element, and the rationality of the finite element analysis and test results was verified by comparing the experimental and theoretical values, and the range of the stiffness value of the joints was determined. The results show that the connection between the screw plate and the screw rod is reliable, and the joints will not be damaged before the component failure. The stiffness value of the joint is an important factor that affects the stability of the structure. It is suggested that the stiffness value K of the semi-rigid joint should be taken as $70 \text{ kN} \cdot \text{m/rad}$.

Keywords: screw plate; steel pipe scaffold; finite element analysis; semi-rigid

承插型盘扣式钢管支架体系具有承载力大、可靠度高、适用性广和环保美观的优点, 已列入住建部建筑业十项新技术之一, 广泛应用于各种工程施工, 并成为高大支模方案的首选^[1-5]。但是

收稿日期: 2018-07-10

第一作者: 王 婧(1993-), 女, 硕士研究生。研究方向: 结构设计。E-mail: 530868444@qq.com

通信作者: 郑七振(1962-), 男, 教授。研究方向: 结构设计。E-mail: zhengqz1@163.com

在实际工程应用中, 由于受到构件定型化和规范顶部自由端限值的影响^[6], 支架体系在梁板交汇处、异形结构处和大截面梁下等复杂施工环境下无法完全形成整体。本文通过基本单元体试验, 研究螺丝盘节点的连接可靠性, 并基于试验数据, 建立节点半刚性有限元模型, 通过对比分析试验值和理论值, 确定节点刚度值的取值范围, 提出合理的建议值, 为实际分析设计提供参考, 为该新型全工况适应型盘扣式钢管模板支架的应用提供有效的技术和理论依据, 大力推动新型脚手架的发展和应用。

1 基本单元体试验研究

1.1 试验方案设计

普通钢管脚手架支撑体系的现存问题有: 施工时需增设普通钢管套管延长顶层立杆, 继而采用扣件连接横向普通钢管, 形成顶层横杆, 如图 1~2 所示, 这样极大降低了结构的整体稳定性。为解决这个问题, 本文优化设计了一种可添加旋转连接盘(简称“螺丝盘”), 见图 3~4。根据梁下支架高度及顶部自由悬臂端限值, 在顶托丝杆上加设螺丝盘, 可突破立杆固定标准节的限制, 以方便工程施工时模板支架体系的布置安装, 从而提高结构的整体稳定性^[7-8]。

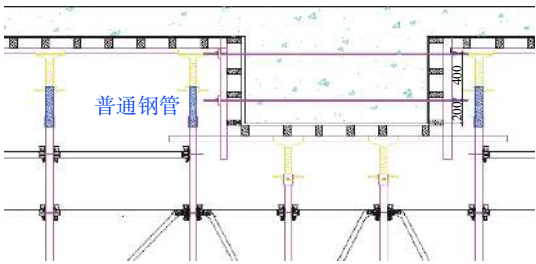


图 1 模板支架示意图
Fig.1 Sketch map of steel pipe support formwork



图 2 模板支架实景图
Fig.2 Real map of the steel pipe support formwork



图 3 螺丝盘节点组件
Fig.3 Joint assembly of the screw plate



图 4 新型盘扣式钢管支架体系
Fig.4 New type of disk lock steel pipe scaffold system

本试验不考虑竖向斜撑, 以支架受力形式、纵横跨距和顶层水平加强层为主要参数, 共设计了 5 组规格的新型盘扣式基本单元体试验, 试验架体步距均为 1 000 mm, 扫地杆距离地面均为 300 mm, 顶部悬臂自由端长度为 760 mm。试件参数如表 1 所示, 试验杆件规格和材性参数如表 2 所示。

表 1 试件参数
Tab.1 Specimen parameters

试件编号	支架受力形式	立杆纵横距(mm×mm)	顶层水平加强层
JD1	梁式支模架	600×600	水平剪刀撑
JD2	梁式支模架	600×600	水平横杆
JD3	板式支模架	1 200×1 200	水平剪刀撑
JD4	板式支模架	900×900	水平剪刀撑
JD5	板式支模架	900×900	水平横杆

1.2 试验装置

图 5 为试验加载图, 荷载首先由 500 t 千斤顶通过反力架施加在分配梁上, 然后再由槽钢均匀分配到顶托内的双钢管上。为确保所有测量设备正常工作, 预加载 50 kN, 分级加载, 每级加荷 25 kN 后持荷 3 min, 使结构变形趋为稳定。在结构临近

表 2 主要杆件规格及材性参数

Tab.2 Main components specifications and material properties parameters

试件编号	规格/mm	材质	钢管外径/mm	管壁厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa
LG1	φ48×3.2	Q345A	48.840	3.540	428	466	2.40×10 ⁵
LG2	φ48×3.2	Q345A	48.780	3.760	415	460	2.32×10 ⁵
LG3	φ48×3.2	Q345A	48.780	3.820	465	475	2.59×10 ⁵
SG1	φ48×2.5	Q235B	48.240	2.680	300	380	2.19×10 ⁵
SG2	φ48×2.5	Q235B	48.250	2.680	355	430	2.44×10 ⁵
SG3	φ48×2.5	Q235B	48.100	2.640	345	420	2.40×10 ⁵

注: LG 表示立杆; SG 表示水平杆。

破坏时, 密切关注采集仪的数据变化, 并观测记录试验现象, 直至整体结构破坏丧失承载力, 停止加载。



图 5 试验加载图
Fig.5 Test loading

为量测逐级加载过程中结构内力变化与变形情况, 本试验共布置应变测点 8 个, 为观测基本单元体的各杆件受力均匀性, 4 根立杆和顶层 4 根水平杆的中部皆布置 1 个应变测点, 每个应变测点处均贴 2 片单向应变片。在试验架体外围搭设一层辅助支架, 用以安装位移计, 位移测点共布置 4 个, 每个测点安置 2 个位移计, 分别测量 x , y 方向水平侧移, 如图 6 所示。图 7 为试验中螺丝盘与加长丝杆的详细尺寸图, 图 8 为测点布置详图。

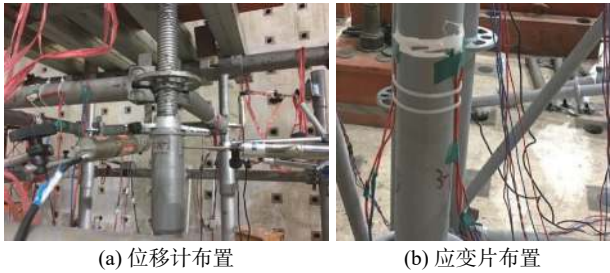


图 6 测点布置图
Fig. 6 Layout of measuring points

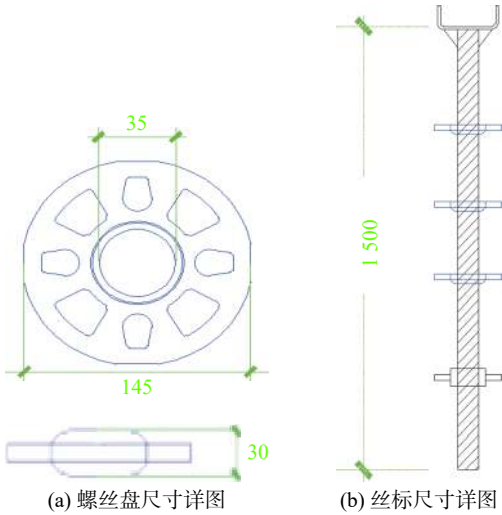


图 7 主要构件尺寸详图
Fig. 7 Main components details

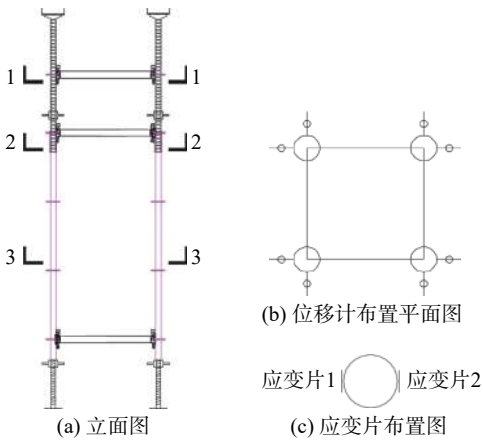


图 8 测点布置详图
Fig. 8 Detailed layout of measuring points

1.3 试验结果与分析

分级加载, 当施加荷载增加, 采集仪数据不再增加反而减小, 表明基本单元体不能继续受荷, 或是结构突然产生大变形时, 宣告结构已经破坏。试件的破坏形态如图 9 所示, 试验架体的

破坏主要是双钢管被压扁, U 形顶托弯曲, 最终结构发生有侧移整体弯扭失稳破坏, 而螺丝盘节点并没有明显的破坏现象。基本单元体试验结果如表 3 所示。试验过程中, 试件破坏形态均为侧移整体弯扭失稳。失稳破坏前, 双钢管被压扁, 顶托发生压弯变形。螺丝盘节点没有明显破坏, 且螺丝盘与丝杆连接可靠, 没有产生相对滑移。横杆应变波动较大, 无明显规律, 且横杆应变数值很小, 最大应变不超过 $40\ \mu\epsilon$ (钢材屈服应变为 $1\ 140\ \mu\epsilon$)。横杆几乎不参与承重, 故重点分析立杆的受力, 各立杆荷载-应力曲线图结果如图 10 所示。

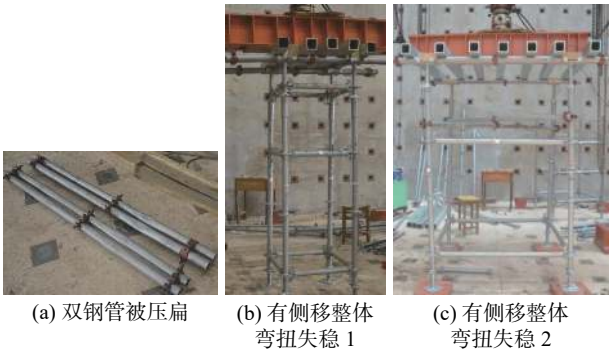


图 9 破坏形态
Fig.9 Failure mode

表 3 基本单元体试验结果
Tab.3 Test results of the basic unit

试件编号	极限承载力/kN	立杆应力/MPa				最大水平位移/mm		破坏形态
		1	2	3	4	x	y	
JD1	370	167.7	183.5	90.2	158.5	1.82	-3.99	有侧移整体弯扭失稳
JD2	250	138.2	115.9	185.4	152.9	9.59	13.43	有侧移整体弯扭失稳
JD3	200	76.4	97.9	96.7	91.8	-12.78	-10.54	有侧移整体弯扭失稳
JD4	294	160.7	189.1	-	250.3	-12.69	-14.90	有侧移整体弯扭失稳
JD5	240	146.4	83.2	98.7	119.3	8.89	-4.02	有侧移整体弯扭失稳

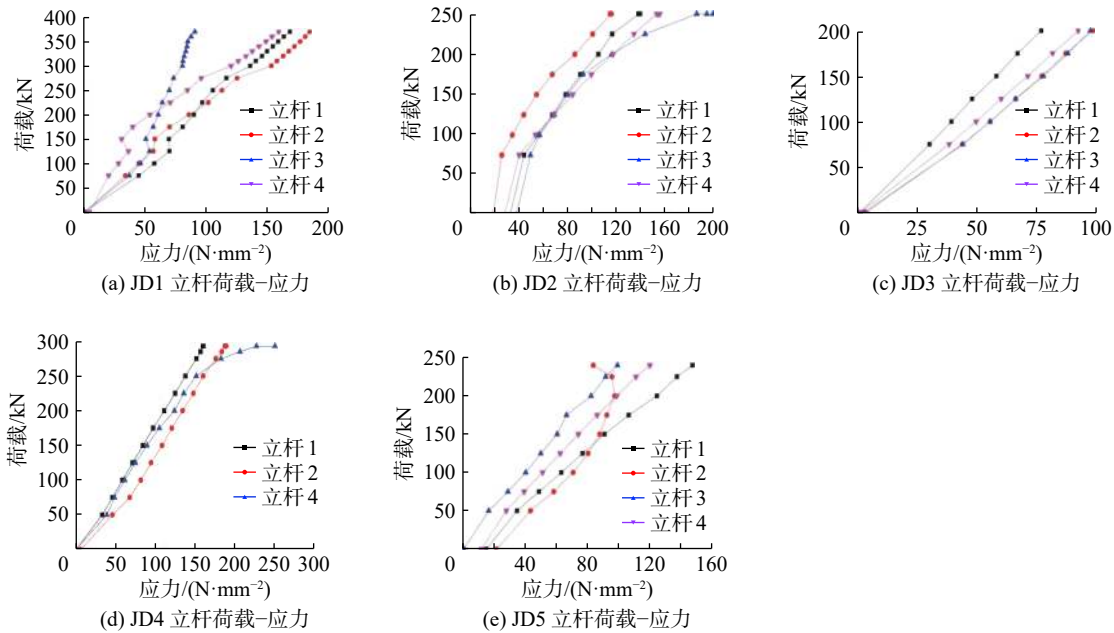


图 10 各试件中立杆荷载-应力曲线图
Fig.10 Load-stress patterns of neutral bars for each specimen

对比分析不同规格单元体的试验现象, 应变、位移数据和试验结果, 可以得出以下结论:

a. 对比 JD1 和 JD2 试件, 在梁式支模架工况下, 采用水平剪刀撑为顶层水平加强层的 JD1 其

极限承载力为 370 kN, 最大水平位移为 3.99 mm; 采用水平横杆为顶层水平加强层的 JD2 其极限承载力为 250 kN, 最大水平位移为 13.43 mm。试件 JD1 比 JD2 的承载力提高了 48%, 且整体弯扭变形

较小，表明结构顶层水平加强层仅设置“螺丝盘+水平杆”时整体稳定性较弱，建议采用“螺丝盘+水平杆+水平剪刀撑”，进一步提高顶层水平抗侧移刚度。

b. 对比 JD3 和 JD4 试件，在板式支模架工况下，纵横跨距为 1 200 mm 的 JD3 其极限承载力为 200 kN，最大水平位移为 12.78 mm；纵横跨距为 900 mm 的 JD4 其极限承载力为 294 kN，最大水平位移为 14.9 mm。试件 JD4 比 JD3 的极限承载力提高了 47%，说明适当减小立杆纵横跨距可有效提高结构的稳定承载力。

c. 对比 JD4 和 JD5 试件，在板式支模架工况下，纵横跨距同为 900 mm，顶部悬臂自由端长度为 760 mm，采用水平剪刀撑的 JD4 其极限承载力为 294 kN，最大水平位移为 14.9 mm；采用水平横杆的 JD5 其极限承载力为 240 kN，最大水平位移为 8.89 mm。试件 JD4 的极限承载力比 JD5 的提高了 22.5%，建议在工程应用中可采用“螺丝盘+水平杆+水平剪刀撑”顶部双层加固形式，有效提高结构承载力。

2 有限元分析

2.1 模型建立

盘扣式钢管支架的节点既不是理想刚接也不是理想铰接，而是介于两者之间的半刚接^[9-14]。根据国内外学者研究成果，本文采用有侧移半刚性钢框架计算模型，运用 SAP2000 有限元软件建立空间有限元模型^[15-20]。通过控制加在线单元端部的弹簧刚度，灵活地改变端部各自由端的释放来模拟节点半刚性^[21-24]。对比分析试验值和理论值，验证有限元分析及试验结果的合理性，并确定节点刚度值的取值范围。

选取基本单元体 JD5 的模型为计算模型，假定有限元计算模型的单元体为空间框架单元，线对象类型为框架，假定横杆与立杆为半刚性连接。材料的属性选择钢材，具体参数详见表 4~5。框架边界条件为底端链接、顶端自由，施加荷载的方式为由端部进行集中力加载。假定结构失稳破坏时，结构构件仍处于弹性受力阶段，不考虑杆件的初始缺陷和材料缺陷的影响。整个加载过程

表 4 钢管的几何参数

Tab.4 Steel pipe geometric parameter

名称	外径/mm	壁厚/mm	面积/cm ²	惯性矩/cm ⁴	截面模量/cm ³	回转半径/cm	密度/(kg·m ⁻³)
立杆	48	3.2	4.50	11.36	4.73	1.59	7 850
水平杆	48	2.5	3.57	9.28	3.86	1.61	7 850

表 5 钢管的材料性质

Tab.5 Steel pipe material properties

弹性模量/(N·mm ⁻²)	剪切模量/(N·mm ⁻²)	泊松比
2.06×10 ⁵	7.9×10 ⁴	0.3

中，只考虑竖向荷载的影响，不考虑其他荷载的影响。基本单元体计算模型如图 11 所示。

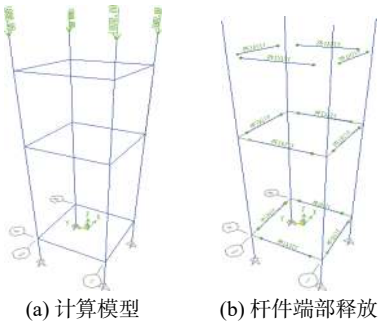


图 11 计算模型

Fig. 11 Calculation model

2.2 节点半刚性的影响

基本单元体试件实际上为有侧移半刚性框架结构，根据《建筑施工承插型盘扣式钢管支架安全技术规程》中给出的盘扣节点抗弯刚度建议值 86 kN·mm/rad，假设半刚性节点抗弯刚度 K 为 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 150, 200, 300, 400, 500，单位为 kN·mm/rad。以 JD5 基本单元体为例，计算不同节点刚度值架体的临界荷载。

图 12 是基本单元体整体稳定承载力与节点刚度值的关系曲线。整体稳定承载力与节点刚度的关系表现为非线性关系，与一般半刚性钢框架的连接特性相一致。刚性连接的稳定承载力约为 10 kN·mm/rad 的 10 倍左右，表明节点半刚性是影响模板支架承载力的重要因素。节点刚度值在 0~200 kN·mm/rad 之间时，整体稳定荷载增长较快，当超过 200 kN·mm/rad 后，整体稳定荷载增长速率

变小。这表明当节点刚度值较小时, 刚度值 K 是影响结构稳定承载力的关键因素之一, 但当刚度值超过一定值后, K 对结构的稳定承载力影响不太明显。

在试验测量过程中, 由于应力的测量相比位移受到的人为干扰因素更小一些, 选取应力为模拟参考标准; 再则立杆为架体的主要受力杆件, 且立杆的应变片测点为 2 个方向, 由立杆应力平均值换算的轴力值较为精确, 故选取立杆平均轴力作为参考标准。图 13(a)~(d)分别为 JD5 架体立杆 1~4 的试验值与节点刚度 K 取不同数值时立杆理论值的对比图。

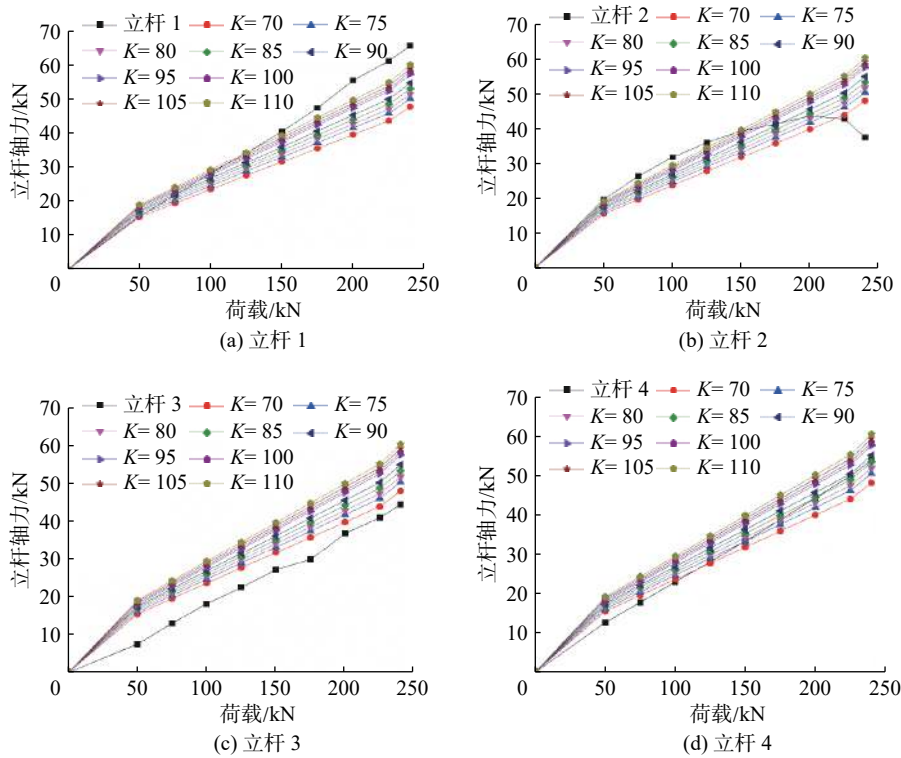


图 13 不同 K 值下立杆试验值与理论值对比

Fig.13 Comparison of experimental and theoretical values with different K

通过对比试验值和理论值, 当节点半刚性刚度值 K 取值范围为 $70\sim95\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ 时, 试验结果与理论值吻合良好。考虑在实际工程应用中材料缺陷、构件的周转重复使用和施工工人的人为过失等, 建议设计计算时节点半刚性刚度值 K 取 $70\text{ kN}\cdot\text{m/rad}$ 较为安全, 确保模板支架结构有足够的储备。

3 结束语

通过对新型盘扣式钢管支架进行基本单元体试验研究和有限元分析, 可以得到以下结论:

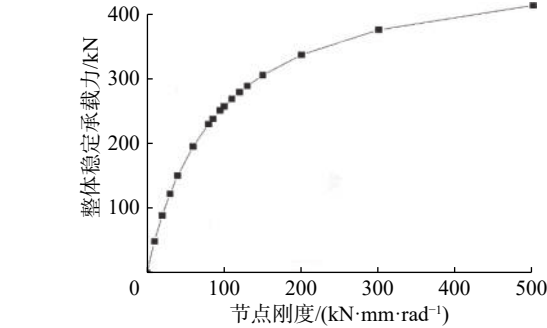


图 12 整体稳定承载力与节点刚度值的关系曲线

Fig.12 Relationship between overall stability bearing capacity and joint stiffness

a. 螺丝盘与丝杆连接可靠, 试验过程中不产生相对滑移, 且螺丝盘节点具有较高强度, 不会发生明显破坏, 节点不会先于构件发生破坏, 建议应用于实际工程中。

b. 顶层水平加强层是影响结构整体稳定性的关键因素, 增设水平剪力撑可大幅度提高框架的极限承载力, 建议在工程应用中可采用“螺丝盘+水平杆+水平剪刀撑”顶部双层加固形式, 有效提高结构整体稳定性。

c. 适当减小立杆纵横跨距可有效提高结构的稳定承载力, 纵横跨距减小 25%, 极限承载力可提高近 50%, 但结构整体抗侧移性略微减小。

d. 有限元分析结果表明, 当节点刚度取值在 $0 \sim 200 \text{ kN} \cdot \text{mm/rad}$ 之间时, 节点半刚性值是影响结构整体稳定承载力的重要因素, 对模板支架体系进行分析设计时应考虑节点半刚性的影响, 以更准确地计算模型各项指标。

e. 对比分析试验值和理论值后, 确定节点半刚性值的取值范围为 $70 \sim 95 \text{ kN} \cdot \text{mm/rad}$, 建议在工程应用中, 考虑人工周转、材料缺陷等不利因素的影响, 半刚性节点的刚度值 K 取 $70 \text{ kN} \cdot \text{mm/rad}$ 较为安全。

参考文献:

- [1] 糜嘉平. 我国模板脚手架行业取得的成就及发展前景[J]. 施工技术, 2009, 38(4): 16-18.
- [2] 陆征然, 陈志华, 刘群, 等. 模板支架结构研究综述[C]//第十届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 上海, 2010: 1620-1624.
- [3] 何春平, 孙江龙. 承插型盘扣式支撑架在大型厂房施工中的应用[J]. 施工技术, 2015, 44(2): 110-112.
- [4] 沈勤, 刘洪亮. 承插型盘扣式钢管脚手架在创极速光轮游乐项目天幕工程中的应用[J]. 施工技术, 2016, 45(15): 27-29.
- [5] 邓应平, 张永坡, 张宝利, 等. 盘扣式脚手架在大跨度椭圆形弦支穹顶结构施工中的应用[J]. 施工技术, 2017, 46(14): 39-41.
- [6] JGJ231-2010, 建筑施工承插型盘扣式钢管支架安全技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [7] 李伟, 龙莉波, 章谊, 等. 全工况适用型承插型盘扣式钢管支架体系及其施工方法[P]. 中国, CN201710377542. 4.2017-09-08.
- [8] 李伟, 龙莉波, 章谊, 等. 承插型盘扣式顶托丝杠结构及其使用方法[P]. 中国, CN107165392A. 2017-09-15.
- [9] 陈安英, 郭正兴, 武雷. 盘销式钢管支撑架结构力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(10): 140-145, 175.
- [10] 姜旭, 张其林, 顾明剑, 等. 新型插盘式脚手架的试验和数值模型研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(7): 55-60.
- [11] 叶志燕, 张其林. 新型插盘式脚手架承载力影响因素分析[J]. 施工技术, 2009, 38(12): 92-94, 102.
- [12] 张志杨, 应惠清, 顾浩生. 新型扣盘式钢管支模架受力特性的试验研究[J]. 结构工程师, 2012, 28(2): 127-133.
- [13] 闫雁军, 陈鲁, 张其林. 插盘式脚手架试验研究及受力分析[J]. 施工技术, 2013, 42(14): 94-97.
- [14] 徐蓉, 刘碧波, 马荣全. 承插型盘扣式模板支架体系试验研究[J]. 施工技术, 2014, 43(5): 77-81, 91.
- [15] 王新堂, 季瑶, 王剑平. 半刚性连接钢框架的弹性屈曲荷载计算[J]. 工业建筑, 2008, 38(4): 82-86.
- [16] 胡长明, 车佳玲, 张化振, 等. 节点半刚性对扣件式钢管模板支架稳定承载力的影响分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(2): 20-23.
- [17] 陈志华, 陆征然, 王小盾, 等. 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[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(12): 56-63.
- [18] LU Z R, SUI X M, CHEN Z H. Bearing capacity of fastener steel tube full hall formwork support base on stability of pressed pole with multiple point restraint against rotation[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 166-169: 1404-1415.
- [19] PENG J L, YEN T, KUO C C, et al. Analytical and experimental bearing capacities of system scaffolds[J]. Journal of Zhejiang University, 2009, 10(1): 82-92.
- [20] 田鹏刚, 胡长明, 张凤亮, 等. 插口式钢管模板支撑架基本受力单元架承载力数值分析[J]. 施工技术, 2015, 44(2): 102-105.
- [21] 张祥, 刘阳阳, 阳鼎. 基于机械零件三维模型骨架相似性度量算法[J]. 有色金属材料与工程, 2017, 38(4): 234-238.
- [22] 王陶, 雷君相, 彭彦君, 等. 管材壁厚对双直径圆管吸能元件成形与自由翻转的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2017, 38(3): 160-165.
- [23] 闫冬, 戚春香, 冯清梅. SAP2000 结构工程分析及实例详解[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [24] 杨勇. SAP2000 结构设计实例详解[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

(编辑: 丁红艺)