

承插型盘扣式钢管支撑脚手架试验及有限元分析

刘京红^{1,2}, 李文坡², 张凌博^{1,2}, 李兵兵³, 郭振乾²

(1. 天津城建大学 天津市土木建筑结构防护与加固重点实验室, 天津 300384; 2. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 3. 中铁建设集团有限公司, 北京 100040)

摘 要: 为了研究其受力性能, 设计出 3 种不同斜杆布置的单元架体, 并进行了足尺试验研究及有限元计算。结果表明: 斜杆为对角布置时较为合理, 且不易使单元架体发生水平倾覆及竖向屈曲失稳; 在杆件受力方面, 立杆主要是受力杆件, 竖向斜杆与水平杆主要是构造杆件, 保证整体架体几何不变。运用 ABAQUS 对试验架体进行模拟, 模拟结果与试验结果吻合较好; 运用有限元对节点刚度分析可知, 节点刚度处在 $10^6 \sim 10^9 \text{ N}\cdot\text{mm/rad}$ 之间时对承载力的影响较大, 进而对承载力—节点刚度曲线进行非线性拟合并对比试验值得出节点刚度建议值为 $38.1 \text{ MN}\cdot\text{mm/rad}$; 分析水平杆步距、立杆间距可知, 水平杆步距的增加对架体承载力的影响更为显著, 建议在工程设计计算时考虑水平杆步距对支撑架体承载力的影响。

关键词: 承插型盘扣式脚手架; 试验研究; 节点刚度; 有限元分析

中图分类号: TU731.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-0645(2023)05-0478-07

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2022.133

Experiment and Finite Element Analysis for Disk Lock Steel Tubular Scaffold

LIU Jinghong^{1,2}, LI Wenpo², ZHANG Lingbo^{1,2}, LI Bingbing³, GUO Zhenqian²

(1. Tianjin Key Laboratory of Civil Structure Protection and Reinforcement, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100040, China)

Abstract: As a kind of temporary support structure, the disk lock steel tubular scaffold is an important in engineering construction. In order to study its mechanical properties, three different diagonal brace arrangements of the unit scaffold were designed, and a full scale test study and finite element calculations were carried out. The results show that the diagonal arrangement of the diagonal brace is more reasonable and less likely to cause horizontal tipping and vertical buckling instability of the unit scaffold. In terms of rod forces, the standard are mainly force-bearing rods, the diagonal brace and ledger are mainly structural rods to ensure the overall frame geometry unchanged. Simulation of the test frame was carried out with ABAQUS. The simulation results are in good agreement with the test results. The node stiffness analysis based on finite elements analysis method shows that the node stiffness has a greater effect on the load carrying capacity when it exists between 10^6 and $10^9 \text{ N}\cdot\text{mm/rad}$. A non-linear fitting of the load bearing capacity with node stiffness curve was carried out and combined with a comparison test, obtaining a recommended value of $38.1 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm/rad}$ for the node stiffness. Analysis of the ledger lift height and the distance between standards show that the increase in the ledger lift height has a more important effect on the load bearing capacity of the frame. It is suggested that the influence of the ledger lift

收稿日期: 2022-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12102295); 天津市科技计划项目 (22YDTPJC00040); 河北省教育厅重点项目 (ZD2019117)

作者简介: 刘京红(1975—), 女, 博士后, 教授, E-mail: liujinghongfree@sina.com.

height on the bearing capacity of the shoring scaffold should be considered in the engineering design and calculation.

Key words: disk lock steel tubular scaffold; experimental studies; joint stiffness; finite element analysis

随着我国城市化进程的不断加快,大跨度、大空间的建筑结构层出不穷,复杂脚手架支撑体系的应用越来越多^[1-4]. ZHANG 等^[5]通过考虑 3 种不同的二阶非弹性分析,设计出典型的半刚性脚手架案例,以开发基于二阶非弹性分析的系统设计方法. 贾莉等^[6]通过试验研究得到了扣件式满堂脚手架顶层水平杆抗弯承载力、立杆受压稳定承载力等关键受力构件和节点的计算方法. 孙秋月^[7]对碗扣式脚手架进行了试验研究,得出设置斜撑可使架体的承载力增大,且减小步距可约束脚手架的变形. CHANDRANGSU 等^[8]提出了套管接头、半刚性垂直梁连接和底板偏心的建模方法,并基于 Ramberg-Osgood 模型考虑了材料非线性. 综上所述,盘扣式脚手架作为一种临时支撑框架结构,目前相关的研究工作相对较少,需要进一步开展试验及工程应用研究,以确保盘扣式脚手架的应用科学合理.

1 单元架体试验

本试验对由 4 根立杆构成的单跨两步空间支架体系进行竖向荷载作用下的破坏试验研究,单元架体型式见图 1.

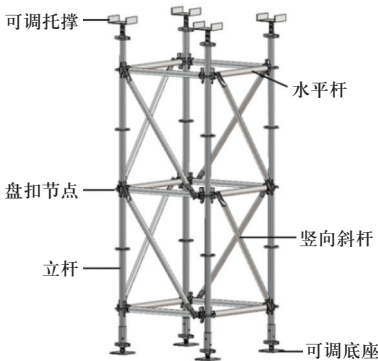


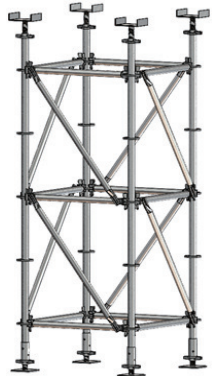
图 1 承插型盘扣式支撑钢管脚手架示意图
Fig. 1 Disk lock steel tubular scaffold diagram

1.1 试验设计

鉴于实验室场地及加载装置的因素,本试验以竖向斜杆布置方式为参数变量,设计了 3 种不同的单元架体. 竖向斜杆的布置方式见图 2. 单元架体参数见表 1, 构件尺寸及材料属性见表 2.



(a) GJ1 竖向斜杆布置方式



(b) GJ2 竖向斜杆布置方式



(c) GJ3 竖向斜杆布置方式

图 2 竖向斜杆的布置方式

Fig. 2 Diagonal brace layout

表 1 单元架体参数

Tab. 1 Parameters of unit scaffolds

编号	步距/mm	立杆间距/mm	扫地杆高度/mm	顶部伸出长度/mm	架体高度/mm	斜杆布置方式
GJ1	1 000	900	350	350	2 700	V型对称布置
GJ2	1 000	900	350	350	2 700	螺旋布置
GJ3	1 000	900	350	350	2 700	对角布置

表 2 构件尺寸及材料属性

Tab. 2 Component dimensions and material properties

杆件名称	规格/mm	材质	弹性模量/GPa
立杆	$\varphi 48 \times 3.2 \times 2500$	Q345A	206
水平杆	$\varphi 48 \times 2.5 \times 840$	Q235B	206
竖向斜杆	$\varphi 42 \times 2.3 \times 1277$	Q195	206
可调底座	$\varphi 38 \times 5.0 \times 500$	Q235B	206
可调托撑	$\varphi 38 \times 5.0 \times 500$	Q235B	206

1.2 加载方案

试验加载装置是由电液伺服压力试验机和项目组自行设计制作的两级分配梁等组合而成,加载装置见图 3。一级分配梁由两根长为 1.3 m 工字钢组成,二级分配梁由两根长为 1.4 m 工字钢组成,且一、二级分配梁腹部均加有加劲肋,以确保在加载过程中工字钢不会发生变形,并将二级分配梁作用在架体立杆顶部 U 型托座上,保证荷载可以均匀施加到每根立杆上。试验采用压力试验机对单元架体施加竖向荷载,施加荷载的大小由压力试验机电脑终端控制,正式加载采用位移控制进行加载,正式加载之前,需先对架体进行预加载,每根立杆施加 10 kN 载荷,用以消除构件组装过程中产生的空隙,并对应变片和位移计读数的合理性进行测试,确保一切正常后进

行卸载,然后再进行正式加载试验。正式加载采用分级加载,每分钟施加 0.5 mm 的位移,之后持荷 2 min,待应变和位移读数不再变化再进行下一级的加载。



图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test loading device

1.3 测点布置

本试验采用位移计监测架体立杆在加载过程中的变形,每根立杆设置 3 个位移测点,每个位移测点放置两个位移计用以监测立杆 x 方向以及 y 方向的变形,顶层测点即 9、10、11、12 测点布置 50 mm 量程位移计,架体上下步中间测点即 1~8 测点布置 100 mm 量程位移计。同时在 4 根立杆、竖向斜杆及中间层水平杆的中部布置单向应变片,用以观测各杆件受力变化。试验过程中位移测点及应变测点布置如图 4 所示。

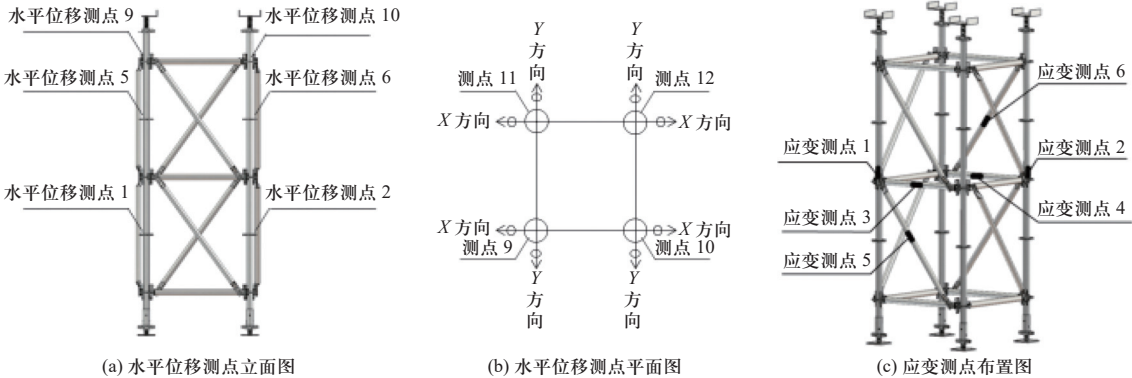


图 4 位移测点及应变测点

Fig. 4 Displacement measuring points and strain measuring points

1.4 试验结果及分析

对单元架体进行竖向加载,当荷载继续增加时,力反而出现下降的趋势时,表明此时架体已不能继续承受荷载,或是架体的某根立杆出现明显的塑性变形,表示架体已经达到极限承载能力。观察试验现象可知,立杆变形较大,水平杆及竖向斜杆几乎未发生变形,架体的破坏模式主要是立杆屈曲失稳破坏。试验结果见表 3,架体破坏模式见图 5。

表 3 单元架体试验结果

Tab. 3 Test results of unit scaffolds

编号	P_u/KN	P_{u1}/KN	X_t/mm	X_g/mm	失稳模式
GJ1	373.6	93.4	18.78	13.59	立杆屈曲失稳
GJ2	392.0	98	14.01	13.27	立杆屈曲失稳
GJ3	416.9	104.2	8.52	11.46	立杆屈曲失稳

注: P_u 为架体极限承载力; P_{u1} 为单根立杆极限承载力; X_t 指架体达到极限承载力时所测顶层水平位移最大值; X_g 指的是架体达到极限承载力时所测竖向位移值。

由图5可知, GJ2失稳点在位移测点7处, 即架体第二步立杆中间位置, GJ1和GJ3失稳点在位移测点3及位移测点2处, 即架体第一步立杆中间位置. 失稳点均在架体的上、下步立杆中间位置, 表明立杆上、下步中间位置较易发生破坏.

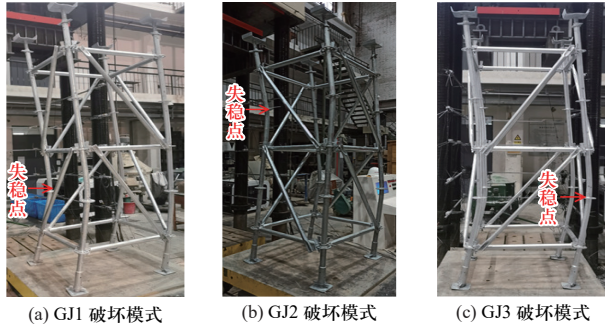


图5 架体破坏模式

Fig. 5 Frame failure mode

由表3可知, GJ3比GJ2的极限承载力提高了7.1%, GJ3比GJ1的极限承载力提高了14.8%; GJ3的顶层水平位移最大值为4.52 mm, 竖向位移最大值为11.46 mm, 均小于GJ1与GJ2的顶层水平位移和竖向位移最大值, 可得知, GJ3整体竖向刚度与顶层水平刚度均大于构件1和构件2的整体竖向刚度与顶层水平刚度. 由此表明, 构件3的斜杆布置较为合理, 且不易使单元架体发生水平倾倒及竖向屈曲失稳.

图6为架体达到极限承载力时的各位移测点变形图. 由图6可知, 当架体达到极限承载力时, GJ1、GJ2及GJ3顶层均有往左侧倾斜的现象, 且GJ1伴有轻微的左旋, GJ3伴有轻微的右旋; 然而GJ3倾斜量及右旋角度较小. 究其原因, 1)斜杆搭设方式的不同, 导致荷载传递的路径不同; 2)各构件存在不同的安装误差, 导致存在偏心加载及各构件之间楔紧程度不同.

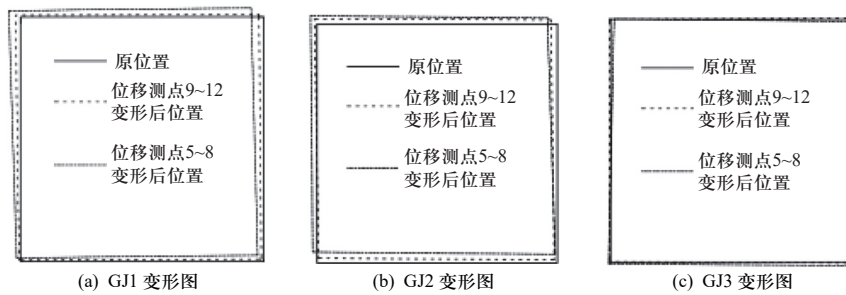


图6 架体变形图

Fig. 6 Scaffold deformation diagram

对顶层测点 x 方向、 y 方向的位移进行合成分析, 荷载-顶层合位移曲线见图7, 由图7可得, GJ1、GJ2、GJ3前期随着荷载的增加, 位移几乎不增加, 表明架体在加载初期水平刚度较大. GJ1、GJ2在荷载达到

100 kN左右时, 构件顶层水平刚度出现拐点, 开始逐渐减小, GJ3在荷载加载到250 kN左右时, 构件顶层水平刚度出现拐点, 开始逐渐减小.

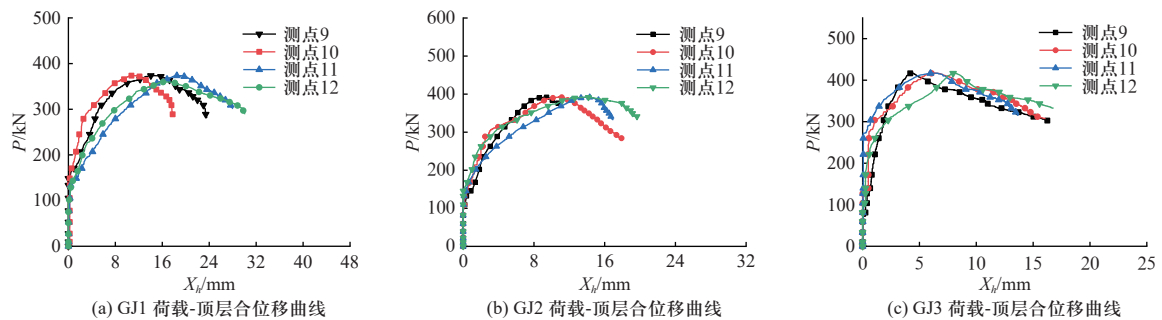


图7 荷载-顶层合位移曲线

Fig. 7 Load top grade combined displacement curve

从对应变的监测结果来看, 竖向斜杆与水平杆的应变值均在 $-500 \sim 500 \mu\epsilon$ 之间, 经计算, 竖向斜杆的屈服应变值在 $900 \mu\epsilon$ 左右, 水平杆的屈服应变值在

$1200 \mu\epsilon$ 左右, 可知两者均未超过其屈服应变, 表明竖向斜杆与水平杆在整个架体受力过程中处在弹性阶段, 未发生塑性变形; 立杆屈服应变值在 $1700 \mu\epsilon$

左右,由立杆应变测点数据得知,立杆的应变测点最大值均已超过 $1700\ \mu\epsilon$,表明立杆在整个架体受力后期会进入塑性阶段,发生塑性变形;由此可说明,在

整个架体受力过程中立杆主要是受力杆件,竖向斜杆与水平杆主要是构造杆件,保证整体架体几何不变.各构件应变测点图见图 8.

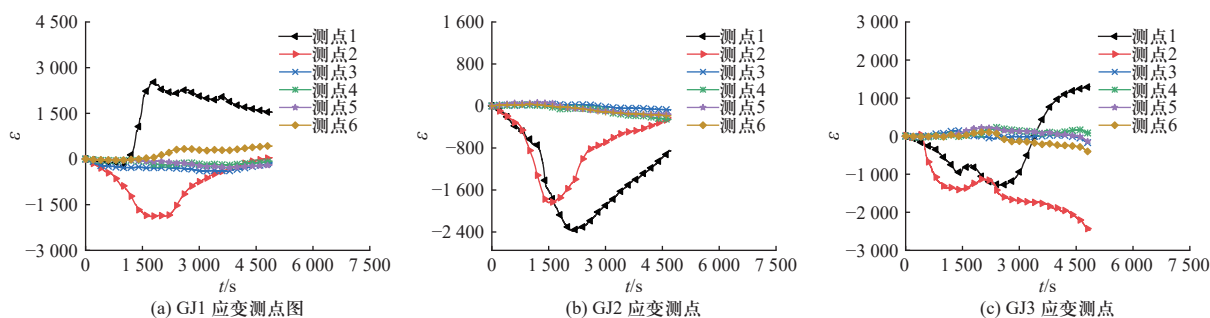


图 8 应变测点图

Fig. 8 Points diagram of strain measuring

2 有限元分析

盘扣式支撑脚手架实质上是一种半刚性空间钢架结构^[9-11].本文基于文献[12]研究成果采用有侧移半刚性钢框架计算模型,运用 ABAQUS 有限元软件建立与试验尺寸相同的有限元模型,进行数值模拟计算.

2.1 有限元模型的建立

数值模拟过程中,1)视立杆与地面之间的连接为铰接连接;2)加载点均在立杆中心,不考虑偏心加载;3)视立杆与竖向斜杆之间的节点连接为铰接,立杆与水平杆之间的节点连接为半刚接.模型尺寸及杆件属性取表 1~2 中的数值.单元选取中立杆与水平杆选择 B31 单元,竖向斜杆选择 T3D2 单元.运用 ABAQUS 的 connector 单元模拟节点的半刚性,并引入几何初始缺陷,初始缺陷按照文献[13]建议值,取为 $L/200$, L 为架体高度.

2.2 节点刚度分析

试验架体立杆与水平杆之间的连接本质上是一种半刚性连接,为了分析节点刚度对承载力的影响,以 GJ1 为例,分别考虑节点刚度 k 为 $0, 10, 10^2, 10^3, 10^4, 10^5, 10^6, 3.16^6, 3.16 \times 10^6, 10^7, 3.16 \times 10^7, 10^8, 10^9, 10^{10}, 10^{11}, 10^{12}, 10^{13}, 10^{14}, 10^{15}\ \text{N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$.承载力-节点刚度对数曲线见图 9.

由图 9 可知,当节点刚度值处在 $0 \sim 10^6\ \text{N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 之间时,架体承载力一直保持在 $300\ \text{kN}$ 左右,当在 $10^9 \sim 10^{15}\ \text{N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 之间时,架体承载力保持在 $455\ \text{kN}$ 左右,两者相差 51.7% .当节点刚度值处在 $10^6 \sim 10^9\ \text{N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 之间时,随着节点刚度值的增加,架体承载力大致呈现出线性增长.

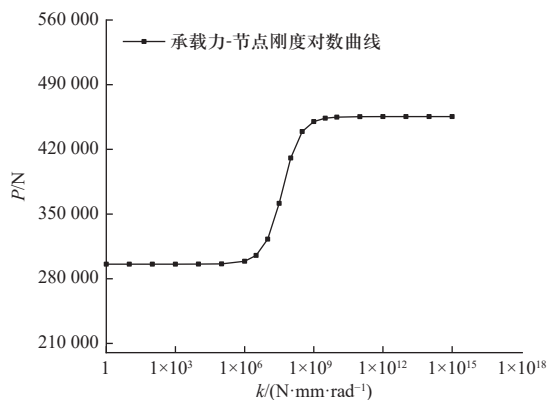


图 9 承载力—节点刚度对数曲线

Fig. 9 Logarithm curve of bearing capacity node stiffness

为了得到与 GJ1 相符的节点刚度,用有限元软件进一步分析了节点刚度在 $10^7 \sim 10^8\ \text{N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 之间的值,并对承载力-节点刚度曲线进行非线性拟合,结果见图 10.由图 10 可知,当节点刚度处在 $10^7 \sim 10^8\ \text{N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 之间时,承载力随着节点刚度的增加大致呈现非线性增长.运用拟合公式,反算出 GJ1 节点

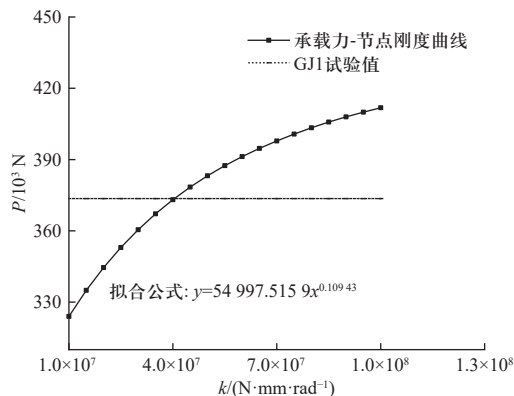


图 10 承载力-节点刚度曲线

Fig. 10 Curve of bearing capacity node stiffness

刚度为 $40.1\text{ MN}\cdot\text{mm}/\text{rad}$, 考虑到节点刚度是由水平杆扣接头与立杆接触产生, 由于水平杆扣接头的质量参差不齐及实际工况较为复杂, 故取 0.95 的折减系数, 则节点刚度建议取为 $38.1\text{ MN}\cdot\text{mm}/\text{rad}$.

2.3 试验架体有限元分析

建立 GJ1, GJ2 和 GJ3 有限元模型, 节点刚度取 $38.1\text{ MN}\cdot\text{mm}/\text{rad}$, 首先进行线性屈曲分析, 随后取一阶模态引入几何初始缺陷, 进行非线性屈曲分析. 计算结果表明, 架体的失稳点均在立杆上, GJ1 和 GJ3

表 4 架体有限元分析结果

Tab. 4 Finite element analysis results of the scaffolds			
编号	试验值 P_{st}/kN	模拟值 P_{st}/kN	误差值/%
GJ1	93.4	91.6	1.9
GJ2	98.0	93.4	5.0
GJ3	104.2	96.7	7.2

失稳点发生在架体第一步立杆中间位置, GJ2 失稳点发生在架体第二步立杆中间位置, 与试验结果吻合, 架体非线性屈曲分析结果见表 4, 位移云图见图 11.

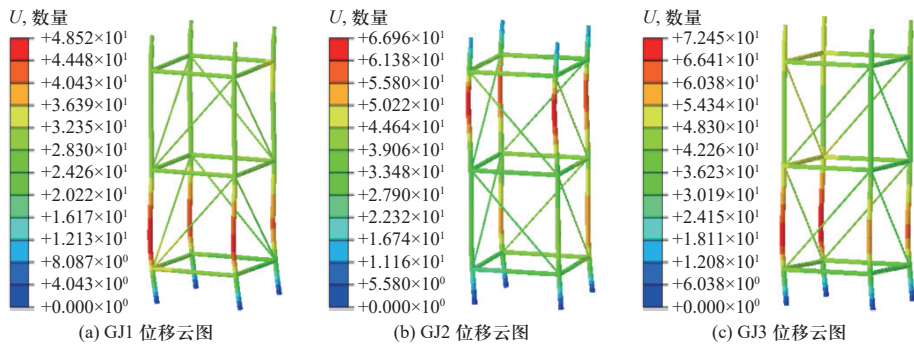


图 11 位移云图

Fig. 11 Displacement nephogram

由表 4 可知, 模拟值与试验值较为吻合, 且误差在 10% 以内. 造成误差的主要原因为: 个别托撑及底座丝杆质量不合格, 导致在加载过程中变形较大; 加载系统存在侧向约束及可能存在偏心加载的现象.

2.4 水平杆步距、立杆间距分析

采用 GJ2 的斜杆布置方式, 建立了 9 组不同的单元架体模型, 进行数值模拟计算. 结果如表 5 所示.

表 5 水平杆步距和立杆间距分析结果

Tab. 5 Analysis results of the ledger lift height and the distance between standards

步距=1 m		步距=1.5 m		步距=2 m	
立杆间距/m	承载力/N	立杆间距/m	承载力/N	立杆间距/m	承载力/N
0.9	373 625	1.2	313 810	1.5	267 243
1.2	372 561	1.5	308 594	1.8	239 310
1.5	349 483	1.8	292 973	2.1	229 689

由表 5 可看出, 当步距不变时, 每增加一个立杆间距模数, 承载力下降值在 1% ~ 10% 之间, 每增加两个立杆间距模数, 承载力下降值在 6% ~ 13% 之间. 当立杆间距取为 1.5 m 时, 每增加一个水平杆步距模数, 承载力下降值在 10% ~ 15% 之间; 增加两个水平杆步距模数, 承载力降低了 25.1%. 由以上数据可看

出, 水平杆步距的加大对架体承载力影响更为显著. 在工程设计计算中需要注意水平杆步距对支撑架体承载力的影响.

3 结 论

1) 单元架体试验结果表明, GJ3 竖向斜杆布置方式不易使架体发生竖向失稳破坏及水平倾覆破坏, 建议在工程实际中采用对角布置竖向斜杆; 由应变数据得知, 立杆为主要受力杆件, 水平杆及竖向斜杆主要是构造杆件, 用以保证架体几何不变.

2) 当节点刚度值处在 $10^6 \sim 10^9\text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 之间时, 节点刚度对架体承载力的影响较大, 并进一步分析了节点刚度在 $10^7 \sim 10^8\text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 之间的值, 当节点刚度处在 $10^7 \sim 10^8\text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 之间时, 承载力随着节点刚度的增加呈现非线性增长. 运用拟合公式, 反算出 GJ1 节点刚度为 $40.1\text{ MN}\cdot\text{mm}/\text{rad}$, 考虑到实际水平杆扣接头的质量参差不齐, 取 0.95 的折减系数, 则在工程实际中节点刚度值建议取为 $38.1\text{ MN}\cdot\text{mm}/\text{rad}$.

3) 对试验架体进行 ABAQUS 有限元计算, 得到的有限元计算结果与试验结果吻合较好, 误差控制在 10% 以内. 单元架体破坏模式均为立杆屈曲失稳破坏, 表明有限元分析具有一定的合理性.

4) 对水平杆步距及立杆间距分析得知, 每增加一个立杆间距模数, 承载力下降值在 1% ~ 10% 之间, 每增加两个立杆间距模数承载力下降值在 6% ~ 13% 之间; 每增加一个水平杆步距模数, 承载力下降值在 10% ~ 15% 之间, 增加两个水平杆步距模数承载力降低了 25.1%, 因此在工程设计计算中要注意水平杆步距对支撑架体承载力的影响。

参考文献:

- [1] 王成, 仲彦旭, 王万里, 等. 3种钢筋混凝土抗爆结构防护性能研究[J]. 北京理工大学学报, 2020, 42(1): 11 – 18.
WANG Cheng, ZHONG Yanxu, WANG Wanli, et al. Study on protective of three kinds of reinforced concrete anti-blast structures[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 42(1): 11 – 18. (in Chinese)
- [2] WEESNER L B, JONES H L. Experimental and analytical capacity of frame scaffolding[J]. Engineering Structures, 2001, 23: 592 – 599.
- [3] 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 Yuanbin. Research and application on load-bearing capacity of socket plate fastener type scaffold[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018. (in Chinese)
- [4] 李尚昆, 黄西成, 王鹏飞, 等. 基于塑性损伤理论的PBX圆拱结构变形破坏分析[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(10): 1018 – 1025.
LI Shangkun, HUANG Xicheng, WANG Pengfei, et al. Deformation and fracture analysis of PBX arch specimens based on plasticity damage theory[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(10): 1018 – 1025. (in Chinese)
- [5] ZHANG Hao, RASMUSSEN K J R. System-based design for steel scaffold structures using advanced analysis[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89: 1 – 8.
- [6] 贾莉, 刘红波, 陈志华, 等. 扣件式钢管满堂脚手架承载力验算方法[J]. 建筑结构, 2016, 46(6): 71 – 76.
JIA Li, LIU Hongbo, CHEN Zhihua, et al. Capacity calculation method of full hall steel tubular scaffold with couplers[J]. Building Structure, 2016, 46(6): 71 – 76. (in Chinese)
- [7] 孙秋月. 碗扣式钢管满堂支架力学性能及稳定性试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
SUN Qiuyue. Experimental investigation on the mechanical behaviour and stability of full cuplock steel tubular scaffolding[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [8] CHANDRANGSU T, RASMUSSEN K J R. Structural modelling of support scaffold systems[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 67(5): 866 – 875.
- [9] ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing. Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplok steel tubular scaffold[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 177: 106415.
- [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]. 土木工程报, 2008, 41(7): 55 – 60.
JIANG Xu, ZHANG Qilin, GU Mingjian, et al. Study of experiment and numerical model on a new disk-type steel scaffold[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(7): 55 – 60. (in Chinese)
- [11] LIU H B, CHEN Z H, WANG X D, et al. Theoretical analysis and experimental research on stability behavior of structural steel tube and coupler false work with X-bracing[J]. Advanced Steel Construction, 2010, 6(4): 949 – 962.
- [12] 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.
CHEN Zhihua, LU Zhengran, WANG Xiaodun, et al. Experimental and theoretical research on capacity of unbraced steel tubular formwork support based on sway frame with semi-rigid connection theory[J]. Journal of Building Structure, 2010, 31(12): 56 – 63. (in Chinese)
- [13] CHAN J L Y, LO S H. Stability design of system scaffold with differential settlement[J]. Structures, 2020, 27: 1467-1478.

(责任编辑: 刘芳)