

不同斜杆搭设组合的承插型盘扣式支撑架有限元研究

何守涛¹, 孙海军², 李晓东^{1,*}, 崔维久¹

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 青岛 266525; 2. 山东招金产业发展有限公司, 烟台 265400)

摘要: 利用 Python 对 Abaqus 进行了二次开发, 设计了半自动化定义半刚性节点的插件, 提高了半刚性节点定义和有限元分析的效率。设计出 7 种不同单元斜杆布置的支撑架, 通过有限元分析得到不同斜杆的单元布置方式和不同斜杆长度对承插型盘扣式支撑架极限承载力和屈曲位移的影响, 结果表明: 采取斜杆断接断接的连接方式对支撑架极限承载力的提高最为显著, 当支撑架步距为 1.5 m、斜杆竖向长度为跨过 5 个连接盘时极限承载力提高最为显著。

关键词: Abaqus 二次开发; 半刚性; 承插型盘扣式支撑架

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)02-0018-07

Finite element study of socket plate buckle-type support frame with different combinations of diagonal braces

HE Shoutao¹, SUN Haijun², LI Xiaodong^{1,*}, CUI Weijiu¹

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Shandong Zhaojin Industrial Development Co., Ltd., Yantai 265400, China)

Abstract: This paper uses Python for secondary development of Abaqus, and the plug-in for semi-automation in defining semi-rigid nodes was designed, which can improve the efficiency of semi-rigid node definition and finite element analysis. Seven support frames with different layouts of diagonal braces are constructed. The influence of different layouts and different lengths of diagonal braces on the ultimate load-bearing capacity and buckling displacement of socket plate buckle-type support frame is obtained by finite element analysis. The results indicate that the ultimate load-bearing capacity of the support frame is most significantly improved by adopting the cyclic arrangement of disconnecting and connecting nodes between the diagonal braces of the support frame. When the step distance of the support frame is 1.5 m, the ultimate load-bearing capacity is improved most significantly by making the diagonal braces vertically long enough to stretch across 5 connection plates.

Key words: Abaqus secondary development; semi-rigid; socket plate buckle type support frame

收稿日期: 2023-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(52008224)

作者简介: 何守涛(1997—), 男, 山东邹城人。硕士, 研究方向为建筑结构火灾行为及灾后处理。E-mail: 785800295@qq.com。

* 通信作者: 李晓东(1976—), 男, 山东青岛人。博士, 副教授, 主要从事建筑结构火灾行为及灾后处理等方面的研究。

E-mail: Xiaodongli1976@163.com。

在不同形式的模板支撑架中,承插型盘扣式支撑架的优点众多^[1],但不同规范在设计计算、搭设等相关规定上存在差异,使承插型盘扣式支撑架在生产与使用中存在争议,制约了该支撑架的推广与发展。

国内外学者对于类似支撑架已做出一些实验研究和理论分析。尹德生^[2]提出了一种实验方法来测定支撑架节点的抗扭刚度,得到当节点的初始扭矩在 1200 N·m 以下时,扣件式支撑架半刚度值为 31.58 kN·m/rad,为以后研究其他形式的支撑架节点半刚性提供了思路。陈桂香等^[3]利用有限元模拟技术,分析了承插型盘扣式支撑架支撑盘扣节点,研究了抗扭刚度受到多种外力作用的影响因素,其中连接盘与插销相关联的范围内材料应力模量的变化最为显著,并且提出了相应的抗扭刚度参数。WEESNER 等^[4]通过对 4 种不同类型支撑架进行加载实验,预测了每个支撑架的最终承载能力,采用特征屈曲、几何非线性屈曲方法进行分析,将实验值和预测的极限荷载进行对比,为支撑架提供了一个极限承载力的合理上限预测,对实际支撑架安装以及使用提供建议值。虽然以往学者对类似的支撑架进行了大量研究,但斜杆搭设组合方式对承插型盘扣式支撑架影响的相关研究工作相对较少,为保证承插型盘扣式支撑架能够安全规范地使用,本文对其力学性能进行有限元研究。

1 有限元模型建立及模拟方法

1.1 建模材料和节点刚度的选用

支撑架的有限元分析使用 Abaqus 软件,考虑到所研究的整体支撑架稳定性及后屈曲承载力问题,本文在模拟过程中采用梁结构单元来模拟支撑架的杆件。梁结构单元允许构件剪切变形和构件之间产生大位移及大转动,将其用于模拟杆件的空间行为可以得到更加可靠的结果。杆件的截面特征及材料属性如表 1 所示。

表 1 杆件截面特征及材料属性

| 材质 | 弹性模量/GPa | 泊松比 | 屈服强度/MPa | 壁厚/mm | 外径/mm | 截面积/mm ² |
|--------|----------|-----|----------|-------|-------|---------------------|
| Q345 钢 | 206 | 0.3 | 345 | 3.5 | 48 | 489 |

在有限元模拟的模型边界条件定义阶段,使用刚性连接的支撑架结构模拟得到结果与实际结构受荷后得到的结果存在显著的差异^[5],这是因为杆件节点之间实际呈现非线性的特征^[6]。这种节点之间应力-应变的非线性特征称为半刚性连接。

在 Abaqus 有限元分析中半刚性节点的模拟可以通过连接器实现^[7],选择 Abaqus 节点库中基于平移的连接单元“Join”和基于旋转的连接单元“Cardan”来构造半刚性节点模型。数值模拟过程中半刚度值^[8]选用 38.1 kN·mm/rad,并引入几何初始缺陷,初始缺陷取 $L/200$ ^[9],其中, L 为架体高度。

1.2 定义半刚性节点插件的开发

在 Abaqus 有限元分析软件中调用节点库需要先建立连接器,连接器的建立分为两步:①建立需要模拟的 2 个节点之间关系的连接线;②将节点库选择的连接单元属性赋予连接线,从而定义两点间的空间属性。在第②步建立连接线时,所有立杆模型端点、水平杆模型端点和斜杆模型端点 3 点共节点,如图 1 所示,需要建立连接线的两点空间位置相互重叠。这种情况下 1 个节点需要 3 次连接线的操作,一般模型都存在数十个甚至上百个共节点,手动操作建立连接线极其冗杂,效率极低,通过使用 Python 编程语言开发的插件,可以大幅度提高有限元分析的效率,这种方法可以简化手动建立连接线的复杂性,而且可以有效地解决 1 个节点需要 3 次建立连接线的效率问题,实现立杆与双向水平杆、立杆与斜杆端点之间自动建立连接线的操作。

开发插件时,首先将水平杆网格节点和立杆网格节点放在 2 个不同集合中,在 Abaqus 中运行插件,

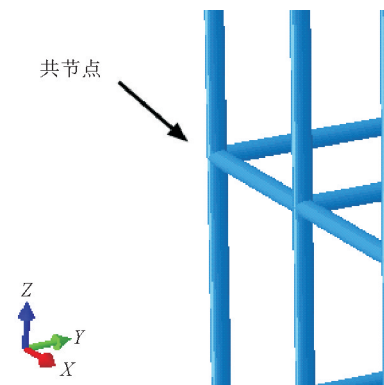


图 1 共节点

如图 2 所示,输入需要判断点的集合与模型信息,插件将自动判断并选择出模型中所有水平杆集合与立杆集合空间位置相同的节点,再用编程语言操作 Abaqus 软件将连接线批量一次性赋予筛选出的所有节点,从而实现节点半刚性的批量定义添加。批量定义半刚性节点的效果如图 3 所示,插件的部分代码如下:

```
If (abs(ptCoords1[0]-ptCoords2[0])<0.01 and abs(ptCoords1[1]-ptCoords2[1])<0.01 and
abs(ptCoords1[2]-ptCoords2[2])<0.01):
region=region+((node1, node2),)
WirePolyLine(points=region,meshable=OFF)
```



图 2 界面

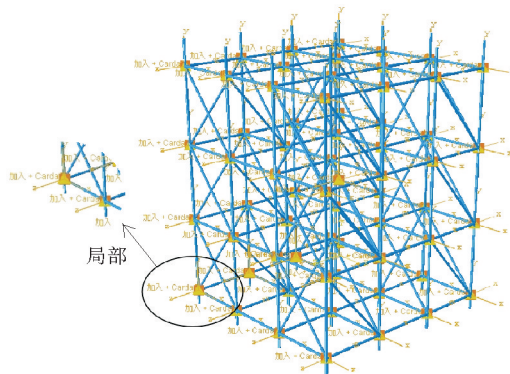


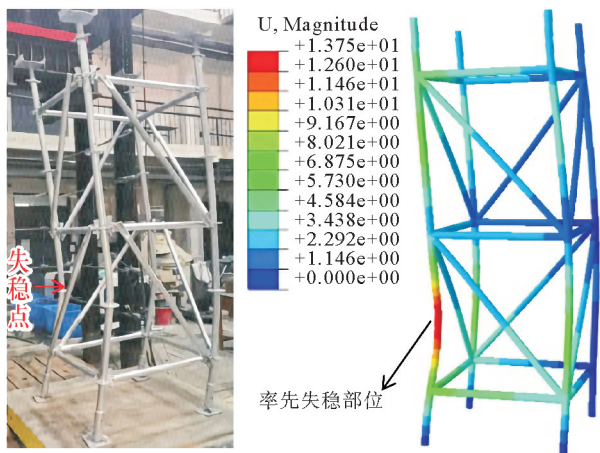
图 3 效果

1.3 单元架体模拟结果与验证

引用文献[8]中的实验数据进行模拟验证,在有限元模拟中引入半刚性定义插件,对比模拟得到的极限承载力、变形图与文献[8]中实验得到的数据,结果见表 2。方案 1 如图 4 所示,比较发现架体的失稳均发生在下部立杆中间处,模拟得到的单根立杆极限承载力为 97.1 kN;方案 2 如图 5 所示,架体的失稳均发生在上部立杆处,模拟得到的单根立杆极限承载力为 105.0 kN。

表 2 实验与模拟数据对比

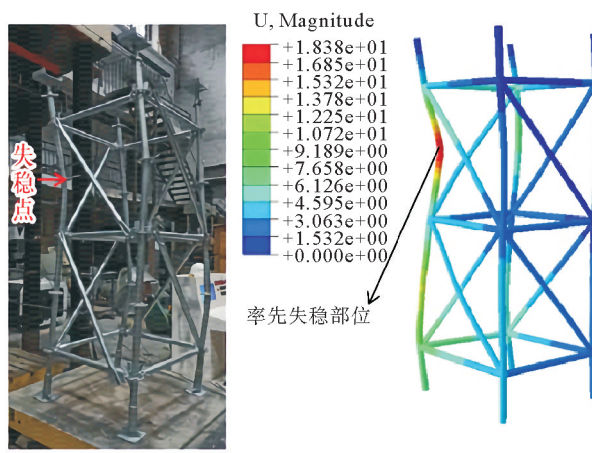
| 方案 | 实验立杆极限承载力/kN | 模拟立杆极限承载力/kN | 误差值/% | 实验失稳发生位置 | 模拟失稳发生位置 | 失稳发生位置 |
|------|--------------|--------------|-------|----------|----------|--------|
| 方案 1 | 93.4 | 97.1 | 3.9 | 下部立杆 | 下部立杆 | 相同 |
| 方案 2 | 98.0 | 105.0 | 7.2 | 上部立杆 | 上部立杆 | 相同 |



(a) 实验变形

(b) 有限元模型变形

图 4 方案 1 实验与模拟对比



(a) 实验变形

(b) 有限元模型变形

图 5 方案 2 实验与模拟对比

由表 2 可知,方案 1 与方案 2 有限元分析得到的极限承载力与实验结果的误差较小。如图 4、图 5 所示,有限元分析和实验的变形图整体上基本一致。个别立杆变形的方向不一样,主要与利用一阶模态引进初始几何缺陷的方向有关,结果并不影响立杆失稳的位置和支撑架的极限承载力。

综上所述,模拟结果与实验较吻合,证明使用半刚性节点定义插件的有限元模拟具有一定合理性,可以使用上述模拟流程对不同斜杆搭设组合的承插型盘扣式支撑架进行有限元分析。

2 承插型盘扣式支撑架有限元分析

根据以往的研究可知极限承载力与结构屈曲位移是衡量承插型盘扣式支撑架力学性能的重要指标^[10-11],影响两者的关键因素包括架体的高度、节点的半刚性、斜杆的安装方式^[12-13]。本文通过有限元分析研究斜杆的搭设方式和长度对支撑架极限承载力和屈曲位移的影响。

2.1 斜杆搭设方式对承载力与屈曲位移的影响

《建筑施工承插型盘扣式钢管脚手架安全技术标准》(JGJ/T 231—2021)6.2.2 中规定的斜杆的布置方式只给出了整体搭设方式^[14],并未给出一个单元内的斜杆具体搭设方式,即一跨内斜杆搭设方式,所以有必要对承插型盘扣式支撑架的斜杆单元搭设方式对其承载力的影响进行研究。按照斜杆在一层一跨距的连接情况设计出 4 种斜杆单元内布置方式:全接斜杆搭设如图 6(a)所示,即在一个单元内的 1—4 号斜杆的端部都是连接起来的;全断斜杆搭设如图 6(b)所示,即一个单元内斜杆之间的端部全部断开;断接断接斜杆搭设如图 6(c)所示,4 个方向的斜杆之间处于断开、连接、断开、连接的布置方式;断断接接斜杆搭设如图 6(d)所示,即一个单元内斜杆处于断开、断开、连接、连接的布置方式。

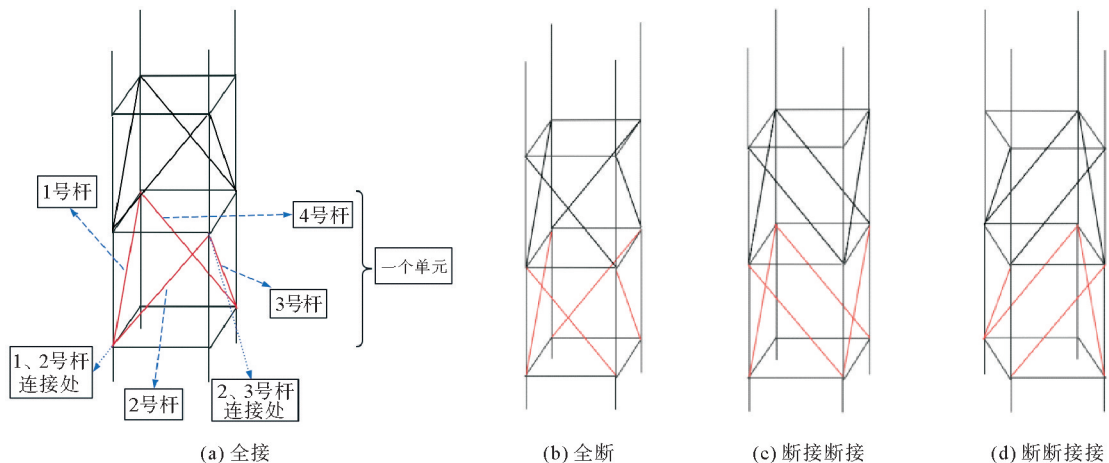


图 6 不同斜杆搭接方式的支撑架单元

在 Abaqus 中对工况 1—5 进行有限元分析,不同斜杆搭接方式的支撑架参数及模拟数据见表 3,因为当立杆长细比较大时支撑架连接具有较大几何初始缺陷^[15],所以每层立杆的长度不宜过长,本文选取立杆的长度,即支撑架步距为 1.5 m,斜杆的整体搭设方式根据规范选择间隔 1 跨。有限元模型的材料选取与章节 1.1 保持一致。

表 3 不同斜杆搭接方式的支撑架参数及模拟数据

| 工况 | 间距/m | 步距/m | 扫地杆高度/m | 纵横向跨数/跨 | 斜杆单元搭设方式 | 斜杆全局搭设方式 | 极限承载力/kN |
|----|---------|------|---------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | 1.2×1.2 | 1.5 | 0.3 | 3×3 | 全接 | 间隔 1 跨搭接 | 59.5 |
| 2 | 1.2×1.2 | 1.5 | 0.3 | 3×3 | 全断 | 间隔 1 跨搭接 | 59.3 |
| 3 | 1.2×1.2 | 1.5 | 0.3 | 3×3 | 断接断接 | 间隔 1 跨搭接 | 64.3 |
| 4 | 1.2×1.2 | 1.5 | 0.3 | 3×3 | 断断接接 | 间隔 1 跨搭接 | 62.5 |
| 5 | 1.2×1.2 | 1.5 | 0.3 | 3×3 | 无斜杆 | 无斜杆 | 31.1 |

对比表3中工况5与工况1—4可以看出,斜杆的搭设能够显著提高支撑架的极限承载力。未搭设斜杆的支撑架极限承载力为31.1 kN,搭设斜杆后支撑架极限承载力最大为64.3 kN,极限承载力提高了近1.07倍。采用断接断接的斜杆搭设方式对支撑架极限承载力的提高最为显著,与工况2相比提高了5.0 kN,提高承载力效果最小的斜杆搭接方式是全断搭接方式。

支撑架有限元结果的位移云图如图7所示,可以看出支撑架变形最大的位置均在立杆上,工况1—4的变形最大值在每层立杆的中间,工况5变形最大值在支撑架的中间,原因是工况5未搭设斜杆,导致架体整体的水平约束力不足,从而使架体整体侧移增大;增设斜杆后支撑架每层均有斜杆约束,支撑架整体变形减小;每层立杆的中间位置因为没有约束,立杆层间抗侧刚度较低而导致侧移增加。

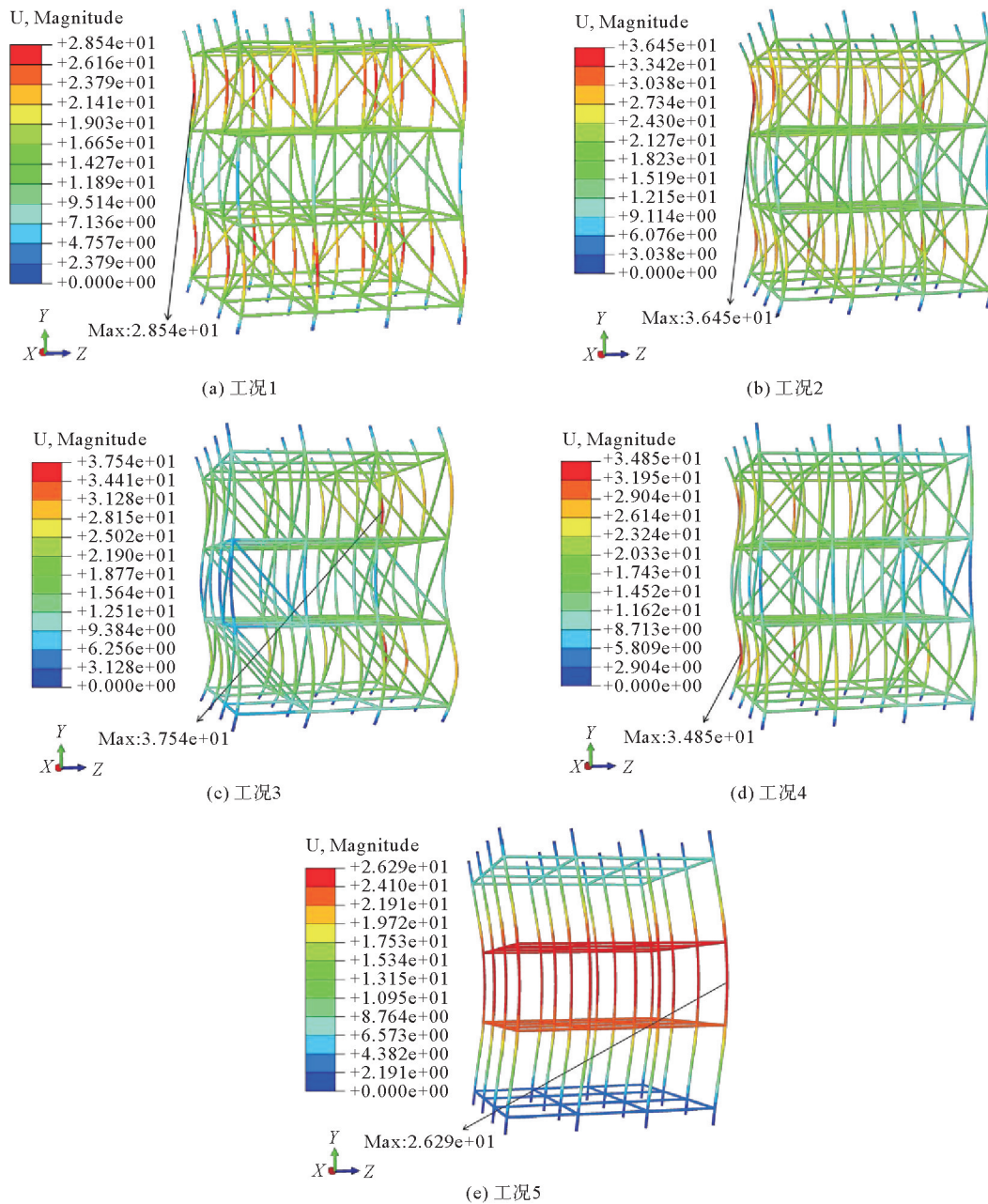


图7 支撑架位移云图

工况1—4的率先屈曲处位移值随竖向荷载变化情况如图8所示,可以看出工况1—4立杆屈曲处的位移与竖向荷载基本呈线性变化,最大屈曲位移值如表4所示。当达到承载力极限时,工况1的屈曲位移

值最小,为 29 mm;工况 3 的屈曲位移值最大,为 38 mm。随着荷载的增加,工况 1 达到屈曲时产生的屈曲位移最小,这是因为同层斜杆之间相互搭接导致架体的侧向位移趋势过大,过早地达到屈服状态。

2.2 斜杆长度对承载力与屈曲位移的影响

为进一步优化支撑架,在断接断接斜杆搭接方式的基础上,研究斜杆长度对支撑架承载力的影响。描述斜杆的长度用它竖向跨过的连接盘来定义,立杆上的连接盘如图 9 所示,一般支撑架立杆每隔 500 mm 都会有 1 个连接盘,根据斜杆不同长度提出如图 10 所示的 3 种工况。

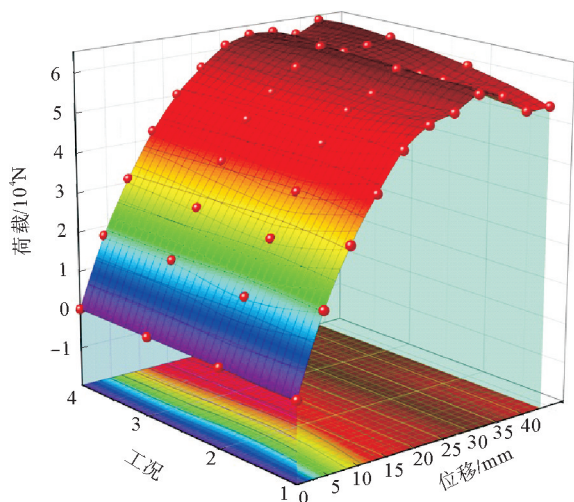


图 8 4 种工况率先屈曲处位移-荷载曲线

表 4 4 种工况最大屈曲位移

| 工况 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------|----|----|----|----|
| 屈曲位移/mm | 29 | 36 | 38 | 35 |



图 9 连接盘

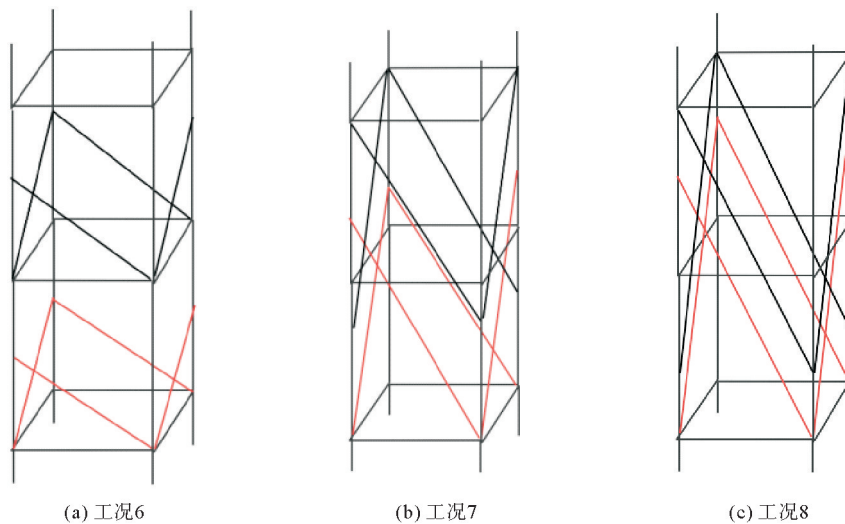


图 10 不同斜杆长度的支撑架单元

在 Abaqus 中对工况 6—8 进行有限元分析,不同斜杆长度的支撑架参数及模拟数据见表 5,为了对比数据的完整性,将斜杆长度为竖向跨过 4 个连接盘的工况 3 和无斜杆搭设的工况 5 也列于表 5 作为对比分析。

由表 5 可知,当斜杆竖向跨过 3~5 个连接盘时,支撑架的极限承载力与斜杆长度呈正相关,当斜杆竖向跨过 5 个以上连接盘时,支撑架的极限承载力开始降低。当斜杆竖向跨过 5 个连接盘时,对支撑架的极限承载力提高最显著,与工况 3 相比,工况 7 的极限承载力提高了 4.3 kN。工况 7 与无斜杆搭设的工况 5 相比,极限承载力提高了 1.2 倍。当步距为 1.5 m、斜杆竖向长度为跨过 5 个连接盘时,斜杆对支撑架的

极限承载力提高最大。

表5 不同斜杆长度的支撑架参数及模拟数据

| 工况 | 间距/m | 步距/m | 斜杆单元搭接方式 | 斜杆长度 | 极限承载力/kN |
|----|---------|------|----------|--------|----------|
| 6 | 1.2×1.2 | 1.5 | 断接断接 | 跨3个连接盘 | 60.4 |
| 3 | 1.2×1.2 | 1.5 | 断接断接 | 跨4个连接盘 | 64.3 |
| 7 | 1.2×1.2 | 1.5 | 断接断接 | 跨5个连接盘 | 68.6 |
| 8 | 1.2×1.2 | 1.5 | 断接断接 | 跨6个连接盘 | 58.8 |
| 5 | 1.2×1.2 | 1.5 | 无斜杆 | 无 | 31.1 |

3 结论

利用 Abaqus 建立了不同斜杆搭设方式和不同斜杆长度的承插型盘扣式支撑架模型,采用半刚性节点,通过支撑架的非线性屈曲分析,得到支撑架的极限承载力和位移的变化情况,主要结论如下:

1) 采用 Python 开发插件的方式定义模型的半刚性节点可以极大地减少重复操作,从而提高有限元分析的效率。半刚性定义插件可以自动判别模型中节点的空间位置关系,并且根据需要自动定义模型节点之间的属性,从而定义模型节点的半刚性连接关系。

2) 单元内断接断接的斜杆搭设方式能够显著地提高支撑架的极限承载力。相比无斜杆的支撑架,间隔1跨的斜杆整体搭设方式能够极大地提高架体的整体稳定性和抵抗变形的能力,极限承载力提高了近1.07倍。

3) 斜杆的长度对承插型盘扣式支撑架的极限承载力也有一定影响,当架体步距为1.5m、斜杆竖向长度为跨过5个连接盘时,对架体的极限承载力提高尤为显著,相比无斜杆搭设架体,极限承载力提高了1.2倍。

参考文献(References):

- [1] 张晓舟. 承插型套扣式钢管脚手架模板支撑体系分析[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(22): 108-110.
ZHANG Xiaozhou. Analysis of socket type sleeve type steel pipe scaffolding formwork support system[J]. Building Technology Development, 2022, 49(22): 108-110.
- [2] 尹德生. 钢管支架结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.
- [3] 陈桂香, 郭泽群, 胡德平, 等. 承插型盘扣式钢管支架盘扣节点抗扭刚度影响因素[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(8): 3231-3237.
CHEN Guixiang, GUO Zequn, HU Deping, et al. Influence factor of the disk-pin joint node torsional stiffness of the disk lock steel tubular scaffold[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(8): 3231-3237.
- [4] WEESNER L B, JONES H L. Experimental and analytical capacity of frame scaffolding[J]. Engineering Structures, 2001, 23(6): 592-599.
- [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] 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.
HU Changming, CHE Jialing, ZHANG Huazhen, et al. Influence of semi-rigid joint on stability capacity of coupler steel tube falsework[J]. Industrial Construction, 2010, 40(2): 20-23.
- [7] 李正农, 朱爱民, 吴红华, 等. 基于 Revit 的二次开发在脚手架设计中的应用研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(9): 65-73.
LI Zhengnong, ZHU Aimin, WU Honghua, et al. Research on the design of scaffold based on application of secondary development in revit[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(9): 65-73.
- [8] 刘京红, 李文坡, 张凌博, 等. 承插型盘扣式钢管支撑脚手架试验及有限元分析[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(5): 478-484.
LIU Jinghong, LI Wenpo, ZHANG Lingbo, et al. Experiment and finite element analysis for disk lock steel tubular scaffold[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(5): 478-484.

(下转第 57 页)