

引用格式 王立军, 汪明, 谭晋鹏. 基于直接分析法的盘扣式脚手架结构精细化设计方法[J]. 工业建筑, 2024, 54(1): 76-85. WANG L J, WANG M, TAN J P. A Fine Design Method for the Disk-Buckled Scaffolding Structure Based on Direct Analysis[J]. Industrial Construction, 2024, 54(1): 76-85 (in Chinese). DOI: 10.3724/j.gyzG23072810

# 基于直接分析法的盘扣式脚手架结构精细化设计方法

王立军<sup>1,2</sup> 汪明<sup>2</sup> 谭晋鹏<sup>1,2</sup>

(1. 华诚博远工程技术集团有限公司, 北京 100043; 2. 北京马斯特结构设计事务所有限公司, 北京 100055)

**摘要** 脚手架结构的传统设计方法是基于线性计算和有效计算长度假定。对于常规脚手架结构而言, 只要受压杆件计算长度能够相对准确的评估, 传统设计方法的设计精度一般能够满足工程需要。然而, 对于受力复杂的超高大脚手架结构, 需要采用更加精确的设计方法。提出了一种基于直接分析法的脚手架结构精细化设计方法。首先, 对脚手架结构杆件的初始弯曲进行了大量测量、统计和分析, 建立了不同类型脚手架杆件的初始弯曲设计值; 其次, 对盘扣式脚手架节点的半刚性特性进行了试验研究, 并基于试验结果建立了盘扣式脚手架结构节点半刚性模型, 包括横梁的弯曲及轴向半刚性模型和斜杆半刚性模型; 然后, 基于初弯曲设计值和半刚性特性模型, 利用非线性分析工具 NIDA 进行脚手架结构的直接分析法设计, 并将其应用于具体工程中。

**关键词** 脚手架结构; 精细化设计方法; 初弯曲; 半刚性连接; 直接分析法

## A Fine Design Method for Disk-Buckled Scaffolding Structure Based on Direct Analysis

Lijun Wang<sup>1,2</sup> Ming Wang<sup>2</sup> Jinpeng Tan<sup>1,2</sup>

(1. Huachengboyuan Engineering Technology Group, Beijing 100043, China;

2. Beijing Mengineer Structure Design Studio Ltd., Beijing 100055, China)

**Abstract:** The traditional stability design method for scaffolding structures is based on linear calculation results and the theory of effective length coefficients. The traditional method is accurate enough for conventional scaffolding structures, provided that the effective length coefficient of the compressed member can be correctly evaluated. However, a fine design method with higher calculation accuracy should be adopted for the design of ultra-high and large scaffold structures with complex loading conditions. An advanced design method for scaffolding based on direct analysis method was proposed in the paper. Firstly, a large number of geometric measurements and statistical analysis about the initial bending of scaffolding members were carried out, and an accurate data model for initial defect of scaffolding members was established. Secondly, an experimental research was conducted on the typical connection joints of the buckle type scaffold, and the semi-rigid characteristic of the connection with different loading cases were obtained, including bending in beams, compression or tension in beams and braces. Moreover, the research results including initial defect of scaffolding members and semi-rigid properties of scaffolding connection were imported into the nonlinear structure analysis tools NIDA. Finally, a real project with ultra-high and large disk-buckled scaffolding structure was introduced.

**Key words:** scaffolding structure, fine design method, initial bending defect, semi-rigid connection, direct analysis method

第一作者: 王立军, 教授级高级工程师, 主要从事超高层结构和复杂大跨钢结构设计、工程抗震等方面的研究。

通信作者: 汪明, 正高级工程师, 主要从事复杂结构设计和直接分析法研究, 89299485@qq.com。

收稿日期: 2023-07-28

## 0 引言

脚手架结构在建筑行业中应用广泛,是一种特殊的结构形式。脚手架结构一般由钢管构件和特有的连接节点组成。根据节点形式不同,在中国应用最广的脚手架类型有:扣件式钢管支撑架、碗扣式钢管支撑架、承插型钢管支撑架等。当前应用最广的是承插型支撑架,其中又以盘扣式脚手架形式最为常见。

盘扣式脚手架杆件由立柱、横梁和斜杆组成,三者之间通过立柱上的连接盘和插销进行连接。节点连接形式如图 1 所示。



图 1 盘扣式脚手架节点形式  
Fig.1 The form of disk-buckled scaffold joints

由于脚手架结构一般被用于临时支撑或短期功能的建筑中,其结构设计的可靠性往往不被重视;另一方面,近些年脚手架结构经常被用于超高大的独立式临时建筑中,相比于传统的脚手架结构,此类结构的受力情况更加复杂。这两点因素导致脚手架工程的事故屡有发生。

传统的脚手架结构设计方法是基于线性分析和计算长度假定<sup>[1]</sup>,这个过程中忽略了两点重要因素:1) 脚手架杆件往往具有多次重复利用的特点,其初始弯曲程度通常大于普通钢结构构件,在传统设计方法中未能将此因素考虑在计算中;2) 盘扣式节点是靠机械摩擦和挤压进行连接,在轴力和弯矩作用下,此类节点具有明显的半刚性特性,在传统设计中往往假定节点为弯曲铰接和轴向刚接<sup>[2-4]</sup>。对于以立柱承受竖向力为主的常规脚手架结构而言,这两点忽略的因素不会导致严重的设计偏差,但对于独立高大脚手架而言,侧向风荷载的存在导致斜杆和横梁承受加大的轴力,初弯曲和节点半刚性的影响对结构整体安全性影响显著<sup>[5-7]</sup>。

本文提供了一种基于直接分析法的盘扣式脚手架结构精细化设计方法。通过对脚手架杆件进行实测确定初偏心设计值;对盘扣式节点的半刚性特性进行试验研究;利用非线性有限元软件 NIDA 对脚手架结构进行直接分析法计算。

## 1 脚手架构件缺陷

脚手架结构一般采用可多次重复利用的构件,相比于永久性结构,重复利用构件缺陷普遍较大。理论上,缺陷值与重复利用次数、使用环境等因素有关。为了准确评估架体结构的构件初弯曲,本研究中对盘扣厂内的储存构件进行了大量抽样测量,并根据测量结果进行统计。在盘扣式脚手架配件厂,将不同长度的横杆进行分批堆放,分别随机抽取部分杆件进行测量,各种长度的杆件样本数量不小于 50 根。

### 1.1 横杆缺陷

横杆截面尺寸为圆管 48×2.5 或圆管 42×2.5。常见的长度规格有 600, 900, 1 200, 1 500, 1 800, 2 400, 3 000 mm。

分别对不同长度  $L$  的横杆初始缺陷进行实测,并统计每一组测量数的平均值  $S_{av}$ ,以及满足概率为 90% 对应的横杆最大变形值  $S_{0.9}$ ,得到如表 1 所示结果。建立  $S_{0.9}$  和杆件长度的关系曲线,如图 2 所示。可见,较长的横杆缺陷值较大,但最大缺陷率不超过 1/270。

表 1 横杆初弯曲程度  
Table 1 Initial deflection of transverse tube

| $L/\text{mm}$ | $S_{av}/\text{mm}$ | $S_{0.9}/\text{mm}$ | $S_{0.9}/L$ |
|---------------|--------------------|---------------------|-------------|
| 600           | 1.0                | 1.2                 | 1/500       |
| 900           | 2.0                | 2.3                 | 1/395       |
| 1 200         | 3.6                | 3.8                 | 1/300       |
| 1 500         | 4.6                | 5.3                 | 1/255       |
| 1 800         | 5.9                | 6.5                 | 1/277       |
| 2 400         | 7.7                | 8.6                 | 1/278       |
| 3 000         | 9.9                | 11.0                | 1/272       |

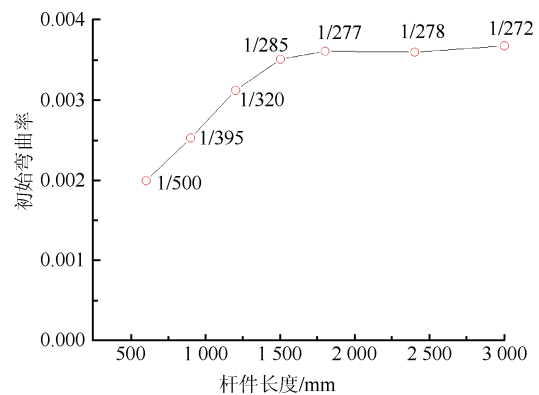


图 2 横杆缺陷与杆件长度的关系曲线  
Fig.2 Relations between defect and length of transverse tube

### 1.2 斜杆缺陷

斜杆常见的截面规格为圆管 33.7 mm×2.3 mm、圆管 38 mm×2.5 mm、圆管 42.4 mm×2.5 mm、圆管 48.3 mm×2.5 mm。常见的长度规格有 xg-06-15、xg-09-15、xg-12-15、

xg-15-15、xg-18-15、xg-09-20、xg-12-20、xg-15-20、xg-18-20 等。得到初弯曲平均值  $S_{av}$ , 以及满足概率为 90% 对应的横杆最大变形值  $S_{0.9}$ , 见表 2。

表 2 斜杆初弯曲程度  
Table 2 Initial deflections of bracing tube

| 规格       | $L/mm$ | $S_{av}/mm$ | $S_{0.9}/mm$ | $S_{0.9}/L$ |
|----------|--------|-------------|--------------|-------------|
| xg-06-15 | 1 616  | 4.6         | 5.2          | 1/313       |
| xg-09-15 | 1 749  | 5.9         | 6.5          | 1/271       |
| xg-12-15 | 1 921  | 6.3         | 7.0          | 1/275       |
| xg-15-15 | 2 121  | 6.9         | 7.9          | 1/267       |
| xg-18-15 | 2 343  | 8.1         | 8.9          | 1/264       |
| xg-09-20 | 2 193  | 7.2         | 8.0          | 1/273       |
| xg-12-20 | 2 332  | 8.1         | 9.0          | 1/260       |
| xg-15-20 | 2 500  | 9.2         | 10.1         | 1/247       |
| xg-18-20 | 2 691  | 10.0        | 11.0         | 1/244       |

将上述表格中  $S_{0.9}$ 、杆件长度建立关系曲线, 如图 3 所示。最大斜杆缺陷率为 1/244。

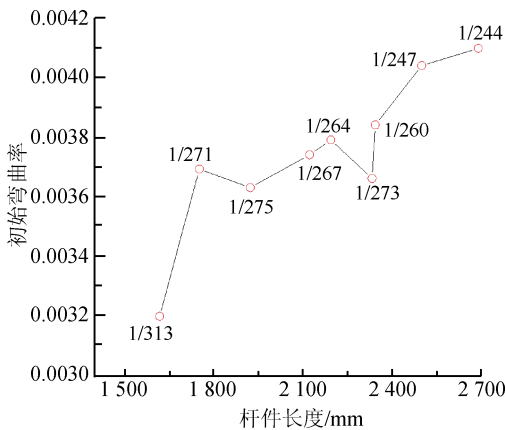


图 3 斜杆缺陷与杆件长度的关系曲线

Fig.3 Relations between defect and length of bracing tube

### 1.3 立杆缺陷

立杆上每隔 500 mm 设置一个盘扣连接板, 其高度一般有 500, 1 000, 1 500, 2 000, 2 500 mm 等几种规格。在实测中发现立杆的初弯曲明显小于横杆和斜杆, 尤其长度较短的立杆缺陷几乎可以忽略。在本次测量中仅对长度为 2 000 mm 和 2 500 mm 的立杆实测的初弯曲数值进行了统计, 结果如图 4 所示。

根据图 4 的结果, 立杆的缺陷比平均值为 1/650, 在满足 90% 概率的情况下, 构件缺陷值为 1/420。考虑到立杆圆管在成型过程和连接盘焊接过程中存在残余应力, 根据 GB 50017—2017《钢结构设计标准》关于 b 类截面初始缺陷的定义, 在设计中考虑立柱的缺陷为长度的 1/350<sup>[8]</sup>。

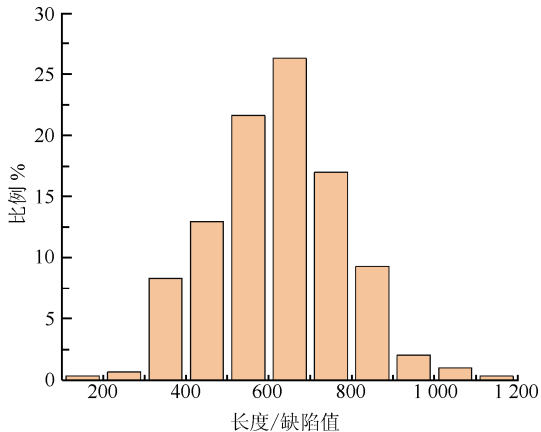


图 4 立杆初弯曲分布

Fig.4 Distribution of the initial deflections of post

## 2 脚手架节点半刚性特性试验研究

### 2.1 横杆抗弯试验

脚手架结构节点的半刚性特性一方面来自于横杆在弯矩作用下的节点旋转变形的非线性特性, 在研究中设计了横杆抗弯试验装置, 见图 5。通过在横杆上施加竖向荷载, 等效模拟弯矩的作用, 通过提高横杆和立杆的自身弯曲刚度, 尽量实现试验测得的转角来自节点的变形, 同时通过位移计测得立杆的自身变形, 并对结果进行补偿修正。

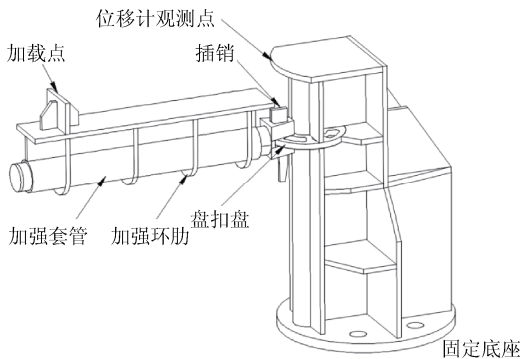


图 5 横杆抗弯试验方案示意

Fig.5 A schematic diagram of the transverse tube in bending test

试验现场照片如图 6 所示。



图 6 横杆抗弯试验照片

Fig.6 The photo of the transverse tube bending test

试验结果表明横杆在弯矩作用下的主要破坏形式是插销的弯曲变形,如图 7 所示。



图 7 横杆抗弯试验破坏形式  
Fig.7 The failure modes of the transverse tube in bending test

得到节点转角和弯矩之间的关系曲线如图 8 所示。

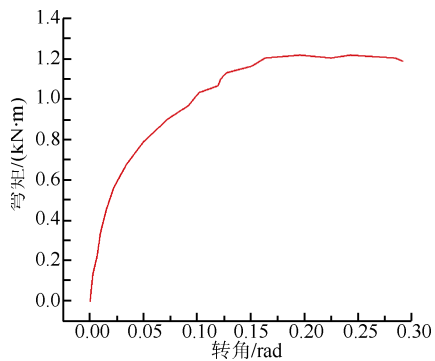


图 8 横杆节点弯矩与转角的关系曲线  
Fig.8 Relations between bending moment and rotation angle of the transverse tube joints

可见,最大抗弯承载力为  $1.22 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 对应转角为  $0.196 \text{ rad}$ 。

## 2.2 横杆抗拉试验

横杆在轴力作用下,节点处轴向变形也表现出非线性特性。分别设计了横杆抗拉和抗压试验装置。采用特殊构造的底座将立杆平放,并与试验基座固定。横杆端部采用加强构造措施,保证在作动器施加的拉力能够均匀地传给横梁,避免因应力集中而出现杆件破坏。

横杆抗拉试验方案和试验装置照片见图 9。

在横杆抗拉试验中,破坏形式主要表现在盘扣连接盘的冲切破坏,如图 10 所示。

得到轴力和轴向变形之间的关系曲线见图 11。可见,极限抗拉承载力为  $52.4 \text{ kN}$ , 对应的轴向变形为  $7.0 \text{ mm}$ 。

## 2.3 横杆抗压试验

为了避免横杆在压力作用下先发生屈曲,试验中将杆件长度尽量缩短,其他构造与横杆抗拉试验类似。

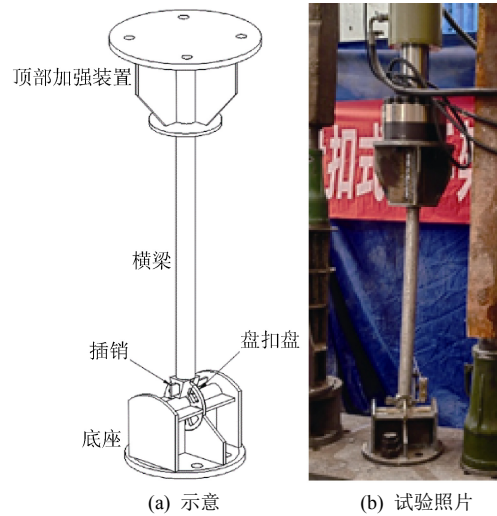


图 9 横杆抗拉试验方案  
Fig.9 The tensile test scheme for the transverse tube



图 10 横杆抗拉试验破坏形式  
Fig.10 The punch failure mode of the transverse tube in tensile test

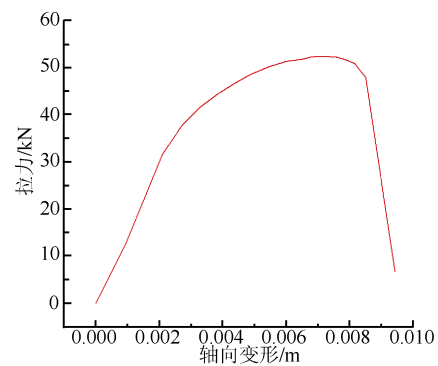


图 11 横杆节点拉力与轴向变形的关系曲线  
Fig.11 Relations between tension and axial deformation of the transverse tube joints

横杆抗压试验装置见图 12。

在压力作用下,横梁端头铸件与立柱承压接触,当压力较大时,立柱钢管发生局部变形,如图 13 所示。

得到轴力和轴向变形之间的关系曲线如图 14 所示。由图可见,极限抗压承载力为  $148 \text{ kN}$ 。

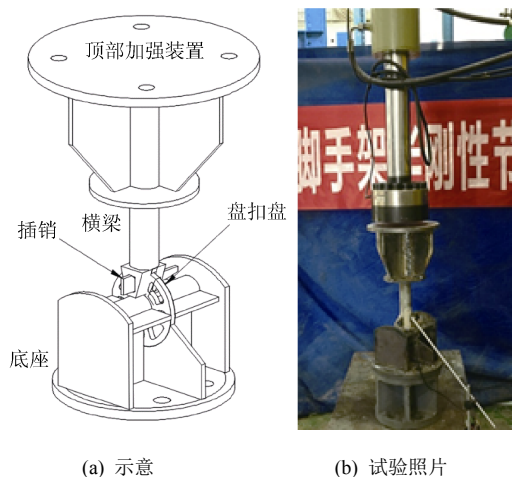


图 12 横杆抗压试验方案

Fig.12 The compression test scheme for the transverse tube



图 13 横杆抗压试验破坏形式

Fig.13 The failure mode of the beam in compression test

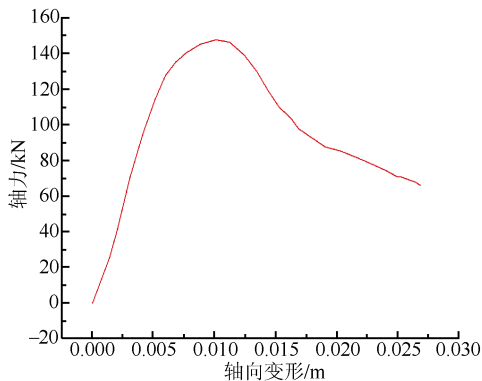


图 14 横杆节点压力与轴向变形的关系曲线

Fig.14 Relations between compression and axial deformation of the transverse tube joints

## 2.4 斜杆抗拉试验

斜杆连接接头构造与横杆存在明显差别, 在斜杆与连接盘之间存在转换件。在轴力作用下, 转换件、连接盘和插销均承受弯矩作用。复杂的构造导致其节点半刚性特性更加明显。斜杆的抗拉和抗压节点装置与横杆类似, 但由于斜杆与立柱之间不垂直, 使得立柱的固定底座构造相对复杂。脚手架斜杆的角度与斜杆长度、横杆长度、横杆间距等因素有关。本研究中仅对斜杆倾斜角

度为  $45^\circ$  的情况进行了试验研究。

斜杆抗拉试验装置示意和试验照片如图 15 所示。

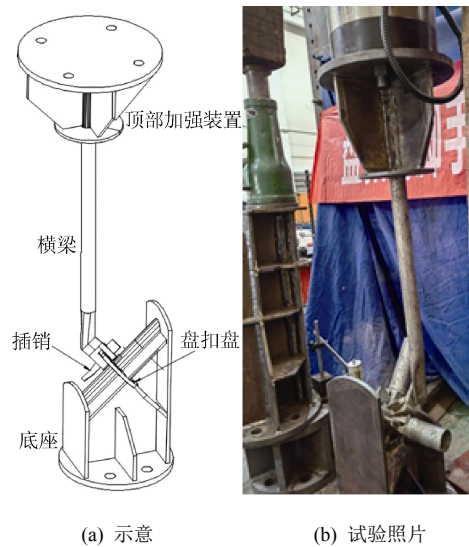


图 15 斜杆抗拉试验方案

Fig.15 The tensile test scheme for bracing tube

在斜杆抗拉试验中, 随着斜杆所承受的拉力不断增加, 连接盘插孔外边沿所承受的冲切力不断增加。最终表现为连接盘的冲切破坏, 如图 16 所示。



图 16 斜杆抗拉试验破坏形式

Fig.16 The failure mode of the bracing tube in tensile test

得到节点拉力和轴向变形之间的关系曲线如图 17 所示。可见该节点最大受拉承载力为 30.1 kN, 对应轴向变形为 38.9 mm。

## 2.5 斜杆抗压试验

斜杆抗压试验装置示意和试验照片如图 18 所示。

在压力作用下, 偏心导致对盘扣连接盘产生附加弯矩。当所承受的压力超过节点承载力时, 盘扣连接盘产生明显翘曲, 如图 19 所示。

得到节点拉力和轴向变形之间的关系曲线如图 20 所示。可见, 该节点最大受压承载力为 16.5 kN, 对应轴向变形为 61.1 mm。

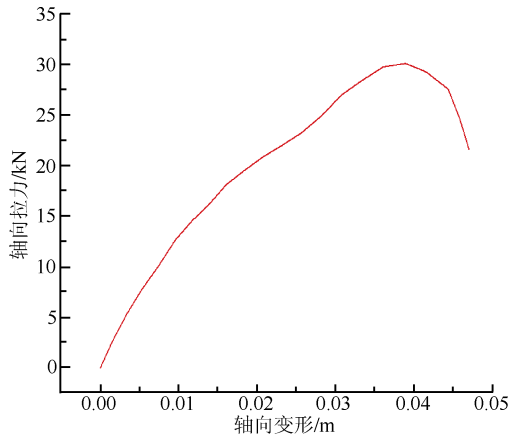


图 17 斜杆节点拉力与轴向变形的关系曲线

Fig.17 Relations between tension and axial deformation of bracing tube joints

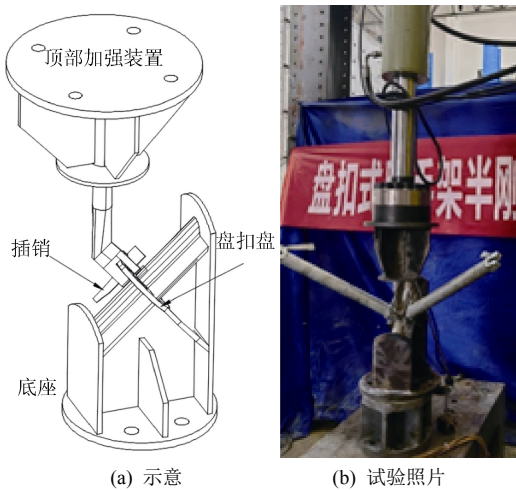


图 18 斜杆抗拉试验方案

Fig.18 The tensile test scheme for bracing tube



图 19 斜杆抗压试验破坏形式

Fig.19 The failure mode of the bracing tube in compression test

### 3 脚手架结构的直接分析法设计

#### 3.1 构件缺陷和结构缺陷

按照 JGJ/T 231—2021《建筑施工承插型盘扣式钢管脚手架安全技术标准》的要求,脚手架搭设完成后立杆的垂直偏差不应大于支撑架总高度的 1/500,且不得大于 50 mm<sup>[9]</sup>。在 GB 50205—2020《钢结构工程施工质量验

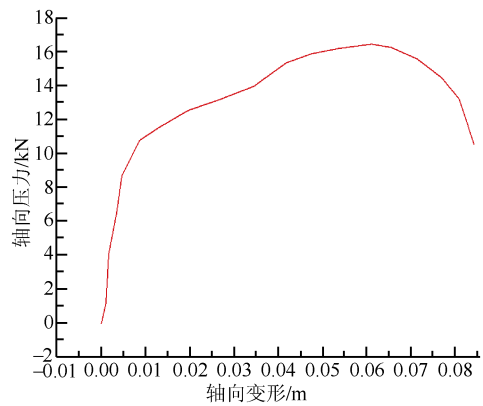


图 20 斜杆节点压力与轴向变形的关系曲线

Fig.20 Relations between axial compression and deformation of bracing tube joints

收规范》中对柱子的垂直度要求是偏差不大于总高度的 1/1 000<sup>[10]</sup>,且不大于 10 mm。比较这两本规范相关要求的区别,可见脚手架结构的允许偏差是普通钢结构的 2 倍。

参考 GB50017—2017《钢结构设计标准》以侧向初变形考虑框架类结构整体缺陷的方式,并在此基础上将变形值放大 1 倍,按照如下公式计算:

$$A_i = \frac{h_i}{125} \sqrt{0.2 + \frac{1}{n_s}} \quad (1)$$

式中:  $h_i$  为计算楼层的高度;  $n_s$  为结构总层数。

一般情况下,架体结构的层数往往较多,  $\sqrt{0.2 + \frac{1}{n_s}}$

取最小值为 2/3。因此可将式 (1) 进行简化,得到最大整体缺陷值为:

$$A_{\max} = \frac{H}{125} \times \frac{2}{3} \approx \frac{H}{180} \quad (2)$$

式中:  $H$  为架体的总高度。

整体缺陷的形态可以同第一阶弹性整体屈曲模态,缺陷最大值为总高度的 1/180。

根据前文所述,脚手架构件的缺陷可按表 3 考虑。

表 3 构件综合缺陷代表值

Table 3 Individual member defect ratio

| 杆件类型 | 二阶分析采用的 $\frac{e_0}{l}$ 值 |
|------|---------------------------|
| 立柱   | 1/350                     |
| 横杆   | 1/270                     |
| 斜杆   | 1/240                     |

#### 3.2 半刚性模型

将前文所得到的节点试验结果进行整理,得到三类半刚性节点模型,分别为横杆弯曲、横杆轴向、斜杆轴向,如图 21~23 所示。

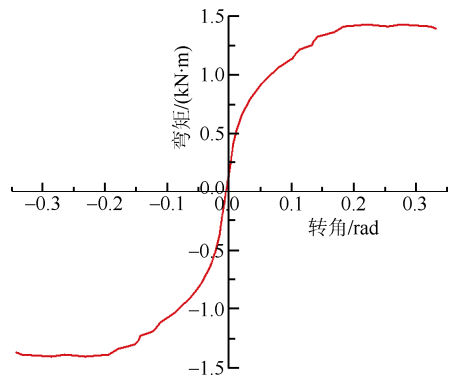


图 21 横杆弯曲半刚性曲线

Fig.21 The semi-rigid curve of the transverse tube bending

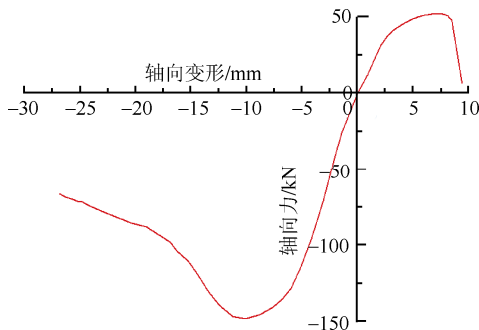


图 22 横杆轴向半刚性曲线

Fig.22 The semi-rigid curve of the transverse tube axial deformation

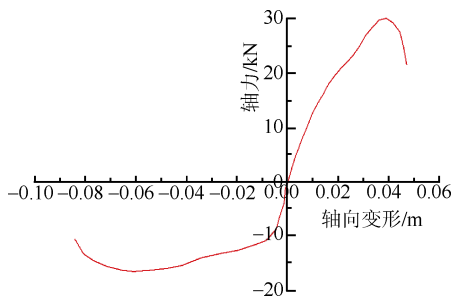


图 23 斜杆轴向半刚性曲线

Fig.23 The semi-rigid curve of brace axial deformation

### 3.3 直接分析法

在脚手架结构的直接分析计算中, 需要考虑以下因素:

- 1) 结构整体缺陷; 2) 构件缺陷; 3) 节点半刚性;
- 4) 结构  $P-\Delta$  二阶效应; 5) 构件  $P-\delta$  二阶效应。

在考虑上述因素的前提下, 对所有可能的荷载组合工况进行非线性计算。

由于脚手架构件均采用非薄壁类圆管, 可能的构件破坏模式包括材料屈服和构件受压弯曲失稳, 前者可通过构件材料应力体现, 后者通过几何非线性计算得到验证。因此这两种破坏模式均可通过直接分析法的应力结果体现。

## 4 工程案例

该工程为用于大型演出的临时 LED 屏幕支架, 采用

盘扣式脚手架结构形式。结构高度为 37.5 m, 平面尺寸为 9 m×9 m。立面层高为 1.5 m。结构立面布置见图 24。平面上设置闭环水平支撑, 布置见图 25。所采用的杆件截面: 立柱为圆管 60.3 mm×3.2 mm, 横杆为圆管 48 mm×2.5 mm, 竖向支撑为圆管 42 mm×2.5 mm, 水平支撑为圆管 42 mm×2.5 mm, 立柱材料为 Q355B, 横杆和斜杆材料为 Q235B。顶层设置平台, 用于放置部分设备, 恒荷载为 2 kN/m<sup>2</sup>; 活荷载为 4 kN/m<sup>2</sup>, LED 重量为 4 kN/m<sup>2</sup>。

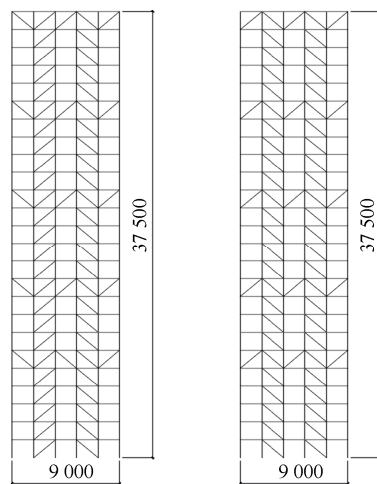


图 24 立面 mm

Fig.24 Elevation

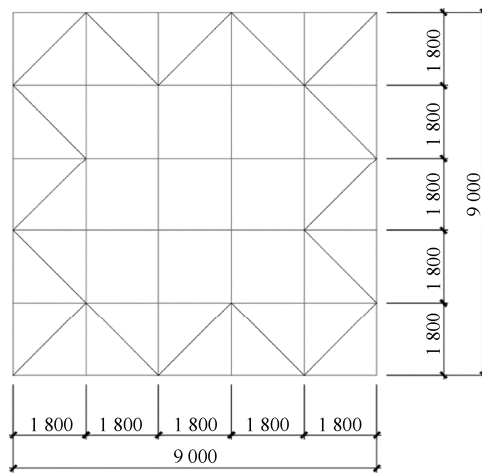


图 25 平面 mm

Fig.25 Plan

利用结构设计软件 NIDA 建立三维计算模型, 如图 26 所示。立柱、横杆和斜杆均采用梁单元进行模拟。柱脚设置为铰接。

除了恒荷载和活荷载外, 另外考虑顶部区域的风荷载 (30 m 以下被周围建筑遮挡, 仅需考虑 30 m 以上部分的风荷载), 基本风压为 0.2 kN/m<sup>2</sup>, 风振系数为 1.2。

按照 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》进行荷载组合。按照总高度的 1/180 考虑为最大整体缺陷, 即顶点最大预变形量为 37.5/180=0.208 m。按照第一阶屈曲

模态为缺陷形态, 如图 27 所示。

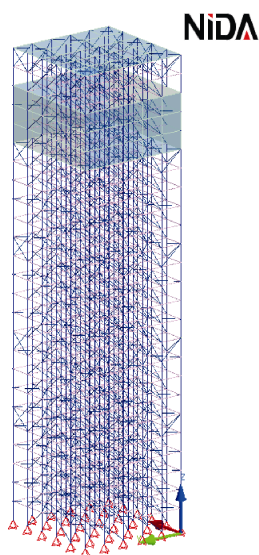


图 26 NiDA 计算模型

Fig.26 The numerical model in NiDA

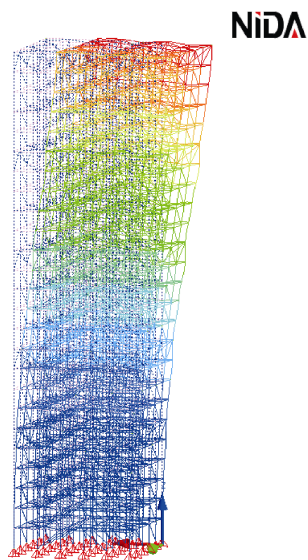


图 27 整体缺陷形式

Fig.27 The shape of overall imperfection

按照表 3 的标准设置立柱、横杆和斜杆的构件缺陷, 计算模型中设置构件缺陷后的局部模型细节如图 28 所示。

在 NiDA 软件中选择多线段模型输入半刚性参数。并将杆件梁端约束条件改成对应的半刚性连接。

将所有组合工况进行非线性计算。得到杆件的包络应力比如图 29 所示, 最大杆件应力比为 0.7。

直接分析法计算结果中的应力比概念与线性计算的应力比有所不同, 由于直接分析法的本质是非线性计算, 所以其结果也不是线性的, 因此, 上文所述的应力比 0.7 只能代表当前的状态是满足承载力要求的, 但不能说明还有 30%的安全冗余度。

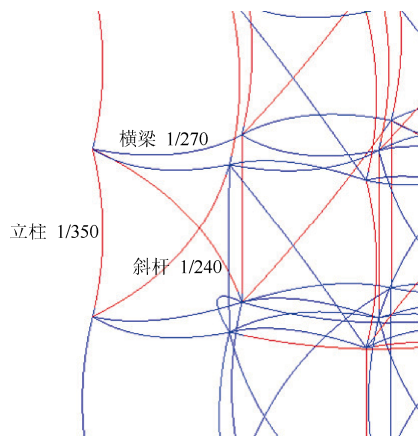


图 28 构件缺陷 (按照 50 倍放大显示)

Fig.28 Component defects (shown in 50 times magnification)

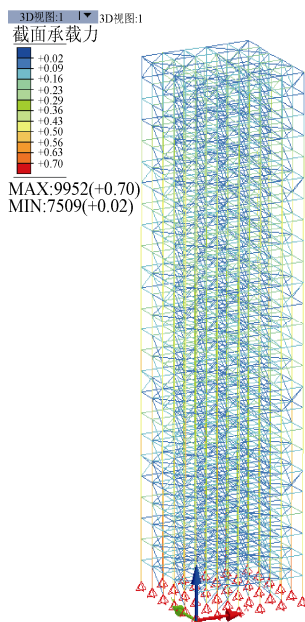


图 29 包络应力比

Fig.29 Envelope stress ratios

为了对结构的安全性有更加深入的了解, 一般需要对结构的极限承载力做更加全面的计算。主要包括两个方面: 1) 通过几何非线性计算, 对结构整体稳定性做定量评估; 2) 通过双非线性 (几何非线性和材料非线性) 计算, 对结构材料的弹塑性和几何稳定性做全面评估。

以荷载组合 (1.0 恒荷载+1.0 活荷载) 为基本荷载条件, 分别进行几何非线性极限承载力和双非线性极限承载力分析。得到荷载系数和顶层侧向位移的关系曲线, 如图 30 所示。

从图 30 所示的曲线可见, 在仅考虑几何非线性情况下, 在 3.34 倍 (1.0 恒荷载+1.0 活荷载) 作用下, 结构发生几何失稳; 若考虑双非线性, 则在 2.81 倍作用时, 结构达到极限状态, 发生局部区域的杆件材料屈服, 塑性铰位置见图 31。可见塑性铰主要发生在中下部立柱上。

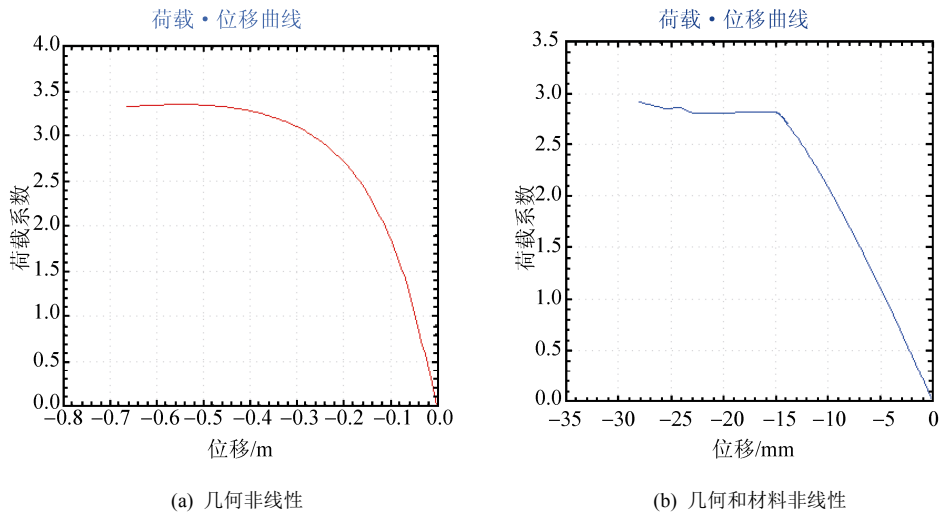


图 30 荷载和位移曲线  
Fig.30 Load-displacement curves

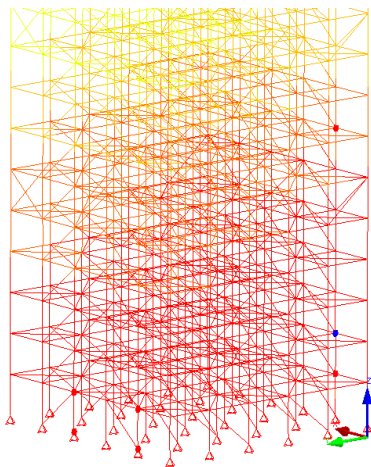


图 31 塑性铰分布  
Fig.31 Plastic hinge distribution diagram

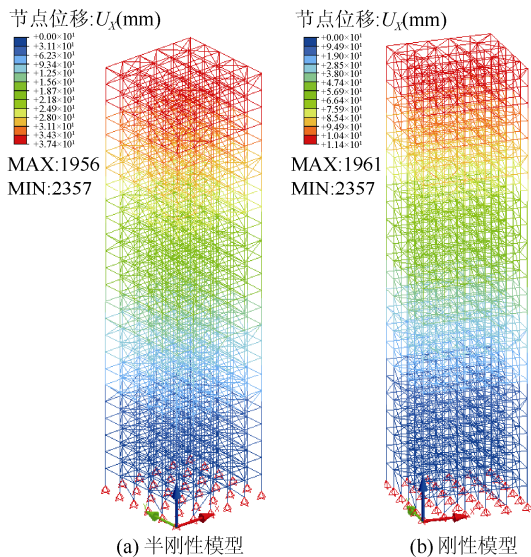


图 32 结构侧向变形比较  
Fig.32 Comparisons of lateral deformation of structures

另外, 比较节点半刚性和节点刚性假定的该结构在风荷载作用下的侧向变形见图 32。

在半刚性模型中, 风荷载导致的顶点侧向变形为 37.4 mm; 在刚性模型中, 顶点侧向变形为 11.4 mm。由此可见节点半刚性对结构的整体刚度影响显著, 其中横梁和斜杆轴向半刚性的影响尤为重要。节点刚度同样也会影响结构整体稳定性, 以 (1.0 恒荷载+1.0 活荷载) 为基准荷载条件的弹性屈曲分析结果表明半刚性模型的最低阶屈曲特征值为 5.71, 刚性模型的最低阶屈曲特征值为 6.92。

## 5 结束语

提出了一种基于直接分析法的脚手架结构精细化设计方法。主要研究成果和结论包括以下方面:

1) 针对盘扣式脚手架结构, 建立了不同类型脚手架杆件的初始弯曲比。

2) 对盘扣式脚手架节点的半刚性特性进行了试验研究, 基于试验结果建立了盘扣式脚手架结构节点半刚性模型, 包括横梁的弯曲及轴向半刚性模型和斜杆半刚性模型。但由于受限于试验条件, 目前试验的样本数量较小, 不能对结果的可靠度给出定量结论。因此, 建议在采用本论文研究成果时, 对节点的承载力和刚度进行一定折减处理。

3) 基于初弯曲设计值和半刚性特性模型, 利用非线性分析工具 NIDA 进行脚手架结构的直接分析法设计, 并将其应用工程案例中。

4) 相比于传统脚手架设计方法, 本文提出的精细化设计方法不仅能判断构件承载力, 还能综合评估结构整体稳定性。

## 参考文献

[1] 张志超, 陈向荣, 林冰, 等. 脚手架立杆套管接长下轴压稳定

- 性研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 228–238.
- [2] 袁雪霞, 金伟良, 鲁征, 等. 扣件式钢管支模架稳定承载能力研究[J]. 土木工程学报, 2006(5): 43–50.
- [3] 陈志华, 陆征然, 王小盾. 钢管脚手架直角扣件刚度的数值模拟分析及试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(9): 100–108.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] KATO B. Cold-Formed welded steel tubular Members in axially compressed structures, stability and strength[M]. Applied Science Pub, 1982.
- [7] KIM S E, LEE J. Improved refined plastic-hinge analysis accounting for local buckling [J]. Engineering Structures, 2001, 23(8): 1031–1042.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构工程施工质量验收规范: GB 50205—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.