

# 非均布荷载下扣件式脚手架的随机缺陷稳定分析

陈 东, 丁克伟, 何夕平

(安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 针对有缺陷的扣件式钢管脚手架, 研究了其在非均布荷载下的全过程受力性能, 提出了一种改进随机缺陷法, 系统地分析了架体在不同荷载分布和各种缺陷随机耦合情况下, 其相应失稳形态及极限荷载的随机分布规律, 并进行了相关试验. 发现架体立杆、水平杆及斜撑的应力均为阶梯状分布, 架体在非均布荷载作用下呈现出立杆波浪形失稳形态, 并且其极限荷载符合正态分布规律. 研究表明架体中的水平杆和斜撑均参与架体受力, 内力通过这两种杆件的传递在架体立杆中实现再分配, 从而使得立杆应力从上到下逐渐减小, 并使每根立杆均参与架体的受力. 此外, 由规范计算得到的架体稳定承载力具有很高概率可靠性, 但是并不是架体稳定承载力的下限, 在某些情况下, 可能会存在安全隐患.

**关键词:** 扣件式钢管脚手架; 随机缺陷; 非均布荷载

中图分类号: TU755.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)05-0661-08

## Stochastic imperfect stability of fastener scaffold under non-uniformly distributed load

CHEN Dong, DING Kewei, HE Xiping

(School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu Univ., Hefei 230601, China)

**Abstract:** The whole process of mechanical performance was studied for fastener scaffold with imperfections under non-uniformly distributed load and advanced stochastic imperfections method was put forward. Based on these, considering different load distribution and random coupling of various imperfections, buckling modes and random distribution of ultimate load were adopted and relative experiments were made. It was pointed out that the stress of vertical bars, horizontal bars and braces presented step distribution, and instable mode of scaffold was undulating form under non-uniformly distributed load, and the limit load conformed to normal distribution. The results indicate that the horizontal bars and brace participate in the work of the scaffold. The internal force goes through the two types of bars to realize redistribution in every vertical bar in order to decrease the stress from the top to the bottom of the vertical bar and involve them in the stress of the scaffold. In addition, the stable capacity calculated by specification has the very high probability but it is not the stable capacity limit. In some cases, it may pose a safety hazard.

**Key words:** fastener steel tube scaffold; stochastic imperfection; non-uniformly distributed load

扣件式钢管脚手架是一种拆装方便、易于运输、通用性强的施工支撑体系. 在国内建设领域使用量巨大, 但是, 在施工阶段, 脚手架由于各种原因而发生的倒塌事故也频繁发生, 其失稳倒塌事故属于城市重大危险源<sup>[1]</sup>, 应当引起高度重视.

由于扣件钢管脚手架反复使用的特点, 钢管、扣件均存在不同程度的变形、磨损、腐蚀等不利因素, 扣件式钢管脚手架是一种缺陷敏感型的杆系结构<sup>[2]</sup>. 目前, 国内外针对扣件式钢管脚手架稳定承载性能的研究已有大量的文献, 但是大部分的成果主要集中在架体稳定性、扣件半刚性、以及钢管不同间距、步距对架体承载性能的影响等方面<sup>[2-5]</sup>. 针对架体缺陷稳定方面的研究较少, 并且主要集中在均布荷载、单一缺陷对架体稳定性能的影响方面<sup>[6-8]</sup>. 对架体在非均布荷载、各种缺陷因素随机耦合的稳定性能方面的研究则更少.

扣件式钢管脚手架缺陷主要包括钢管初弯曲、不同管径壁厚、不同扣件扭紧力矩、搭设偏差等,

并且这些缺陷在架体实际应用时都是随机分布的<sup>[9]</sup>.

为此, 针对以上情况, 展开如下研究: (1) 根据规范<sup>[10]</sup>, 建立一个 $8\times 8\times 6$ 的满堂支撑架体, 重点研究架体在满铺非均布荷载作用下的失稳机理; (2) 根据架体的失稳形式, 提出一种改进的随机缺陷法, 在保证分析精度的同时, 降低随机分析的计算量; (3) 在以上研究的基础上, 结合实测数据, 对扣件式支撑架进行各种缺陷的耦合随机稳定分析, 并与规范计算的架体稳定承载力进行了对比, 进而得到了规范计算值的安全可靠度; (4) 为了验证本文所采用的数值分析策略的合理性, 针对一个扣件式钢管脚手架进行非均布加载试验, 并进行了分析对比.

## 1 脚手架随机缺陷稳定分析

### 1.1 数值模型

本文建立ANSYS数值分析模型如下, 如图1: 模型尺寸 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ , 立杆间距 $1\text{ 200}$

mm, 步距1 700 mm, 扫地杆离地距离200 mm, 按文献[10]布置斜撑, 钢管尺寸 $48 \times 3.5$  mm, 弹性模量 $2.06 \times 10^5$  MPa, 屈服强度205 MPa, 泊松比0.3, 材料为理想弹塑性, 根据后文试验(2.4节)和文献[11], 扣件 $M-\theta$ 关系公式采用:

$$M=0.85 \times (-1.7816 \times \exp(-\theta/(0.0257-0.112T)) + 1.7529) \quad (1)$$

式中:  $T$ 为扣件扭紧力矩,  $N \cdot m$ , 本文取40  $N \cdot m$ ;  $M$ 为扣件弯矩,  $kN \cdot m$ ;  $\theta$ 为扣件转角,  $rad$ .

采用BEAM188单元模拟立杆和水平杆, LINK8单元模拟斜撑, 同时进行材料非线性和几何非线性分析, 采用combin39单元模拟扣件.

### 1.2 非均布荷载作用下架体的稳定性能

实际工程中, 由于混凝土浇筑方法的不同, 架体在很多情况下承受的是非均布荷载, 因此本节主要研究架体在非均布荷载下稳定性能. 加载方式如图2(即先在架体顶端施加0.5P的局部荷载, 然后再施加另外0.5P的荷载, 共有四种加载方式), 并且荷载均作用在立杆顶端.

#### 1.2.1 不同加载下架体全过程受力情况

图3表示的是架体中位移最大节点的荷载-位移曲线, 从图中可以看出, 在加载的初期架体变形较小, 随后架体突然发生失稳, 失稳后变形迅速增大. 四种加载方式中, 极限荷载从大到小的加载情况依次为d、a、b和c. 与a情况相比, c的极限荷载值降低了约45%, 可见非对称荷载对架体稳定承载力的影响是比较大的.

为了反映四种加载情形下, 架体中的应力分布, 本文截取了架体中间层的一部分杆件的应力分布(如图4). 从图4可以看出, 在四种加载情况下, 架体的立杆和水平杆均参与了受力, 立杆并不是轴心受压而是偏心受压, 以水平杆为分界, 立杆上段平均应力大于下段平均应力, 同时水平杆也是偏心受压, 并且靠近立杆处的平均应力比其他部分大.

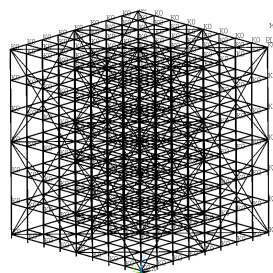


图1 支撑架体有限元模型  
Fig.1 Finite element model of scaffold

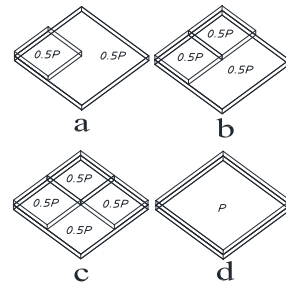


图2 非均布荷载分布  
Fig.2 Non-uniformly distributed load

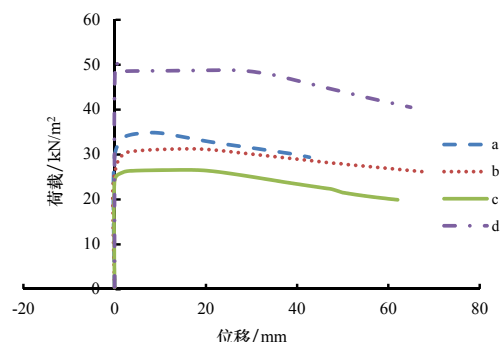
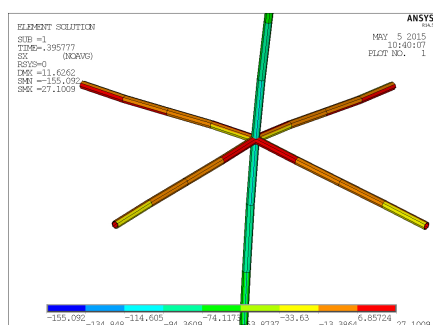
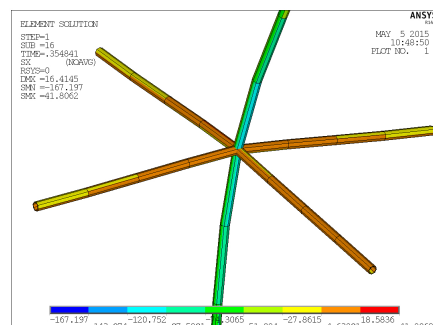


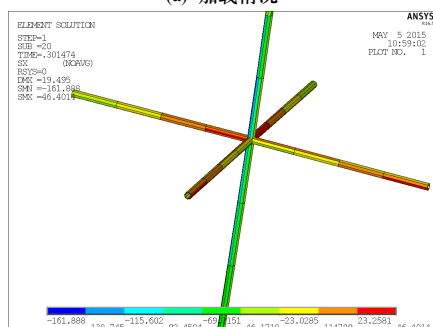
图3 架体荷载-位移曲线图  
Fig.3 Load vs displacement diagram of scaffold



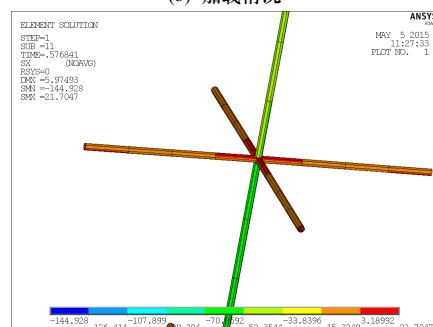
(a) 加载情况



(b) 加载情况



(c) 加载情况



(d) 加载情况

图4 架体立杆和水平杆应力分布  
Fig.4 Stress of vertical and horizontal bars

## 1.2.2 架体失稳形式

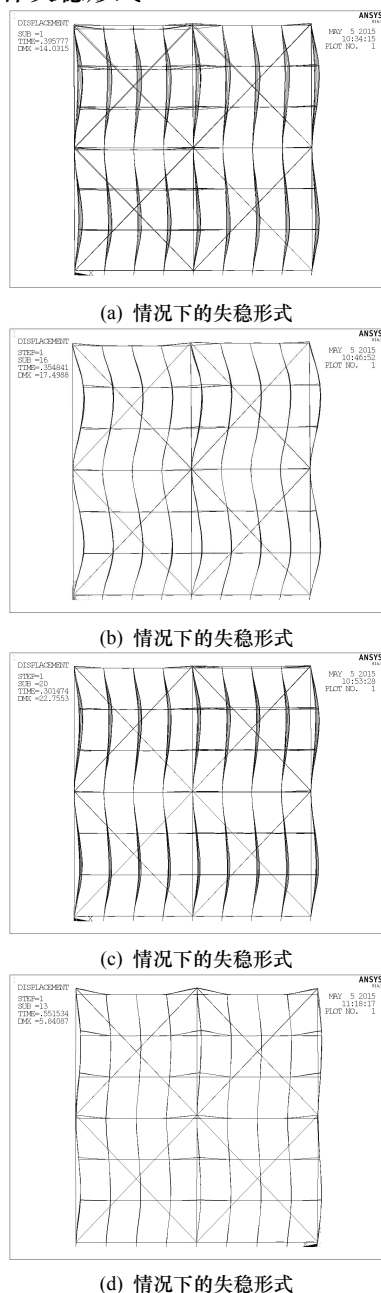


图5 不同加载情况下的架体失稳形式  
Fig.5 Unstable form of different load distributions

从图5可以看出,虽然四种加载情况下的极限荷载相差较大,但是其最终的失稳形式都相差不大,均是立杆呈现出波浪形的变形。

## 1.3 针对架体搭设偏差的改进随机缺陷模态法

根据钢管扣件式脚手架的使用特点(重复性、手工搭设等),架体不可避免的存在节点(水平杆和立杆交点)搭设偏差,并且该偏差是随机分布的,是架体的安装缺陷之一,对架体的稳定承载能力影响较大<sup>[2]</sup>,如果采用随机缺陷法(即采用蒙特卡洛法进行缺陷随机抽样分析)来分析架体节点搭设偏差的影响,则需要假定架体每个节点 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向上的偏差为随机变量,即每个节点有三个随机变

量,整个架体的随机变量数为 $3 \times$ 节点数,可见,其涉及的随机变量数是非常大的,需要抽取足够多的样本才能保证随机计算的精度。

但是,从图5可以看出,架体失稳变形主要集中在架体每层节点的水平位移上,如果架体的搭设偏差符合这样的位移分布,显然对其极限荷载是很不利的,为此,针对架体搭设,本文提出一种改进的随机缺陷法:将架体每层节点当作一个整体,其搭设偏差仅有 $x$ 、 $y$ 两个方向,也即架体每层仅有两个随机变量,这样整个架体随机变量数为 $2 \times$ 架体层数,可见随机变量数大大减少,需要抽取的样本数也将大大减少。

为了验证针对架体搭设偏差的改进随机模态法的正确性,采用蒙特卡洛法进行了以下对比分析:数值模型同1.1节,均布加载,节点搭设偏差假定为正态分布<sup>[9]</sup>,其偏差值<sup>[10]</sup>取20 mm。

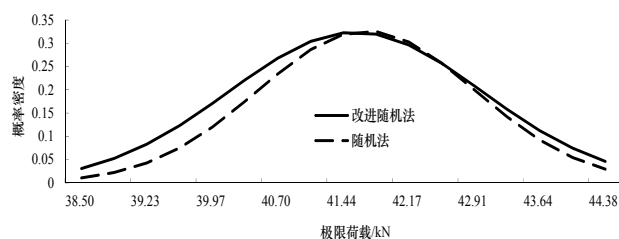


图6 架体极限荷载的概率密度函数图  
Fig.6 Probability density function of ultimate load

表1 两种随机法比较  
Tab.1 Comparison of two stochastic methods

极限荷载	样本数 /个	最大值 /kN	最小值 /kN	均值 /kN	方差 /kN
随机法	800	44.03	38.71	41.70	1.22
改进随机法	200	43.94	39.16	41.67	1.23

从图6和表1可以得出,改进随机缺陷模态法在概率密度分布函数、最大值、最小值、均值、方差等方面与原随机缺陷模态法相差不大,但是样本个数却仅有原来的25%,可见,改进的随机缺陷模态法在保证精度的同时,大大减小了计算量,为架体的随机缺陷稳定分析提供了方便。

## 1.4 各种随机缺陷耦合的架体稳定分析

市面上采用扣件式钢管脚手架,均不同程度的存在着各种缺陷,主要有:搭设偏差(包括钢管初弯曲)、钢管管径偏差、钢管壁厚偏差、扣件扭紧力矩偏差等。这些缺陷都是随机变化并且同时存在于架体中的,具有耦合效应。

为此在1.3节改进随机缺陷法的基础上,将以上各种缺陷统一考虑,进行随机缺陷稳定分析,并与规范计算值进行比较。

数值模型同1.1节,各随机变量假定符合正态分布<sup>[9,12]</sup>,样本个数取200,加载方式:非均布荷载(c情况,如图2),根据市面上经常采用的钢管尺寸、结合本文试验数据并参考相关文献<sup>[2,12]</sup>,本文采用实测各缺陷正态分布数据如表2所示.

表2 各缺陷正态分布数据  
Tab.2 Normal distribution data of imperfections

随机变量	分布规律	均值	标准差	最小值	最大值
管径/mm	高斯分布	47.84	0.25	47.46	48.4
壁厚/mm	高斯分布	3.29	0.13	2.98	3.44
扣件扭紧力矩/N·m	高斯分布	37	15	20	60
节点搭设偏差/mm	高斯分布	0	16.77	-33.55	33.55

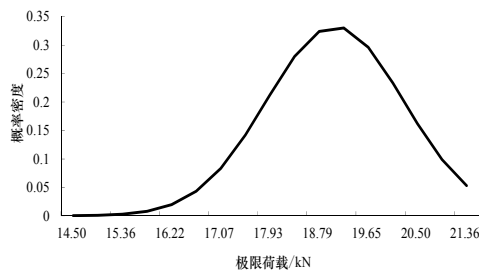


图7 极限荷载概率密度函数图  
Fig.7 Probability density function of ultimate load

从图7可以看出,各种随机缺陷耦合的架体稳定极限承载力也符合正态分布规律.其正态分布参数见表3.

表3 极限荷载正态分布参数  
Tab.3 Normal distribution parameters of ultimate load

极限荷载	样本数/个	最大值/kN	最小值/kN	均值/kN	方差/kN
改进随机法	200	21.18	14.75	19.07	1.19

针对1.1节的架体,根据规范(JGJ 130—2011)的规定,本文计算其稳定承载力如下:

立杆计算长度:

$$l_0 = k\mu h = 1.217 \times 1.735 \times 1\,700 = 3\,589.5\text{ mm}$$

$$\text{立杆长细比: } \lambda = \frac{l_0}{i} = 3\,589.5 \div 15.9 = 226$$

$$\text{立杆稳定系数: } \varphi = 0.143$$

立杆稳定承载力:

$$N = \varphi Af = 0.143 \times 506 \times 205 = 14.83\text{ kN}$$

由图7的概率密度函数,根据规范计算的立杆稳定承载力为最小荷载的概率为99%.可见由规范计算得到的架体稳定承载力具有很高概率可靠性,但是并不是架体稳定承载力的下限,在某些不利情况下,可能会存在安全隐患.

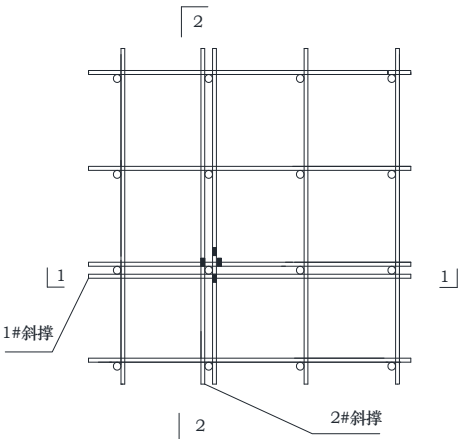
为了验证本文所采用的数值分析策略(单元选择、分析设置等)的合理性,针对一个扣件式钢管脚手架进行非均布加载试验,并进行了分析对比.

2 试验对比

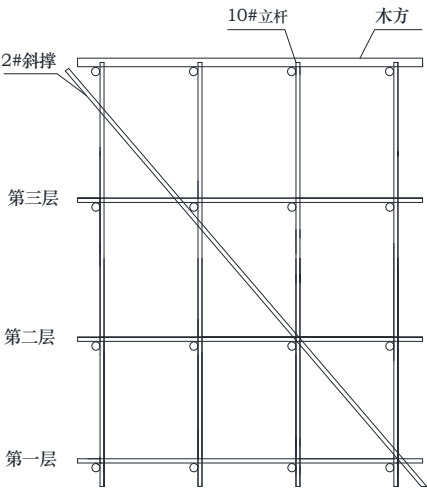
2.1 试验方案

2.1.1 架体搭设及尺寸

架体搭设方案:架体为三层四跨,总尺寸2 850×2 850×4 000 mm,立杆间距950 mm,步距1 300 mm,架体两个方向均设置斜撑,架体底部设置扫地杆距离地面100 mm.



(a) 架体平面图



(b) 2-2剖面

图8 架体搭设图

Fig.8 scaffold erection figure

2.1.2 钢管及扣件尺寸

架体由 50 根钢管组成,经过实测,钢管的外径平均值  $R=24.159\text{ mm}$ ,内径平均值  $r=20.855\text{ mm}$ ,屈服强度平均值  $f_y=235\text{ MPa}$ ,泊松比  $\mu=0.3$ .所有的扣件紧固均用力矩扳手,实测达到  $40\text{ N}\cdot\text{m}$ ,在安装扣件时,所有的扣件的开口必须向外.架体基本无倾斜.



2.2 试验加载

2.2.1 加载设备



图9 架体加载

Fig.9 Scaffold loading

图9为架体的非均布加载方式, 传力途径: 液压千斤顶→工字梁→钢板→木工板→木方楞→架体横杆, 其中, 液压千斤顶位于整个架体的正上方.

2.2.2 加载制度

试验分为预加载和正式加载. 预加载: 主要检验各测量仪器等是否能够正常工作, 使测量仪器、架体等各部分接触密实而能进入工作状态. 正式加载: 加载分为若干个等级, 每次加荷持续15 min, 如表4.

表4 加载级数及加载值

Tab.4 Loading series and loading value

实验 序号	每级荷载 /kN	千斤顶施加的累计荷载/kN
1	8.732	8.732
2	4.061	12.793
3	8.123	20.916
4	8.123	29.039
5	8.123	37.162
6	8.123	45.285
7	8.123	53.408
8	8.123	61.531
9	8.123	69.654
10	8.123	77.777
11	8.123	85.9
12	8.123	94.023
13	8.123	102.146
14	8.123	110.269
15	8.123	118.392
16	8.123	126.515
17	8.123	134.638

2.3 测量设备及测点布置

2.3.1 测量设备

为了能够对架体的内力传递和分配进行较为准确的测量, 本次试验的应力测量采用分布式光纤 (BOTDA) 系统, 主要仪器有普通单模光纤、光纤数据采集仪, 如图10所示, 该系统一次测量就可获取整个光纤覆盖区域内的架体试验数据. 位移侧量采用HYD-200型位移计.

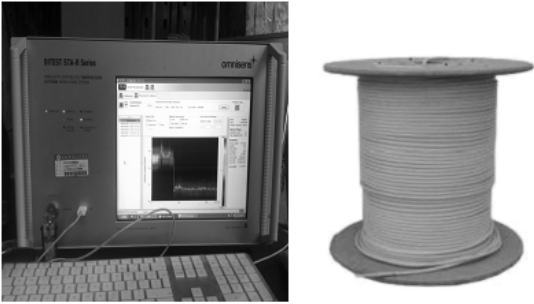
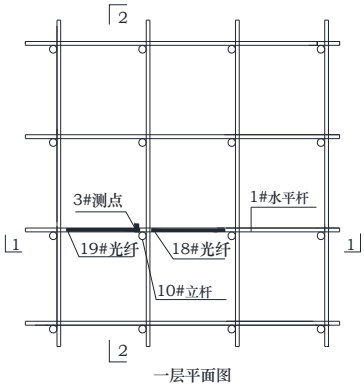


图10 分布式光纤系统

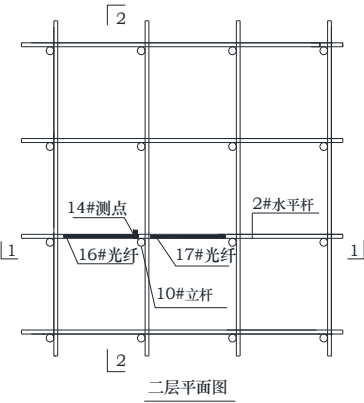
Fig.10 Distributed optical fiber system

2.3.2 光纤铺设及位移计测点布置

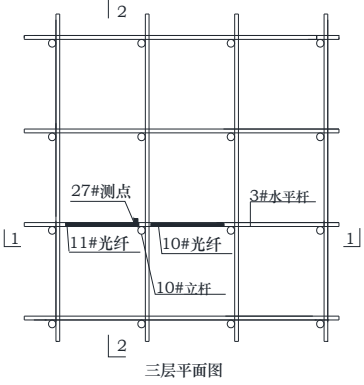
光纤铺设如图11~12所示:



(a) 一层平面图



(b) 二层平面图



(c) 三层平面图

图11 架体水平杆光纤铺设图

Fig.11 Fiber laying of horizontal bars

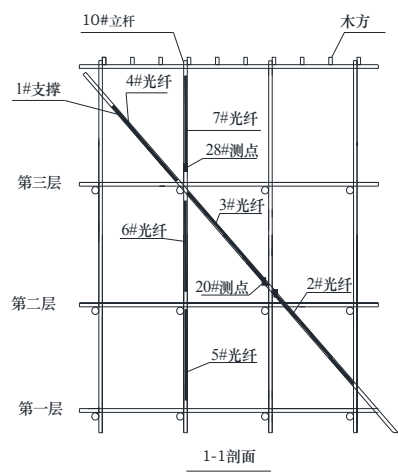


图12 架体1-1剖面光纤铺设图  
Fig.12 Fiber laying on profile

位移计布置在第三层的10号立杆的顶端，采用两个位移计，布置方式如图13所示。

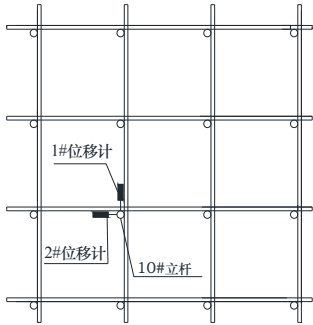


图13 架体位移计布置图  
Fig.13 Displacement meter arrangement

2.4 扣件抗扭试验

脚手架体中的扣件实质上是一种半刚性连接<sup>[8]</sup>，因此，为了确定其 $M-\theta$ 关系曲线，本文针对紧固力矩为40 N·m的扣件进行了抗扭试验。

试验分为预加载和正式加载，预加载：检验各仪器及试验构件是否能正常工作。正式加载：使用万能试验机固定试件的竖杆，利用液压千斤顶对水平杆分级加荷载，每级荷载0.1 kN，分别在水平杆和竖杆上设置百分表，待每级荷载加载稳定后，观察百分表的数值，如图14、15所示。其中 $L=1\ 000\ \text{mm}$ ， $L_a=L_b=200\ \text{mm}$ ，一共进行了四组试验，试验数据平均值如表5。

2.5 试验结果分析

从图16~18，可以看出，在图9所示的加载方式下，10号立杆从下到上，其应力逐段增大，在每层之间应力呈现出跳跃式变化，总体而言立杆的应力分布呈现阶梯状的特点。而与10立杆相连的水平杆(图11)，其应力以10立杆为分界呈现出大小大致相等方向相反的分布特点。1号斜撑三个部分的应

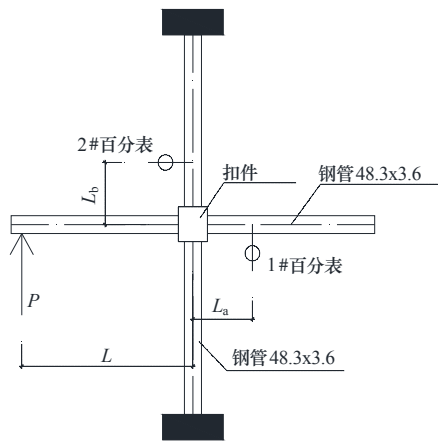


图14 扣件抗扭试验示意图  
Fig.14 Fastener torsion test schematic diagram



图15 扣件抗扭试验现场图  
Fig.15 Fastener torsion test site map

表5 扣件抗扭试验数据

扣件螺栓拧紧扭矩值40 N·m			
弯矩/kN·m	$S_a/\text{mm}$	$S_b/\text{mm}$	$\theta/\text{rad}$
0.1	1.370	0.732	0.003
0.2	2.297	0.874	0.007
0.3	2.988	1.011	0.010
0.4	4.147	1.246	0.015
0.5	6.106	1.484	0.023
0.6	7.797	1.592	0.031
0.7	10.297	1.632	0.043
0.8	15.297	1.832	0.067
0.9	21.297	2.732	0.093

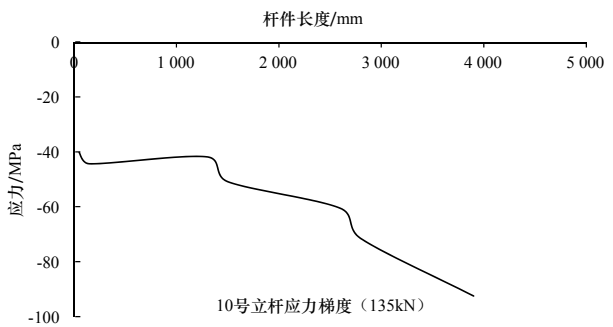


图16 10号立杆应力梯度图  
Fig.16 Stress gradient of vertical bar No. 10

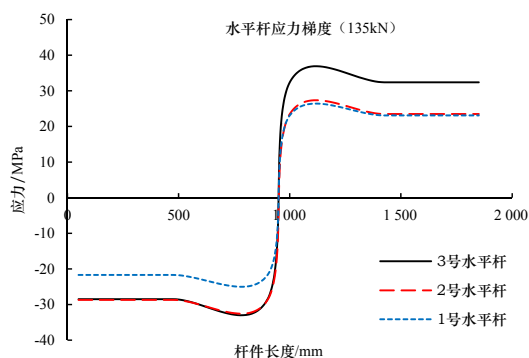


图17 水平杆应力梯度图

Fig.17 Stress gradient of horizontal bars

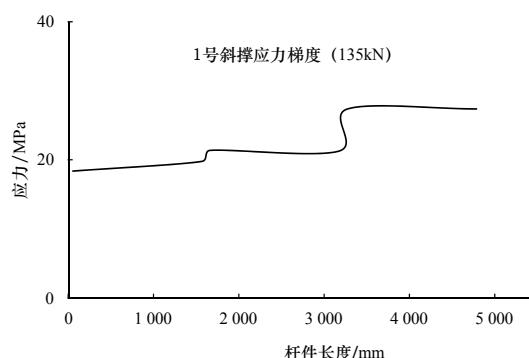


图18 1号斜撑应力梯度图

Fig.18 Stress gradient of 1# brace

力值并不相同,但是在每一层范围内其应力大致相等,总体呈现出阶梯状分布特点.此外,立杆和水平杆均不是轴心受压而是偏心受压,斜撑近似轴心受压,扣件承受弯矩作用.

由以上试验现象可以得出,加载范围内立杆顶端受力较大,水平杆和斜撑均参与架体受力,内力通过这两种杆件的传递在架体立杆中实现再分配,从而使得立杆应力从上到下逐渐减小.此外,架体立杆和水平杆应采用梁单元模拟,斜撑应采用二力杆单元进行模拟,同时应采用弹簧单元模拟扣件.

## 2.6 数值模拟对比

本文利用有限元软件ANSYS进行试验的受力模拟,有限元模型如图19,采用BEAM188单元模拟立杆和水平杆,LINK8单元模拟斜撑,同时进行材料非线性几何非线性分析,假定钢材为理想弹性,采用combin39单元模拟扣件的半刚性.

图20为28号测点的数值模拟应力和试验应力对比曲线,可以看出,两者基本相同.

图21为10号立杆顶部的数值模拟位移和试验位移对比曲线,可以看出,两者总体趋势相同,但是试验曲线的相对波动较大.

图22为节点1(如图19)的应力分布图,从图中可以看出架体侧边的竖向立杆仍承担一定的应力,这

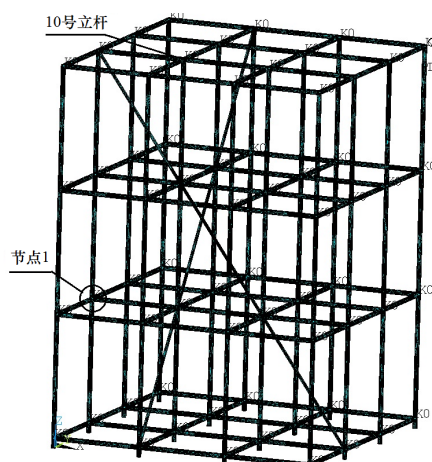


图19 有限元模型图

Fig.19 Finite element model

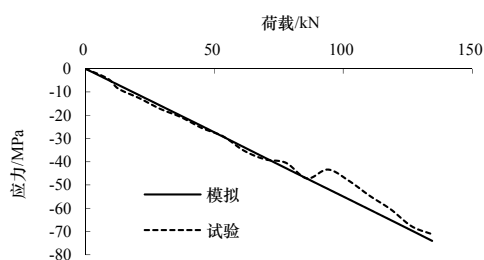


图20 28号测点荷载-应力曲线

Fig.20 Load vs stress diagram of point 28

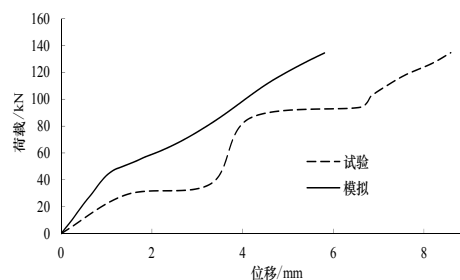


图21 10号立杆荷载-位移曲线

Fig.21 Load vs displacement diagram of vertical bars No.10

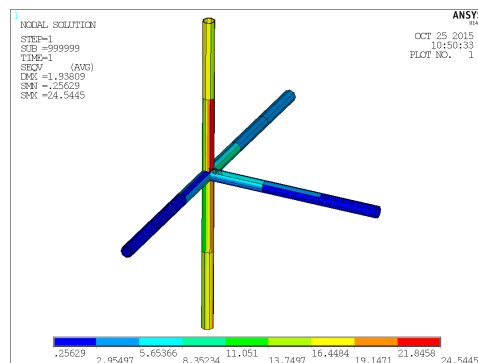


图22 节点1的杆件应力分布

Fig.22 Stress of bars around node 1

说明即使立杆不在荷载的作用范围内,由于水平杆和斜撑的内力传递,仍承担部分应力作用.

综上,利用ANSYS可以比较准确的模拟出架体的受力过程,本文所采用的有限元分析方法和策略是可行的.

### 3 结论

本文系统研究了扣件式钢管脚手架在非均布荷载作用下各种随机缺陷相互耦合的稳定性能并进行了相关对比试验,得出以下结论:

(1) 满铺非对称荷载对架体稳定承载力的影响是比较大的,但是其最终的失稳形式都相差不大,均是立杆呈现出波浪形的变形。

(2) 当架体各种随机缺陷符合正态分布时,脚手架体的稳定极限承载力也符合正态分布规律。

(3) 由规范计算得到的架体稳定承载力具有很高概率可靠性,但是并不是架体稳定承载力的下限,在某些情况下,可能会存在安全隐患。

(4) 架体立杆和水平杆应采用梁单元模拟,斜撑应采用二力杆单元进行模拟,同时应采用弹簧单元模拟扣件。

(5) 加载范围内立杆顶端受力较大,水平杆和斜撑均参与架体受力,内力通过这两种杆件的传递在架体立杆中实现再分配,从而使得立杆应力从上到下逐渐减小,并使每根立杆均参与架体的受力。

#### 参考文献 References

- [1] 郑屹峰. 建筑施工脚手架安全事故分析[D]. 长沙: 中南大学, 2010.  
ZHENG Qifeng. Construction scaffolding safety accident analysis[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [2] 郭建. 实测缺陷对扣件式钢管脚手架结构性能的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.  
GUO Jian. Influence Analysis of fastener style steel pipe scaffolding structure based on measured imperfection[D]. Xi'an: Chan'an University, 2012.
- [3] 敖鸿斐, 罗兴隆. 双排脚手架整体稳定极限承载力通用计算方法[J]. 施工技术, 2005, 34(3): 39-41.  
AO Hongfei, LUO Xinglong. A general calculation method for the ultimate bearing capacity of integral stability of two-wall scaffolding[J]. Construction Technology, 2005, 34(3): 39-41.
- [4] PENG J L, PAN A D E, CHEN W F. Approximate analysis method for modular tubular false work[J]. American Society of Civil Engineers, 2014, 127(3): 256-263.
- [5] 王勇. 超高扣件式钢管模板支架的安全性分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.

- WANG Yong. Safety analysis of ultra-high fastener-style tubular steel formwork support[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [6] 沈勤, 胡长明, 车玲玲, 等. 搭设参数对扣件式钢管模板支架整体稳定性影响的数值分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(2): 7-12.  
SHEN Qin, HU Changming, CHE Lingling, et al. Numerical analysis of the impact erecting parameters on overall stability of coupler steel tube falsework[J]. Industrial Construction, 2010, 40(2): 7-12.
- [7] 袁雪霞, 金伟良, 鲁征, 等. 扣件式钢管支模架稳定承载力研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(5): 43-50.  
YUAN Xuexia, JIN Weiliang, LU Zheng, et al. A study on the stability bearing capacity of fastener-style tubular steel formwork-supports[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(5): 43-50.
- [8] 陆征然, 陈志华, 王小盾, 等. 扣件式钢管满堂支撑体系稳定性的有限元分析及试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, (1): 49-60.  
LU Zhengran, CHEN Zhihua, WANG Xiaodun, et al. Experimental and theoretical study of the bearing capacity of fastener steel tube full-hall formwork support system[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, (1): 49-60.
- [9] 范小周. 扣件式钢管高大模板支撑体系广义初始缺陷及性能分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.  
FAN Xiaozhou. Analysis of generalized initial imperfection and performance test of fastener steel style high-false work support system[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012.
- [10] 中华人民共和国行业标准. 建筑扣件式钢管脚手架安全技术规范: JGJ 130-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Industry standard of the People's Republic of China. Constructional fastener type steel pipe scaffold safety technical specifications: JGJ 130-2011[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.
- [11] 郭向丽. 扣件式钢管模板支架受力性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.  
GUO Xiangli. Investigation on Mechanical Behavior of Coupler-style Steel Tubular Formwork Supports[D]. Xi'an: Chan'an University, 2009.
- [12] 程佳佳. 高大模板支撑体系可靠度分析与研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.  
CHENG Jiajia. Computation and Analysis of Reliability on High-Formwork Support System[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012.

(编辑 桂智刚)