# 立杆初始弯曲随机几何缺陷下带剪刀撑承插型盘扣式脚手架稳定性能研究

牟争强[1],赵 伟[2],赵炳震[1],徐岩军[1],邱 睿[3],张 霓[3*],赵中伟[3]
(1.陕西建工集团股份有限公司,西安 710082; 2.陕西建工铁建工程有限公司,西安 710018;
3.辽宁工程技术大学 土木工程学院,辽宁 阜新 123032)

**摘 要:** 脚手架是建筑工程施工中不可或缺的临时设施,应用十分广泛。现阶段脚手架倒塌事故频发,主要诱因是立杆经反复使用后产生弯曲缺陷,且这类几何缺陷在实际工程中具有明显随机性。文中通过ANSYS有限元软件,结合随机有限元分析方法,建立了精细化带剪刀撑承插型盘扣式脚手架数值模型,最大程度还原工程实际工况,探究立杆初始弯曲随机几何缺陷对脚手架承载能力的影响;并在此基础上,分析剪刀撑类型、布设跨数、平面布置形式及节点密度等参素对该脚手架稳定性能的影响规律。研究结果表明:脚手架的荷载因子由其屈曲模态决定;横向约束对脚手架承载能力的提升幅度会受脚手架横、纵跨数影响;增设垂直剪刀撑后,带横向约束脚手架的承载力可提升20.3%~146.9%;节点密度对架体承载能力的提升效果由剪刀撑与横杆的夹角大小决定。

**关键词:** 重型承插型盘扣式脚手架; 精细化数值模型; 立杆初始弯曲随机几何缺陷; 随机有限元分析; 稳定性研究
**中图分类号:** TU731.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9379(2026)07-0082-10
DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20241130001

# Research on Stability of Scissor-Braced Disk-Lock Scaffolding with Random Initial Bending Imperfections of Vertical Poles

*MOU Zhengqiang*[1], *ZHAO Wei*[2], *ZHAO Bingzhen*[1], *XU Yanjun*[1],
*QIU Rui*[3], *ZHANG Ni*[3*], *ZHAO Zhongwei*[3]
(1. Shaanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Xi'an 710082, China; 2. Shaanxi Railway Construction Engineering Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 3. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123032, China)
*Corresponding author: zhangnii@lntu.edu.cn

**Abstract:** As an indispensable structure in practical engineering, scaffoldings are widely used. However, many engineering accidents are caused by scaffolding failures. One of the main reasons is bending defects caused by the repeated use of the vertical pole in practice Because these geometric imperfections are random, a refined finite element model of scaffolding with scissor braces was established based on the stochastic finite element analysis method using ANSYS finite element software. This method can study the influence of random geometric imperfections from the initial bending of vertical poles on the load-bearing capacity of scaffolding to the greatest extent under actual conditions. On

收稿日期:2024-11-30
基金项目:陕西省交通运输厅交通科研项目(23-49),陕西省住房和城乡建设厅科技计划项目(2023-K21)
作者简介:
牟争强(1977—),男,学士,高级工程师,主要从事建筑工程、土木工程施工管理方面的研究。E-mail:46910539@qq.com。
通信作者:
张 霓(1985—),女,博士,副教授,主要从事施工力学方面的研究。E-mail: zhangnii@lntu.edu.cn。

this basis, the influence of factors such as the type of scissor brace, the number of spans, the layout configuration, and the joint density on its stability was revealed. The results show that the load factor of the scaffold is determined by its buckling mode. The effect of lateral constraints on the load-bearing capacity of scaffolding is affected by the number of horizontal and vertical spans of scaffolding. Vertical scissor braces can increase the load-bearing capacity of scaffolding with lateral constraints at the top by 20.3%-146.9%. The effect of joint density on the load-bearing capacity of scaffolding is determined by the angle between the scissor brace and the ledger.

**Keywords**: heavy-duty disk-lock scaffolding; refined finite element model; random initial bending imperfection of vertical pole; stochastic finite element analysis; stability study

随着建筑行业快速发展，超高层建筑、大跨度桥梁等工程相继出现，对施工技术提出了更高要求。脚手架作为施工现场重要临时支撑与作业平台，其安全稳定性至关重要。目前对脚手架稳定性的相关理论研究仍有待完善，由此引发的倒塌事故屡见不鲜[1]，如图1所示。承插型盘扣式钢管脚手架凭借适用性强、承载力高等优势，在工程中得到广泛应用。已有研究发现，脚手架连接节点属于介于刚接与铰接之间的半刚性节点，且节点半刚性对脚手架稳定性能影响显著[3-6]。



a) 西安民乐园工地脚手架坍塌 b) 厦门市第一医院脚手架坍塌

c) 云南文山脚手架坍塌 d) 南宁沙井脚手架坍塌

**图1　脚手架坍塌实例**

**Fig. 1　Examples of scaffolding collapse accidents**

国内外学者针对脚手架连接节点已开展大量研究：ZHAO等[7]开展轮扣式脚手架节点抗弯性能试验研究，发现连接节点对脚手架整体承载力影响显著，且节点负向抗弯承载力远大于正向抗弯承载力。ZHENG等[8]通过弯矩-转角试验，验证盘扣式脚手架与杯托式脚手架的连接节点均具备半刚性特征。王凝等[9]针对不同插销楔紧度下盘扣式脚手架节点开展抗扭刚度试验研究，得出了插销楔紧度对节点抗扭刚度的作用机理。许强等[10]基于杆系离散元理论构建钢结构半刚性连接分析模型，发现半刚性连接会削弱结构刚度。刘京红等[11]设计了三种斜杆布置方案并开展有限元模拟，结果显示当节点刚度处于$10^6$～$10^9$ N·mm·rad$^{-1}$之间时，对脚手架承载力影响较大；通过对承载力-节点刚度曲线进行非线性拟合并与试验数据对比，提出节点刚度建议值为38.1 MN·mm·rad$^{-1}$。

此外，近年来众多学者对各类脚手架的稳定性能展开了大量研究。董金凤[12]通过对盘扣式脚手架进行屈曲试验，分析工况、步距、竖向斜撑及套筒参数对结构稳定性能的影响，得出减小步距、布置竖向斜撑可有效提升架体稳定承载力，而套筒用量对结构稳定性能基本无影响的结论。PENG等[13]对不同参数的重型脚手架进行了屈曲试验，发现搭设层数不会显著降低脚手架的承载力，顶端水平支撑可有效改善架体稳定性能。LU等[14]依托蒙特卡洛仿真方法，采用ABAQUS对扣件式钢管脚手架进行了随机有限元分析，探究任意位置、不同数量紧固件随机失效对脚手架整体稳定性能的影响，发现扣件失效概率增大，会显著加剧脚手架承载力下降的幅度与概率，也说明仅通过确定性分析评估扣件完好状态下脚手架性能，既不符合实际也存在安全隐患。陆征然等[15]针对不同搭设参数的满堂支撑体系，综合考虑立杆初始缺陷与直角扣件半刚性特性开展有限元分析，探究步距、立杆间距、最小搭设跨数、立杆顶层外伸长度、剪刀撑布设方式等因素对满堂支撑体系承载力的影响规律。

随机有限元分析方法融合随机分析理论与有限元技术，目前已被广泛应用于多个领域。相较于传统确定性有限元分析，该方法通过大量随机模拟，计算结果更贴合工程实际，精准度更高。ZHAO等[16]采用随机有限元分析方法研究了钢绞线在随机腐蚀作用下的轴向拉伸性能，结合试验验证了数值模型与分析方法的可靠性。ZHANG等[17]借助随机有限元分析方法建立了高精度脚手架数值模型，明确了不同荷载工况下几何缺陷对脚手架承载力的影响规律。ZHANG等[18-19]采用随机有限元分析方法对支架结构开展了稳定性分析，并结合一阶可靠度法完成钢管支架可靠度评估。

过往研究大多先对脚手架开展特征值分析，将计算得到的确定性节点缺陷导入模型，再进行非线性屈曲分析。但在实际工程中，脚手架杆件长期磨损、现场搭设方式差异等，都会使架体缺陷呈现随机分布特征。基于此，本文依托ANSYS软件内置随机函数，构建可自动模拟立杆初始弯曲随机几何缺陷的脚手架数值模型，采用随机有限元法，分析立杆初始弯曲随机缺陷下，剪刀撑类型、布设跨数、平面形式及节点密度等参数对重型承插型

盘扣式脚手架稳定性能的影响。承插型盘扣式钢管脚手架依据立杆外径、立杆连接形式及适用场景，分为标准型（B型）与重型（Z型）。本文研究结论基于带剪刀撑重型承插型盘扣式脚手架得出，所采用的分析方法同样适用于绝大多数脚手架的稳定性研究。

## 1 考虑立杆初始弯曲随机缺陷的脚手架有限元模型建立

### 1.1 脚手架有限元模型建立

实际工程中，脚手架横杆、立杆经反复使用，或因现场安装偏差，易产生立杆初始弯曲等几何缺陷，如图2所示。




**图2 立杆初始弯曲实例**

**Fig. 2 Example of initial pole bending**

几何缺陷的随机性是脚手架的典型特征。为量化分析随机几何缺陷对脚手架稳定性能的影响，本文基于ANSYS参数化设计语言，编制出专用数值算法，实现立杆初始弯曲随机几何缺陷的自动模拟。

已有针对承插型脚手架节点的研究表明[5]，其连接节点为半刚性节点，节点的抗弯刚度对架体稳定性能存在显著影响。据此，本文研究对象为重型承插型盘扣式钢管脚手架，立杆截面外径为60 mm，横杆外径为48 mm，杆件壁厚为3.5 mm。建模时约束脚手架底部节点$y$、$z$向位移及$z$向转角，固定脚手架顶端节点$x$、$y$、$z$方向的位移与转角；在架体顶端施加集中荷载，荷载取值对应立杆屈服强度125.2 kN。通过非线性弹簧单元Combin39等效模拟脚手架半刚性节点，采用Beam188单元模拟横杆与立杆，利用“cp”命令耦合横杆与立杆三个方向的平动自由度；将已有研究[20]得到的重型承插型脚手架节点弯矩-转角曲线设置为弹簧单元实常数，如图3所示。

立杆初始弯曲的随机性主要体现在弯曲幅值与弯曲方向两方面。借助ANSYS有限元分析软件可实现立杆随机初始弯曲的模拟：实际工况下，立杆最大弯曲变形可出现在杆件任意位置，可根据现场实测情况在ANSYS中灵活设定。本文为阐述研究方法，假定立杆初始弯曲形状为正弦曲线分布，取杆件中点初始弯曲幅值$\nu_{mo}$作为控制参数，如图4所示。

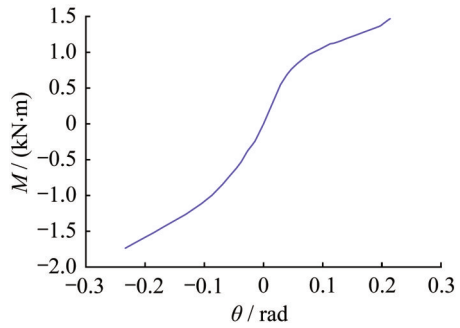



**图3 重型承插型脚手架节点弯矩–转角曲线[20]**

**Fig. 3 Heavy-duty socket scaffolding joint moment-rotation curve[20]**

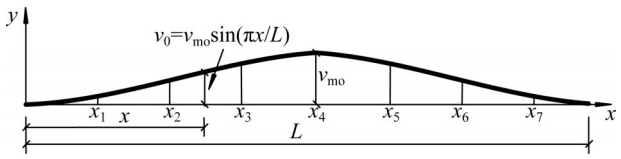



**图4 立杆初始弯曲及局部坐标系**

**Fig. 4 Initial pole bending and local coordinate system**

本文将$\nu_{mo}$设置为随机参数，其最大取值$\nu_{mo,max}$可依据实际杆件最大弯曲量确定。参照常规确定性有限元分析取值规则，本文取初始缺陷为$L/1\,000$（$L$为脚手架的层高）。运用ANSYS中Bsplin命令完成带初始弯曲缺陷立杆的建模，并建立局部坐标系：$x$轴沿立杆轴向，$y$轴为水平方向。通过循环命令逐一完成带初始弯曲缺陷立杆的建模。为模拟弯曲方向的随机性，生成范围在0～2π rad的随机参数$\theta$，$\theta$在区间内均匀分布。在立杆两端节点建立局部坐标系，并将坐标系绕立杆轴向（$x$轴）旋转$\theta$，如图5所示。

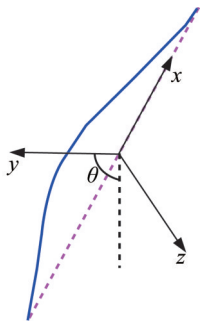
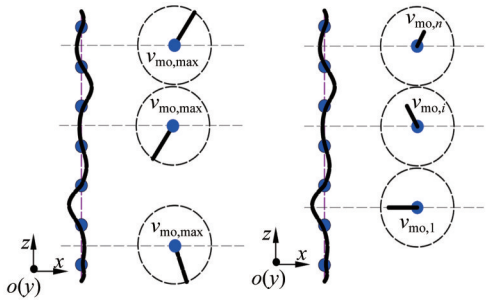



**图5 旋转局部坐标系**

**Fig. 5 Rotation of local coordinate system**

该建模方法可实现立杆初始弯曲幅值与弯曲方向的双重随机模拟。在随机有限元分析中，$\nu_{mo}$既可设为固定值（即$\nu_{mo,max}$，见图6a)），也可设为在0～$\nu_{mo,max}$区间内均匀分布的随机值，如图6b)所示，后者更贴合工程实际，因此本文采用随机幅值$\nu_{mo}$开展建模分析。

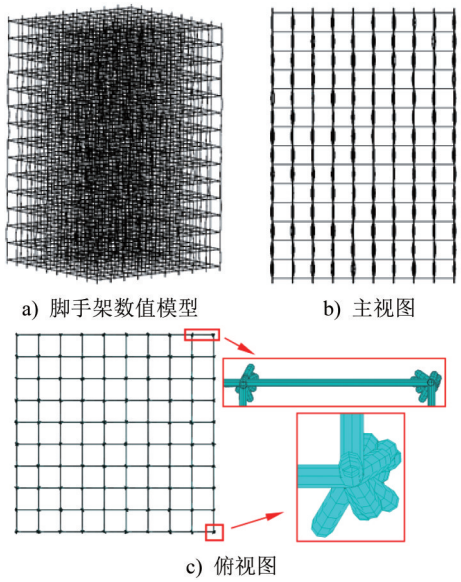



a) $v_{mo}$为定值　　b) $v_{mo}$为随机值

**图 6　随机几何缺陷示意图**

**Fig. 6　Schematic of random imperfections**

基于此，最终建立同时考虑立杆初始弯曲幅值、方向双随机性的脚手架数值模型，如图 7 所示。



a) 脚手架数值模型　　b) 主视图

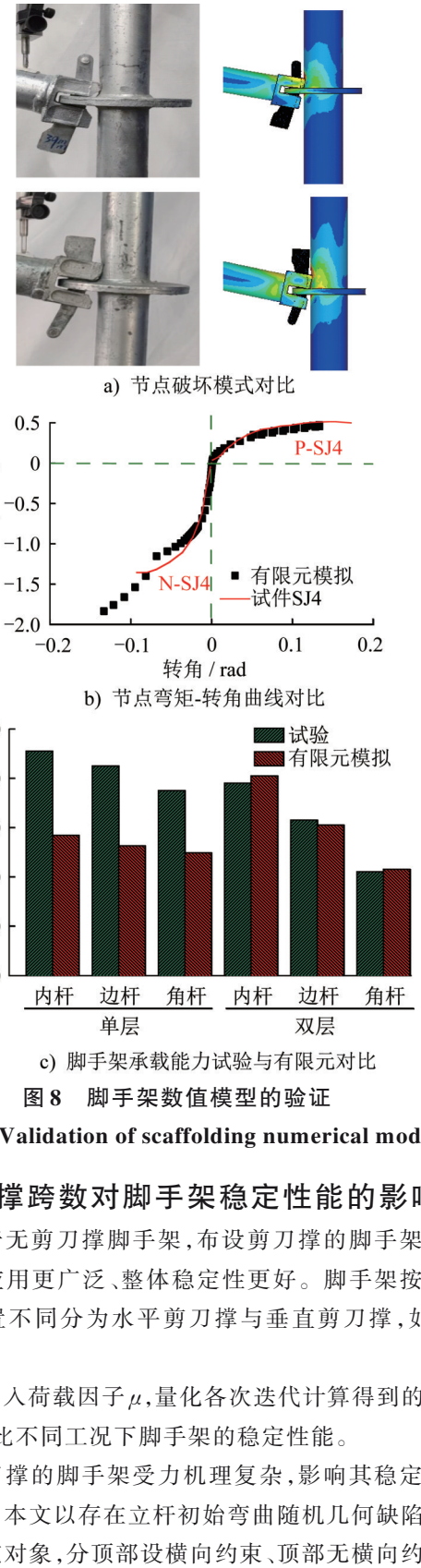
c) 俯视图

**图 7　考虑立杆初始弯曲随机几何缺陷的脚手架数值模型**

**Fig. 7　Numerical model of scaffolding considering random initial bending imperfections of vertical pole**

## 1.2　有限元模型验证

此前研究[21]已验证了 ANSYS 有限元软件用于承插型盘扣式脚手架稳定性分析的准确性，如图 8 所示。本文所采用的脚手架规格与该文献（试件 SJ4）采用的脚手架规格一致，因此可认为本文模型能够精准预测重型承插型盘扣式钢管脚手架的承载力。首先通过试验与数值模拟获取连接节点的弯矩-转角曲线，结果显示，连接节点的负向、正向初始刚度分别为 $5.5\times10^4$ N·m·rad$^{-1}$、$5.12\times10^3$ N·m·rad$^{-1}$，负向、正向极限抗弯承载力分别为 $1.35\times10^3$ N·m、$5.1\times10^2$ N·m。基于上述参数建立考虑节点半刚性的数值模型，将模拟结果与试验数据对比，证实本文所建立的数值模型能够准确反映节点刚度对架体性能的影响。




a) 节点破坏模式对比

b) 节点弯矩-转角曲线对比

c) 脚手架承载能力试验与有限元对比

**图 8　脚手架数值模型的验证**

**Fig. 8　Validation of scaffolding numerical model**

## 2　剪刀撑跨数对脚手架稳定性能的影响

相较于无剪刀撑脚手架，布设剪刀撑的脚手架在工程应用中应用更广泛、整体稳定性更好。脚手架按剪刀撑布设位置不同分为水平剪刀撑与垂直剪刀撑，如图 9 所示。

本文引入荷载因子 $\mu$，量化各次迭代计算得到的承载力指标，对比不同工况下脚手架的稳定性能。

带剪刀撑的脚手架受力机理复杂，影响其稳定性的参数较多。本文以存在立杆初始弯曲随机几何缺陷的脚手架为研究对象，分顶部设横向约束、顶部无横向约束两种工况，探究水平剪刀撑布设层数、垂直剪刀撑布设跨数、斜撑布置形式及节点密度对重型承插型盘扣式脚手架稳定性能的影响规律。

本文剪刀撑采用与脚手架立杆相同的材料参数与

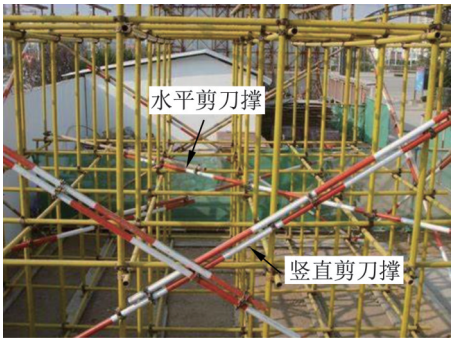
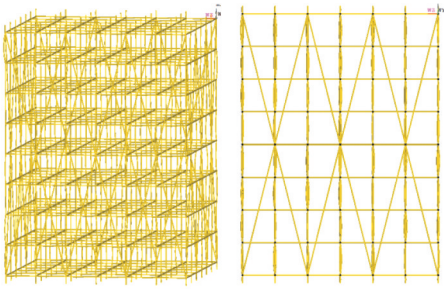



图9 不同类型的剪刀撑布置方式

**Fig. 9 Arrangement of different types of scissor braces**

Beam188单元，通过节点关联、单元复制，完成带剪刀撑且考虑立杆初始弯曲随机几何缺陷的脚手架模型搭建，如图10所示。



a) 总图 b) 主视图

图10 立杆初始弯曲随机几何缺陷带剪刀撑脚手架数值模型

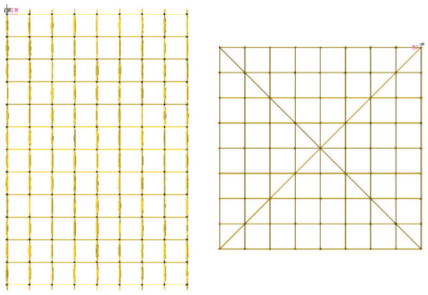
**Fig. 10 Numerical model of scissor brace scaffolding with random initial bending imperfections of vertical pole**

在架体顶端施加均布荷载，荷载取值对应立杆屈服强度125.5 kN，开展非线性屈曲分析，得出用于量化脚手架稳定性能的荷载因子。

## 2.1 水平剪刀撑层数对脚手架稳定性能的影响

为研究水平剪刀撑对架体稳定性能的影响，选取规格为8×8×12(布设跨数)的重型承插型盘扣式脚手架为研究对象，架体横距、纵距、步距均设为1.2 m。首先在架体顶端、底端各设置一道水平剪刀撑，其平面布置形式如图11所示；再分别按照每隔2层、4层、6层、8层设置一道水平剪刀撑，如图12所示。

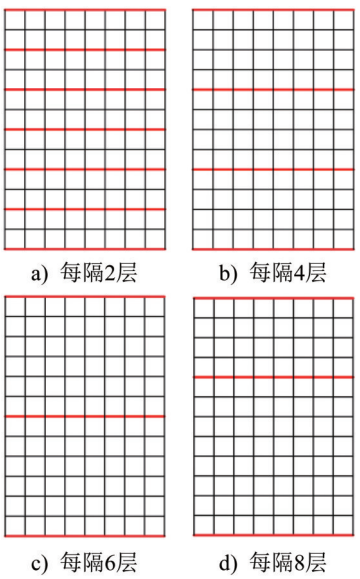
针对上述不同水平剪刀撑布设方案，结合立杆初始弯曲随机缺陷开始100次随机有限元分析，荷载因子$\mu$分布情况如图13所示。由图中荷载因子可知，增设顶部横向约束后，存在立杆初始弯曲几何缺陷的脚手架承载力平均提升了26.1%。水平剪刀撑布设数量对脚手架承载力的提升效果，受顶端横向约束影响，且并非布置数量越多越好。当顶部设置横向约束时，每隔4跨布设水平剪刀撑的脚手架荷载因子最大；当顶部不设置横向约束时，每隔6跨布设水平剪刀撑的脚手架稳定性能最佳。同时可通过对比图中各类脚手架荷载因子标准差，量化各参数对脚手架稳定性的影响程度。



a) 主视图 b) 俯视图

图11 水平剪刀撑脚手架数值模型

**Fig. 11 Numerical model of horizontal scissor brace scaffolding**



a) 每隔2层 b) 每隔4层

c) 每隔6层 d) 每隔8层

图12 水平剪刀撑层数布置形式

**Fig. 12 Arrangement form of horizontal scissor brace with floors**

脚手架的荷载因子由屈曲模态决定。以仅在顶部、底部布置水平剪刀撑的工况为例，顶部设横向约束时，荷载因子主要分布在0.053、0.070两个区间内，受立杆初始弯曲随机几何缺陷的影响，同一区间内荷载因子呈随机分布。对比不同区间对应的屈曲模态可知，云图中红色区域位移最大，蓝色区域位移最小，该位移分布规律同样适用于后续各类脚手架屈曲模态的分析。通过立面模态可以发现，脚手架最大位移产生的位置存在差异，荷载因子越小，脚手架屈曲形态越接近“S”形。顶部无横向约束的脚手架，同样符合屈曲模态数量决定荷载因子大小的规律。

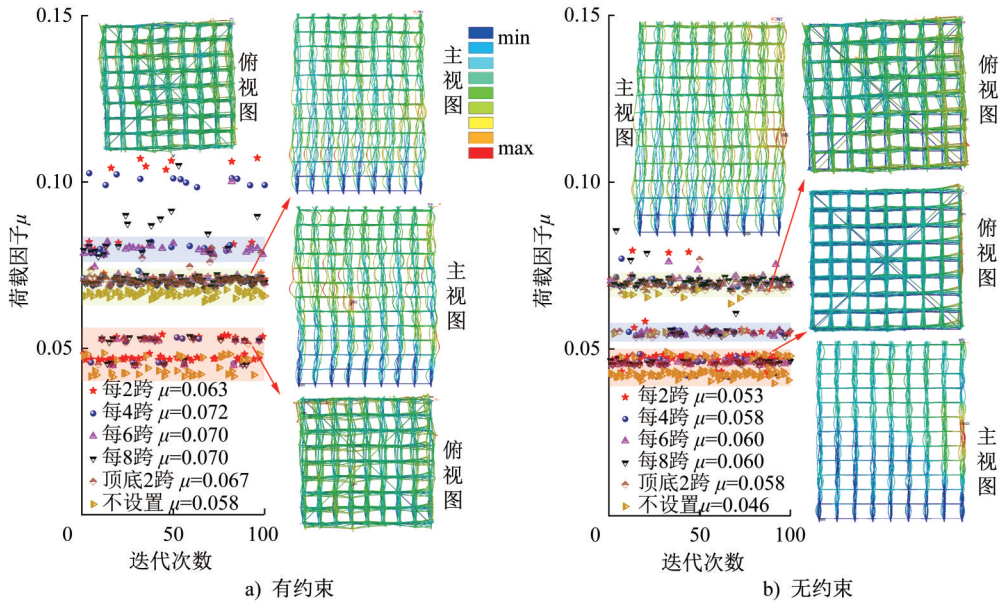



**图13　水平剪刀撑脚手架荷载因子分布及屈曲模态**

**Fig. 13　Load factor distribution and buckling modes of horizontal scissor brace scaffolding**

## 2.2　垂直剪刀撑跨数对脚手架稳定性能的影响

垂直剪刀撑是增强脚手架纵向刚度、提升整体稳定性能的核心构件。本节选取规格为9×9×12(布设跨数)的脚手架,先在架体四周各布置一跨垂直剪刀撑,其布置形式如图14所示。再依次按照每隔2跨、4跨、6跨、8跨各设置一道垂直剪刀撑,如图15所示,分析垂直剪刀撑跨数对脚手架稳定性能的影响。

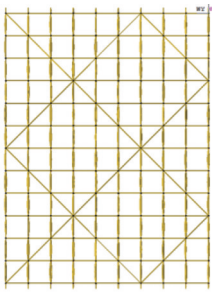


**图14　垂直剪刀撑布置形式**

**Fig. 14　Arrangement form of vertical scissor brace**

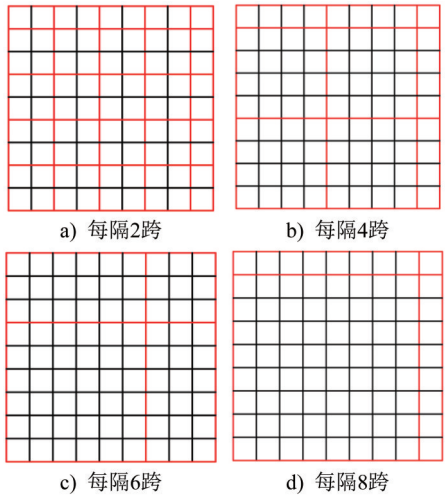



**图15　垂直剪刀撑跨数布置形式**

**Fig. 15　Arrangement form of vertical scissor braces with spans**

考虑立杆初始弯曲随机几何缺陷,不同垂直剪刀撑跨数下脚手架荷载因子分布如图16所示。

受随机几何缺陷影响,荷载因子在对应区间内呈随机分布。对比各布置形式下脚手架荷载因子平均值可知,对9×9×12规格脚手架,顶部设置横向约束后,承载力平均提升了39.1%;结合2.1节结果可以发现,脚手架横、纵向跨数越大,横向约束对脚手架稳定性的提升幅度越明显。脚手架承载力随垂直剪刀撑布设数量增加而逐步提高;相较于设横向约束、无垂直剪刀撑的脚手架,增设垂直剪刀撑后承载提升范围为20.3%～146.9%;相较于无横向约束、无垂直剪刀撑的工况,承载力提升范围为34.8%～165.2%。在顶部设横向约束、每隔6跨布设一道垂直剪刀撑的工况中,荷载因子分为2个区间,对应两种屈曲模态;无横向约束工况的区间数量也与前文相同,说明脚手架的屈曲模式与顶部是否设置横向约束相关。此外,每隔6跨与每隔8跨布设的垂直剪刀撑数量相同,仅在$x$向、$y$向上剪刀撑的交点位置不同。顶部设横向约束时,每隔6跨布置剪刀撑脚手架的荷载因子大于每隔8跨布置剪刀撑脚手架的荷载因子;顶部无横向约束时则相反。由此可见,剪刀撑数量相同、位置不同时,其对脚手架承载力的提升效果取决于顶部是否设置横向约束。

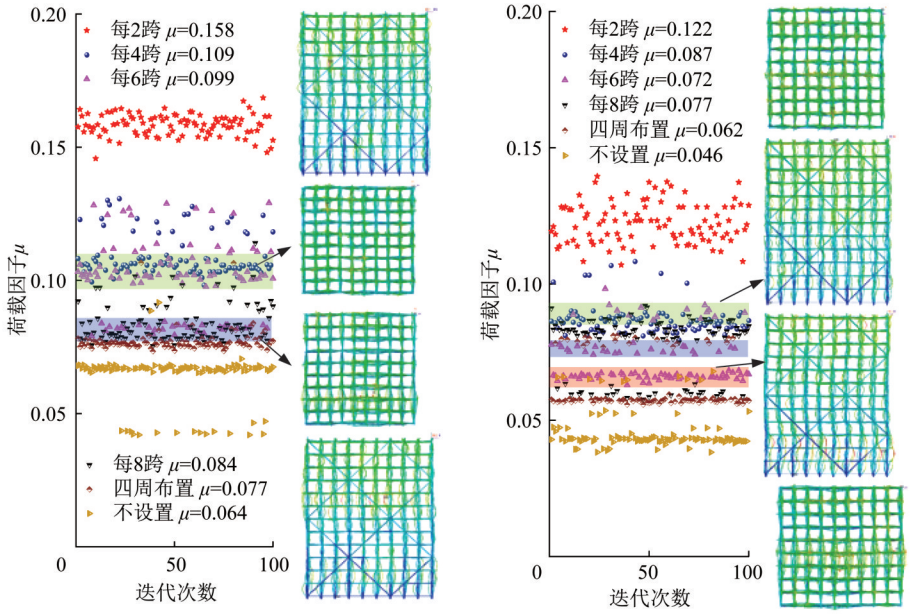



**图16 垂直剪刀撑脚手架荷载因子分布及屈曲模态**

**Fig. 16 Load factor distribution and buckling modes of vertical scissor brace scaffolding**

## 3 剪刀撑布置形式及节点密度对脚手架稳定性能的影响

已有研究表明,剪刀撑平面布置形式、剪刀撑与架体的连接节点密度,对提升脚手架稳定性具有重要作用[22]。本节综合考虑立杆初始弯曲随机几何缺陷,分顶部有无横向约束两种工况,针对不同剪刀撑布置形式、节点密度开展100次随机有限元分析。

### 3.1 剪刀撑布置形式对脚手架稳定性能的影响

选取规格为6×6×8(布设跨数)的脚手架作为研究对象,设置2×2、2×4、2×8、4×2、4×4、4×8(以2×2为例,代表水平跨2格立杆,竖直跨2步脚手架)共六种垂直剪刀撑立面布置形式,如图17所示,分析布设形式对架体稳定性的影响。

不同剪刀撑布置形式下脚手架的荷载因子分布情况如图18、19a)所示。顶部设横向约束后,规格为6×6×8的脚手架承载力提升了9.8%,图18中各组荷载因子均集中在单一区间,因此仅提取2×8布置形式剪刀撑对应的一阶屈曲模态;顶部无横向约束时,剪刀撑为2×8布置形式的脚手架存在两种屈曲模态,如图19b)所示,说明增设横向约束会减少脚手架屈曲模态数量。总体来看,脚手架稳定性受剪刀撑布置形式的影响较大。顶部无横向约束时,2×2型剪刀撑可使无剪刀撑脚手架的承载力提升114.8%;顶部设横向约束时,提升幅度达213.6%。垂直剪刀撑对脚手架承载力的提升效果,一方面取决于顶部是否设置横向约束,另一方面与剪刀撑和架体水平杆的夹角有关。具体来说,对比节点数量相同的2×4与4×2两种剪刀撑布置形式,前者荷载因子更大。由此可知,在6×6×8规格的脚手架中,剪刀撑与水平杆的夹角越大,脚手架稳定性越好。

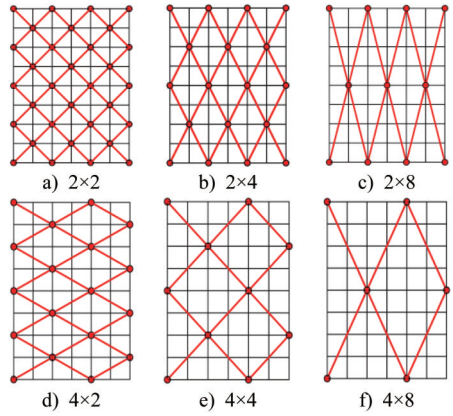



**图17 垂直剪刀撑立面布置形式**

**Fig. 17 Elevation arrangement forms of vertical scissor braces**

### 3.2 节点密度对脚手架稳定性能的影响

结合上文可知,剪刀撑与架体的连接节点数量(节点密度)、剪刀撑与水平杆夹角均对脚手架承载力存在影响。据此本节选取规格为8×8×12、存在立杆初始弯曲随机几何缺陷的脚手架作为研究对象,在架体四周各布置一道垂直剪刀撑,分析不同连接节点数量、不同剪刀撑夹角(图20)对脚手架承载力的影响规律。其中,该规格脚手架单侧立面节点总数为117个,本文以剪刀撑连接节点数量占单侧立面总节点数的百分比表征节点密度。

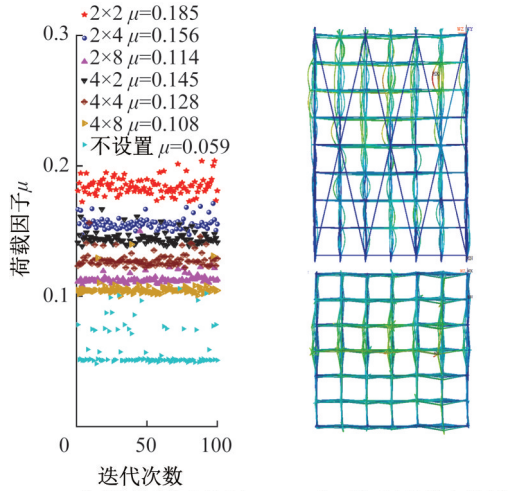



图18　有约束脚手架在不同剪刀撑布置形式下的荷载因子

Fig. 18　Load factor of constrained scaffolding under different scissor brace arrangement

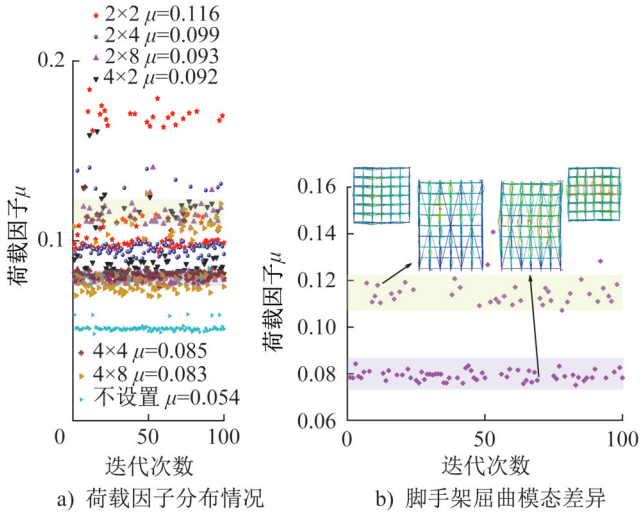



图19　无约束脚手架在不同剪刀撑布置形式下荷载因子及屈曲模态

Fig. 19　Load factors and buckling modes of unconstrained scaffolding under different scissor brace arrangement

图21为不同节点密度、不同剪刀撑夹角下脚手架的荷载因子分布。受立杆初始弯曲随机缺陷影响，各组荷载因子均呈现随机分布特征。为更直观观察不同夹角下节点密度对脚手架承载力的影响规律，引入了节点密度与荷载因子平均值的点线图。顶部设横向约束时，以4×2(密)、4×6(密)、2×6(密)三种布置形式为例。可以发现三种布置形式下的荷载因子均分为两个及以上区间，不同区间屈曲模态存在明显差异，说明脚手架的荷载因子由屈曲模态决定。

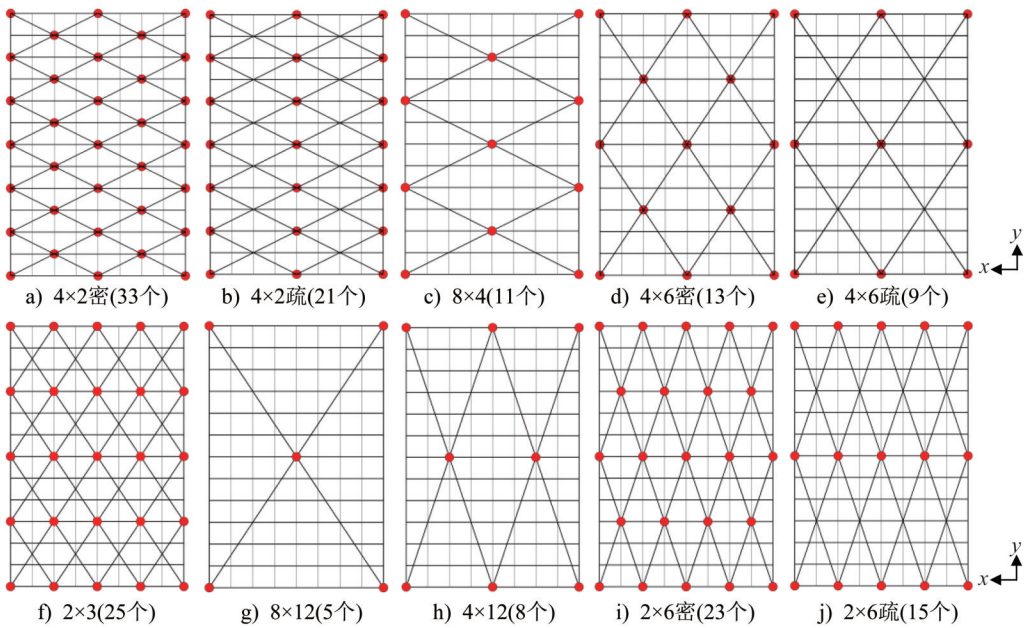



图20　不同夹角下垂直剪刀撑布设形式及节点数量

Fig. 20　Arrangement forms and number of joints for vertical scissor brace at different angles

节点密度对脚手架承载力存在影响，但并非节点数量越多，提升效果越好。其中2×3型剪刀撑的提升效果最优：相较于无垂直剪刀撑工况，顶部设横向约束时承载力提升了108.6%，顶部无横向约束时提升了113.0%；而节点密度更大的4×2(密)型剪刀撑，对应提升幅度分别为98.3%、110.9%。由此可推断：节点密度对架体承载力的提升效果，由剪刀撑与水平杆的夹角决定。结合曲线分析可得，当剪刀撑与水平杆夹角为56°时，节点密度的提升作用最突出，为工程搭设的最优角度。

选取节点密度基本一致、夹角不同的两种布设形式

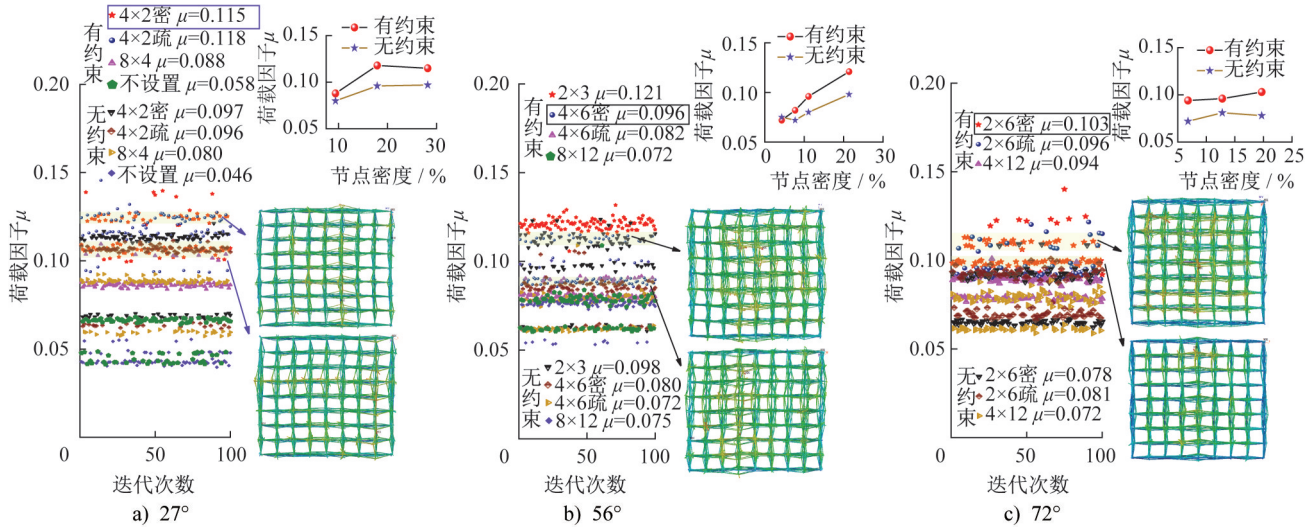



**图21 不同节点密度与剪刀撑夹角下脚手架荷载因子分布**

**Fig. 21 Distribution of scaffolding load factors under different joint density and scissor brace angle**

(图20e)、h))对比,顶部设横向约束时,图20h)荷载因子更大。这表明节点密度相同时,顶部带横向约束的脚手架,剪刀撑夹角越大,承载力越高。

## 4 结论

本文利用ANSYS有限元软件,建立考虑立杆初始弯曲随机几何缺陷的带剪刀撑脚手架数值模型,系统研究剪刀撑类型、布设跨数、平面形式及连接节点密度等参数,对重型承插型盘扣式脚手架承载力与稳定性的影响,主要结论如下:

(1) 脚手架荷载因子由屈曲模态决定,荷载因子区间数量与屈曲模态数量一一对应,不同区间对应的屈曲模态形态存在差异;增设顶部横向约束,可减少脚手架屈曲模态的数量。

(2) 横向约束对存在立杆弯曲随机缺陷脚手架承载力的提升幅度,随架体横、纵向跨数增大而提高。8×8×12规格的脚手架增设横向约束后,承载力提升了26.1%;9×9×12规格的脚手架增设横向约束后,承载力提升了39.1%。

(3) 脚手架承载力随垂直剪刀撑布设跨数增加而提升。顶部设横向约束时,垂直剪刀撑可使脚手架承载力提升20.3%~146.9%;顶部无横向约束时,提升幅度为34.8%~165.2%。

(4) 节点密度对脚手架承载力的提升效果,取决于剪刀撑与水平杆的夹角。当夹角为56°时,节点密度的提升效果最佳;节点密度相同时,对于顶部带横向约束的脚手架,剪刀撑夹角越大,其整体承载力越高。

## 参考文献:

[1] 刘浩研.高支模坍塌事故致因分析与对策研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
LIU Haoyan. Study on collapse accident of high supporting formwork and countermeasure[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese)

[2] 刘辉,郑向莞,张智超,等.定量改进JHA法的建筑施工高危作业风险分析[J].中国安全科学学报,2019,29(4):146-151. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2019.04.023.
LIU Hui, ZHENG Xiangwan, ZHANG Zhichao, et al. Risk analysis of high-risk operations in construction by a quantitatively improved JHA method[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(4): 146-151. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2019.04.023. (in Chinese)

[3] ZHAO Z W, CHEN Z H, YAN X Y, et al. Simplified numerical method for latticed shells that considers member geometric imperfection and semi-rigid joints[J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(4): 689-702. DOI: 10.1177/1369433216630123.

[4] ZHAO Z W, CHEN Z H. Analysis of door-type modular steel scaffolds based on a novel numerical method. Advanced Steel Construction, 2016, 12(3): 316-327. DOI: 10.18057/IJASC.2016.12.3.6.

[5] ZHAO Z W, LIU H Q, LIANG B. Novel numerical method for the analysis of semi-rigid jointed lattice shell structures considering plasticity[J]. Advances in Engineering Software, 2017, 114: 208-214. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2017.07.005.

[6] 陈桂香,郭泽群,胡德平,等.承插型盘扣式钢管支架盘扣节点扭矩-转角模型适用性研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(2):192-199,232. DOI:10.15986/j.1006-7930.2020.02.006.
CHEN Guixiang, GUO Zequn, HU Deping, et al. Study on applicability of torque-rotation model of disk-pin joint node of disk lock steel tubular scaffold[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2020,

52(2):192-199,232.DOI:10.15986/j.1006-7930.2020.02.006.(in Chinese)

[7] ZHAO Z W,LIU H Q,DONG J F,et al.Buckling capacity of socket-template scaffold system without X-bracing[J].Journal of Performance of Constructed Facilities,2020,34:04019089.DOI:10.1061/(ASCE)cf.1943-5509.0001373.

[8] ZHENG Y F,GUO Z X.Investigation of joint behavior of disk-lock and cuplok steel tubular scaffold[J].Journal of Constructional Steel Research,2021,177:106415.DOI:10.1016/j.jcsr.2020.106415.

[9] 王凝,曾凡奎,曲丹丹,等.不同楔紧度下的盘扣式钢管脚手架的节点受力性能试验分析[J].工业建筑,2025,55(5):104-112.DOI:10.3724/j.gyjzG22101811.
WANG Ning,ZENG Fankui,QU Dandan,et al.Experimental analysis on the mechanical properties of joints in disc-button steel tubular scaffolding under different wedge tightness conditions[J].Industrial Construction,2025,55(5):104-112.DOI:10.3724/j.gyjzG22101811.(in Chinese)

[10] 许强,叶继红.基于杆系离散元的半刚性连接数值计算方法研究[J].建筑结构学报,2022,43(12):311-321.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0326.
XU Qiang,YE Jihong.Study on numerical calculation method of semi-rigid connections based on member discrete element theory[J].Journal of Building Structures,2022,43(12):311-321.DOI:10.14006/j.jzjgxb.2021.0326.(in Chinese)

[11] 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.DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2022.133.
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.DOI:10.15918/j.tbit1001-0645.2022.133.(in Chinese)

[12] 董金凤.考虑节点半刚性盘扣式支模架稳定承载力理论与试验研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2022.
DONG Jinfeng.Theoretical and experimental study on stability bearing capacity of disc-buckle type formwork support considering semi-rigid joints[D].Fuxin:Liaoning Technical University,2022.(in Chinese)

[13] PENG J L,WANG C S,LIN C C,et al.Stability of independent heavy-duty scaffolds:An experimental study.Advanced Steel Construction,2017,13(4):318-342.DOI:10.18057/IJASC.2017.13.4.1.

[14] LU Z R,GUO C.Probabilistic analysis of derrick frame in a formwork support system[J].Ain Shams Engineering Journal,2023,14(5):101977.DOI:10.1016/j.asej.2022.101977.

[15] 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,2012,45(1):49-60.DOI:10.15951/j.tmgcxb.2012.01.018.
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,2012,45(1):49-60.DOI:10.15951/j.tmgcxb.2012.01.018.(in Chinese)

[16] ZHAO Z W,WANG W Y,YAN R Z,et al.Tensile capacity degradation of randomly corroded strands based on a refined numerical model[J].Reliability Engineering & System Safety,2025,253:110512.DOI:10.1016/j.ress.2024.110512.

[17] ZHANG N,QIU R,ZHAO Z W,et al.Influence of random geometrical imperfection on loading capacity of scaffold based on stochastic numerical model[J].Advances in Engineering Software,2024,197:103737.DOI:10.1016/j.advengsoft.2024.103737.

[18] ZHANG H,CHANDRANGSU T,RASMUSSEN K J R.Probabilistic study of the strength of steel scaffold systems[J].Structural Safety,2010,32(6):393-401.DOI:10.1016/j.strusafe.2010.02.005.

[19] ZHANG H,RASMUSSEN K J R,ELLINGWOOD B R.Reliability assessment of steel scaffold shoring structures for concrete formwork[J].Engineering Structures,2012,36:81-89.DOI:10.1016/j.engstruct.2011.11.027.

[20] 刘哲,刘战伟,张兆龙,等.重型承插型盘扣式钢管脚手架连接节点抗弯性能研究[J].工业建筑,2025,55(6):235-242.DOI:10.3724/j.gyjzG23080301.
LIU Zhe,LIU Zhanwei,ZHANG Zhaolong,et al.Experimental study on the bending resistance of the connection nodes of heavy duty socket and plate buckle steel pipe scaffolding[J].Industrial Construction,2025,55(6):235-242.DOI:10.3724/j.gyjzG23080301.(in Chinese)

[21] ZHAO Z W,LIU H Q,LIANG B,et al.Semi-rigid beam element model for progressive collapse analysis of steel frame structures[J].Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings,2018,172(2):113-126.DOI:10.1680/jstbu.17.00132.

[22] 董金凤.半刚性节点轮扣式高大支模体系屈曲性能研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2019.
DONG Jinfeng.Research on buckling behavior analysis of wheel-coupler high formwork support system based on semi-rigid joints[D].Fuxin:Liaoning Technical University,2019.(in Chinese)