

基于拉丁超立方抽样的高大模板支撑体系承载力有限元分析

陆征然¹, 于珈邴¹, 路林翰², 林志浩¹, 孙 杨³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学管理学院, 辽宁 沈阳 110168;

3. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究不同缺陷构配件下高大模板支撑体系承载性能的变化, 为高大模板支撑体系的布置、构配件的搭配及使用提供指导, 以预防和减少其在实际工程中的坍塌事故。方法 基于拉丁超立方抽样, 考虑构配件缺陷对三种搭设参数模板支撑体系承载性能的影响, 随机取线性屈曲分析中一阶屈曲承载力的0.1%~0.2%作为假想水平力, 对构配件性能缺陷进行有限元分析, 探究不同搭设参数下支撑体系承载力及失稳模式。结果 *SPR* 对承载力的影响大于 *D* 和 *t*, 并且双因素耦合对承载力的影响大于单因素。立杆步距的变化对支撑体系承载力的影响大于立杆间距。随着影响因素耦合数量的增加, 步距对支撑体系承载性能的影响也会随之增大。结论 支撑体系搭设过程中将存在缺陷的构配件使用时分散排布, 可以防止高大模板支撑体系整体失稳倒塌。

关键词 高大模板支架; 初始缺陷; 因素耦合; 随机有限元; 承载力

中图分类号 TU755.2

文献标志码 A

引用格式: 陆征然, 于珈邴, 路林翰, 等. 基于拉丁超立方抽样的高大模板支撑体系承载力有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(3): 461-469. (LU Zhengran, YU Jiali, LU Linhan, et al. Finite element analysis on bearing capacities of high-formwork support system on latin hypercube sampling[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(3): 461-469.)

Finite Element Analysis on Bearing Capacities of High-formwork Support System on Latin Hypercube Sampling

LU Zhengran¹, YU Jiali¹, LU Linhan², LIN Zhihao¹, SUN Yang³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

收稿日期: 2023-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008269)

作者简介: 陆征然(1982—), 女, 教授, 博士, 主要从事组合结构及工程结构可靠度等方面研究。

Abstract: Study the changes in the load-bearing performance of high-formwork support systems under different defective components, provide guidance for the layout of high-formwork support systems, the combination and use of components, and prevent and reduce collapse accidents in practical engineering. Based on Latin hypercube sampling, considering the influence of component defects on the bearing performance of three template support systems with different installation parameters, 0.1% ~ 0.2% of the first-order buckling bearing capacity in linear buckling analysis is randomly selected as the hypothetical horizontal force. Finite element analysis is conducted on the performance defects of components to explore the bearing capacity and instability mode of the support system under different installation parameters. The influence of *SPR* on bearing capacity is greater than that of *D* and *t*, and the influence of dual factor coupling on bearing capacity is greater than that of single factor. The influence of the change in the distance between upright poles on the bearing capacity of the support system is greater than that of the distance between upright poles. As the number of coupling factors increases, the influence of step distance on the bearing performance of the support system will also increase. During the construction of the support system, the defective components will be dispersed and arranged to prevent the overall instability and collapse of the high-formwork support system.

Key words: high-formwork support; initial defects; factor coupling; stochastic finite element; bearing capacity

随着我国经济的发展和建筑行业的进步,高层建筑和大跨度结构等建筑结构形式占比越来越大,这就要求混凝土模板支撑系统在施工过程中作为临时承重构件必须具有很高的安全性。扣件式模板支撑体系由于搭设方便、拆卸快捷、适应大部分环境,在实际工程中成为最常见的模板支撑体系之一^[1-2]。但作为一种临时性结构,其安全性没有得到足够的重视,导致坍塌事故时有发生。

近些年来,国内外学者对模板支撑体系承载性能展开了众多研究。C. Wang^[3]等通过蒙特卡洛模拟,采用随机有限元法,计算典型脚手架框架极限承载能力的概率特征,提出了一种更可靠的极限状态设计方法。S. G. Buonopane^[4]等通过蒙特卡罗采样计算,将屈服强度和重力载荷作为随机变量,计算了塑性破坏和一阶塑性铰两种破坏准则的强度分布和破坏概率。陆征然等^[5-6]利用 Matlab 软件,基于三点转动约束单杆模型,研究了在不同搭设参数条件下,构造因素对模板支撑体系承载力的影响。张卫红等^[7]通过研究支撑体系有限元模型的建模过程和

计算公式的简化方法,结合试验结果的逆向分析,得出了节点扭转刚度系数 $K = 25 \text{ (kN} \cdot \text{m) / rad}$,用其节点扭转刚度系数值来计算稳定承载力均小于实测承载力,这样选取的节点旋转刚度系数是偏于安全的。贾莉等^[8]对3个扣件式钢管满堂脚手架进行足尺破坏试验,提出了扣件式满堂脚手架的简化计算模型和极限失稳承载力简化计算公式,该公式比《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ130—2011)^[9]中的公式更加完善可靠。

扣件式钢管模板支撑体系作为临时支撑结构,由于周转使用率较高,在实际使用中,钢管会出现不同程度的初始弯曲、材料锈蚀,扣件也存在约束功能退化等现象^[10]。因此,在进行模板支撑体系承载性能的计算时,不仅要考虑支撑体系的初始缺陷,还要考虑各构配件的性能缺陷,分析不同因素对体系承载力的影响,才能获得接近实际使用状态下的支撑体系承载性能^[11]。基于此,笔者基于拉丁超立方抽样,对构配件性能缺陷进行随机有限元分析,探究不同搭设参数、不同缺陷条件下支撑体系承载力及失稳模式,研究管

径、壁厚、扣件转动刚度等构配件性能因素对其承载性能的影响,以期减少高大模板支撑体系失稳倒塌事故。

1 抽样方式的选择

蒙特卡洛法抽样得到的随机数 x_i 绝大部分是集中在联合概率密度函数的最大值点附近,实现 $Z(X) < 0$ 的概率很小^[12],选择使用蒙特卡洛抽样则必须进行大规模抽样,模拟效率低。重要性采样是通过改变随机抽样的中心,使样本点有较多机会落入失效域,增加了 $Z(X) < 0$ 概率。拉丁超立方体采样(简称 LHS),在抽样过程中,将每个随机变量的取值范围划分为几个区间,在每一个分开的区间内随机选取一个值,由这些值组成了随机变量的样本,抽样过程中可以抽取所有可能的值。

相比之下,LHS 避免了在样本空间的重复抽样,节省了抽样次数和时间,并且还能够最大限度地提升计算效率和结果精度。考虑到后续的随机有限元分析需要进行大量的循环抽样—赋值模拟,在保证试验结果精度的基础上减少抽样时间尤为重要,因此,笔者选择 LHS 作为后续的抽样方法。

2 构配件性能影响因素的选取及支撑体系搭设参数的设定

2.1 构配件性能影响因素选取

工人安装扣件式钢管模板技术水平相差较大,会产生安装误差。此外,支撑体系中的各种构配件反复周转使用,也存在性能缺陷,如钢管初始弯曲、钢管壁厚及材料性能、扣件抗滑、抗扭转性能不满足要求等。在综合考

虑初始缺陷的基础上,笔者选取钢管管径 D 、壁厚 t 、扣件转动刚度 SPR 作为构配件在材料性能、几何属性以及扣件约束功能方面的代表性因素,考察其对模板支撑体系承载力的影响。 D 和 t 的上限值根据《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ130—2011)^[9]中对于钢管截面尺寸(管径×壁厚)的规定值选取(48.3 mm×3.6 mm),参照文献[13]中对现场实测数据的统计和分析,按构配件影响因素概率分布的 90% 置信区间来确定 D 和 t 参数的下限值。

同时,参考文献[14]中对施工现场实际测量获取的数据计算扣件的转动刚度值,发现其服从均值为 27.16 (kN·m)/rad,变异系数为 0.333 的截尾正态分布,其截尾下限值为 8.94 (kN·m)/rad。考虑支撑体系设计的安全性,应选取一个较小的刚度数值,上限值取 25 (kN·m)/rad,下限值则取截尾下限值。

在以上不同因素单一及耦合作用下,笔者对模板支撑体系承载力进行随机有限元分析。双因素的耦合作用方式为 $D + SPR$ 、 $t + SPR$ 。考虑到钢管管径、壁厚之间的关联性较强,所以在影响因素耦合的过程中未将二者进行耦合。

2.2 模板支撑体系搭设参数的设定

为了获得各单因素及双因素耦合对不同搭设参数支撑体系承载性能及失稳模式的影响规律,并与已有试验结果进行对比,笔者选取了 3 种搭设参数的支撑体系(均为纵向 11 排立杆,横向 7 排立杆)进行分析,搭设参数见表 1。有限元计算中,钢材的弹性模量取 2.06×10^5 MPa,泊松比取 0.3,采用弹簧单元 COMBIN14 模拟直角扣件的半刚性。

表 1 支撑体系搭设参数

Table 1 Erection parameters of support system

编号	步距/m	纵向立杆间距×横向立杆间距/m	扫地杆高/m	立杆顶部伸出长度/m	架高/m	剪刀撑
1	1.5	0.9×0.9	0.2	0.5	8.2	无
2	0.9	0.9×0.9	0.2	0.5	8.8	无
3	0.9	0.6×0.9	0.2	0.5	8.8	无

3 模板支撑体系静力试验

本课题组前期曾进行过一系列的模板支撑体系原型试验,选取表1中编号1搭设参数下的原型试验结果,与随机有限元计算结果进行对比。原型试验中所使用的构配件均取自施工现场,并对部分构配件进行相关参数实际测量。试验中采用两对反力架、8个液压千斤顶,通过两道分配梁对支撑体系施加均匀荷载。试验加载装置见图1。



图1 试验加载装置

Fig. 1 Test loading device

经逐级加载,最终试验得到的支撑体系承载力为23.57 kN。达到临界荷载时,加载区立杆向刚度小的方向弯曲,中部变形最大,弯曲弧度均匀。

4 基于拉丁抽样理论的模板支撑体系有限元分析

4.1 有限元模型的初始缺陷考虑方式

实际工程中,很多结构并不会在其理论弹性屈曲强度处发生屈曲,线性屈曲分析得出的结果通常不能用于实际工程。非线性屈曲分析则是采用逐渐增加载荷的非线性静力分析技术来求解结构开始变得不稳定时的临界载荷,在实际中得到了广泛应用^[15-17]。

胡长明等^[18]在沿支撑体系刚度较弱方向的各节点施加等效假想水平力,其大小分别取不考虑体系初始缺陷所得的稳定承载力 P_0 的0.5%、0.25%、0.1%,通过有限元计算得出考虑不同初始缺陷的单杆稳定承载力。

结果表明,当假想水平力取一阶屈曲承载力的0.1%时,有限元计算结果与试验值最为接近;而当取0.25%~0.5%极限承载力作为假想水平力时,支撑体系的失效概率大幅度下降。

在参考上述研究成果的基础上,笔者进一步考虑初始缺陷的随机性,采用以下方式在有限元计算中施加初始缺陷:在进行非线性随机有限元计算前,每次随机地取线性屈曲分析中一阶屈曲承载力的0.1%~0.2%作为假想水平力取值,并沿线性屈曲分析中支撑体系发生失稳的方向施加于节点处。这样,不仅考虑了初始缺陷的随机性,同时也避免了初始缺陷取值范围过大对结果产生较大干扰。

4.2 构配件性能单因素与双因素作用对体系承载力的影响

针对 D 、 t 、 SPR 三种构配件影响因素以及 $D+SPR$ 、 $t+SPR$ 两种双因素耦合,按照拉丁抽样—赋值—支撑体系承载力计算的流程,循环进行500次随机有限元计算。将结果进行统计、分析,可以发现其均服从正态分布,统计结果见表2,各工况下对应的承载力分布直方图如图2所示。

表2 单因素与双因素耦合作用下体系承载力分布
Table 2 Distribution of bearing capacity of a system under the coupling effect of single and double factors

影响因素	编号	承载力	标准差	承载力试
		均值 μ /kN	σ	验值/kN
D	1	24.29	0.55	23.57
	2	34.85	0.79	—
	3	35.53	0.82	—
t	1	23.58	0.70	23.57
	2	33.12	0.91	—
	3	33.95	0.96	—
SPR	1	22.05	1.09	23.57
	2	30.27	1.27	—
	3	31.06	1.33	—
$D+SPR$	1	20.39	1.37	23.57
	2	27.96	1.69	—
	3	28.01	1.72	—
$t+SPR$	1	19.34	1.83	23.57
	2	26.16	2.01	—
	3	26.83	2.06	—

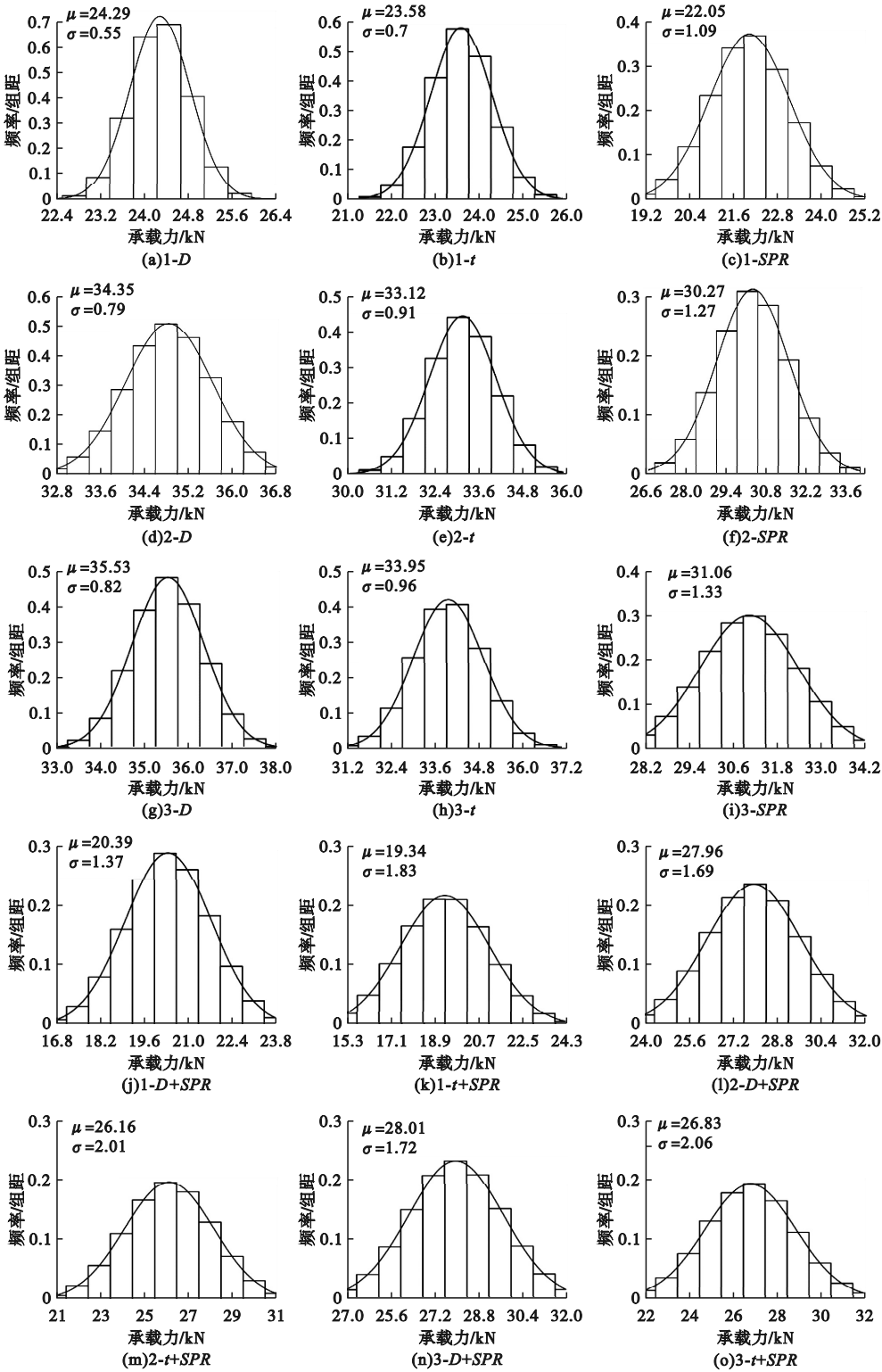


图2 单因素与双因素耦合作用下的体系承载力的频率直方图

Fig. 2 Frequency histogram of system bearing capacity under the coupling effect of single and double factors

对比表2中模型1体系承载力均值和试验值,可以发现二者较为接近。第一组模型原型试验值均在承载力分布范围内,证实了随机有限元模拟计算结果的正确性。

从表2与图2中可以看出,单一因素耦合时, SPR 影响下的体系承载力均值均小于 D 、 t 影响下的体系承载力均值,其标准差均大于 D 、 t 影响下的体系承载力标准差,由此说明 SPR 对体系承载力的影响更大。双因素耦合时,相比单因素耦合,其对体系承载力影响更大,更容易造成结构失稳。 $t+SPR$ 耦合作用下体系承载力的标准差均大于 $D+SPR$ 耦合作用下体系承载力的标准差,可以说明体系承载力对 $t+SPR$ 耦合作用更为敏感。此外,对比表2中模型1、模型2和模型

2、模型3在双因素耦合情况下承载力分布的均值差,发现前者远大于后者,表明搭设参数影响比不同立杆间距下的配件性能参数对支撑体系影响更大。

由于单因素中 SPR 对于体系承载力的影响最大,双因素耦合时, $t+SPR$ 耦合对体系承载力的影响更大,因此有必要研究每组模型在 SPR 与 $t+SPR$ 耦合情况下影响下承载力最低时对应的失稳模式,结果如图3所示。

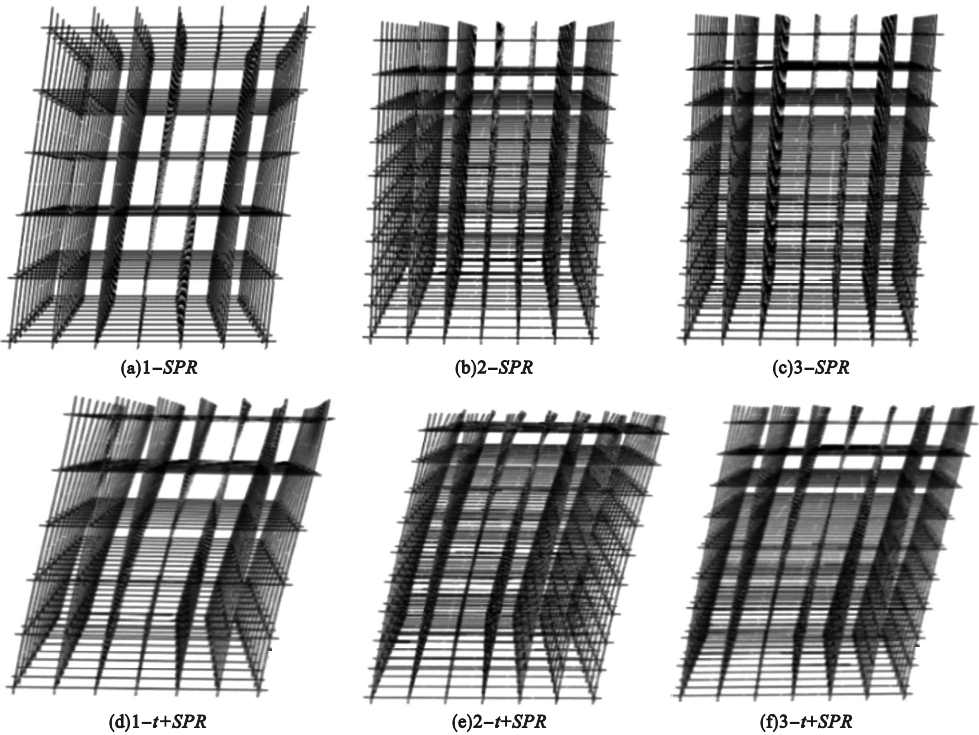


图3 SPR影响下与 $t+SPR$ 耦合作用下体系最低承载力对应的失稳模式

Fig. 3 The instability mode corresponding to the minimum bearing capacity of the system under the coupling effect of SPR and $t+SPR$

从图3中可以看出,三组模型均发生整体失稳破坏,在 SPR 单一因素耦合时,体系整体仅发生倾斜变形,相当于整根立杆发生失稳破坏,加载区立杆并未出现图3(b)的弯曲变形(原试验模型的破坏模式为大波鼓曲破坏且波长为2~3个步距),说明通过拉丁超立方抽样抽取到的构配件性能参数,并将

构配件按照最不利空间分布搭设模板支撑体系(随机有限元计算中承载力最低的一组即为构配件的最不利空间分布),其稳定承载力比原型试验模型更低。但加入 t 进行双因素耦合后,立杆扭曲变形,并且,模型立杆顶部外伸部分发生弯曲变形。将双因素进行耦合后,会改变支撑体系的变形模式。

4.3 SPR 与 $t + SPR$ 作用区域变化对体系承载力的影响

由于单因素耦合时 SPR 对体系承载力的影响最大,双因素耦合作用时 $t + SPR$ 二者耦合对体系承载力的影响大于 $D + SPR$,将转动刚度数值较小的构配件与 $t + SPR$ 耦合作用下取值较低的构配件分别布置于加载区和非加载区,考虑作用区域变化对体系承载力的影响。编制 Python 脚本驱动 ABAQUS,通过循环进行 500 次随机有限元计算,发现其均服从正态分布,统计结果见表 3,其最低承载力对应的体系失稳模式如图 4、图 5 所示。

表 3 SPR 与 $t + SPR$ 不同作用区域下体系承载力分布
Table 3 Distribution of system bearing capacity under different action regions of SPR and $t + SPR$

作用区域	影响因素	编号	承载力均值/kN	标准差
加载区	SPR	1	18.23	0.25
		2	26.37	0.38
		3	26.85	0.40
	$t + SPR$	1	15.17	0.85
		2	21.35	1.06
		3	22.04	1.12
非加载区	SPR	1	21.75	0.21
		2	29.87	0.30
		3	30.72	0.31
	$t + SPR$	1	18.31	1.67
		2	25.23	0.92
		3	26.02	0.95

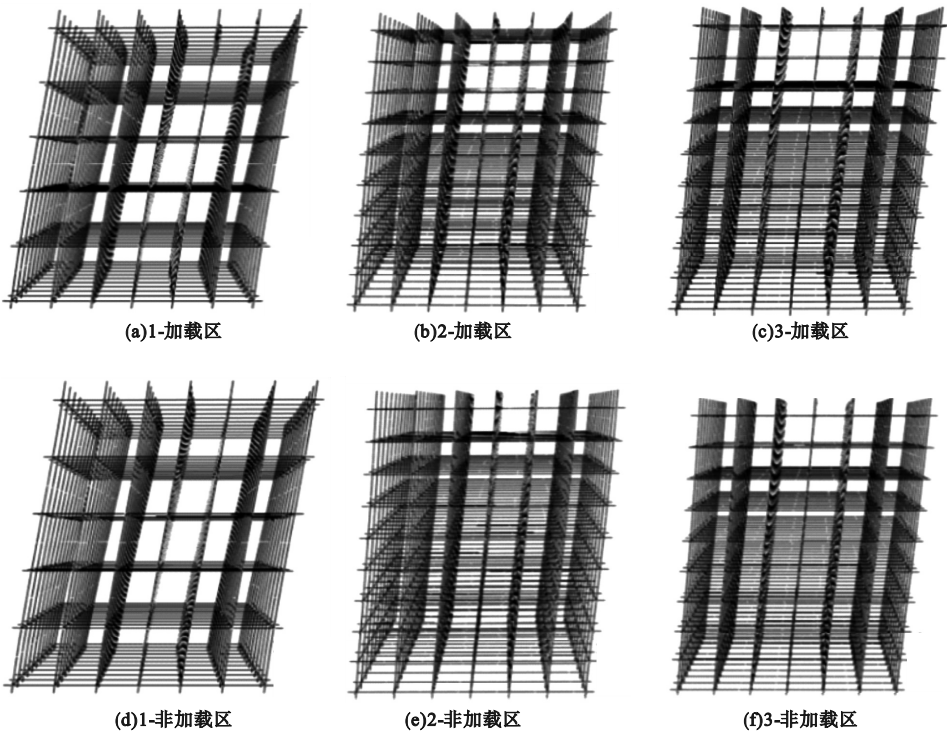


图 4 SPR 作用于不同区域下体系的失稳模式

Fig. 4 Instability modes of systems under SPR action in different regions

从表 3 可以看出,相比于单因素与双因素耦合时的支撑体系承载力分布的均值,当 SPR 与 $t + SPR$ 数值较低扣件较密集地出现于加载区时,三组不同分布位置下体系承载力均值下降幅度较大;当数值较低扣件较密集地出现于非加载区时,三组不同分布位置下体系承载力均值变化幅度较小。

此外,将 SPR 与 $t + SPR$ 数值较低的配件比较集中分布在加载区,其承载力均值小于其出现在非加载区,并且前者承载力分布标准差均大于后者。可以看出,对于局部承受荷载的支撑体系,其承载力对加载区内的构配件性能变化敏感度较高。

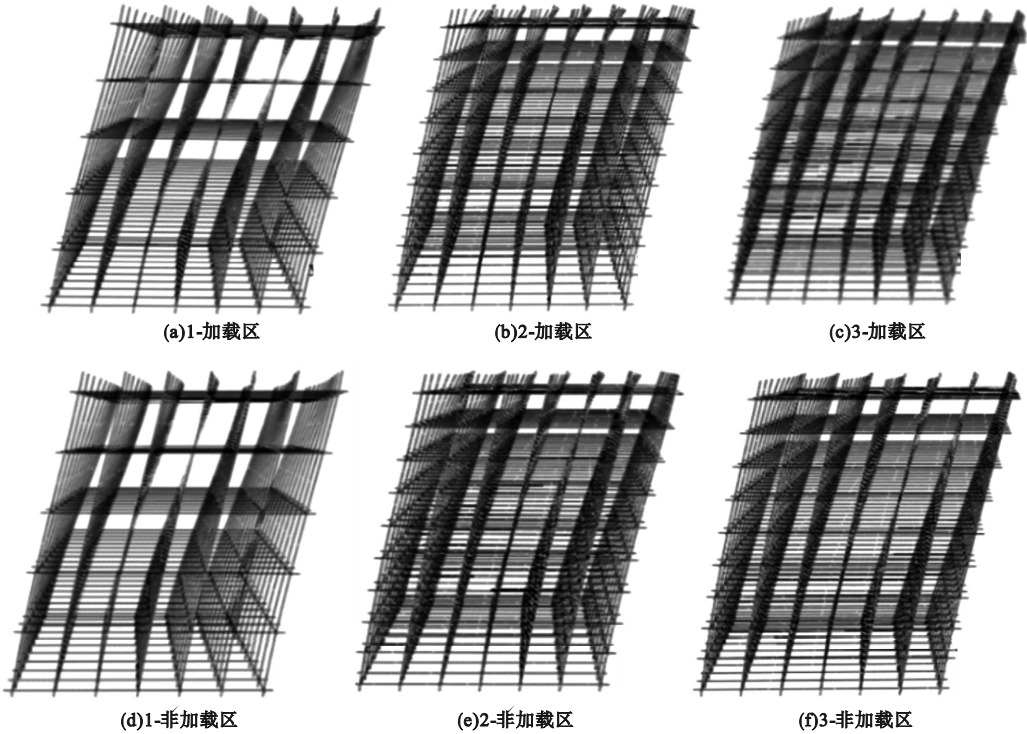


图5 $t + SPR$ 不同作用区域下体系的失稳模式

Fig. 5 Instability modes of systems under different action regions of $t + SPR$

5 结 论

(1)单一影响因素中, SPR 对体系承载力的影响最大;双因素耦合对于体系承载力的影响大于单因素,并且 $t + SPR$ 耦合对体系承载力的影响大于 $D + SPR$ 耦合。

(2)双因素耦合情况下,支撑体系的承载力和失稳模式与原型试验的结果相近。因此,考虑双因素耦合对支撑体系进行有限元计算和设计更加符合实际。

(3)在考虑性能不同构配件随机分布的基础上,将性能较低构配件分别设置于加载区和非加载区内,体系承载力下降幅度分别达到 16.45% 和 3.02% 以上。说明体系承载力对分布于加载区内的构配件性能更为敏感。

(4)对于仅局部承受荷载的支撑体系,在实际搭设过程中若构配件性能参差不齐且变化范围较大时,要尽量降低立杆步距,对于

t 值较低的杆件不宜将其满布于加载区内。

参考文献

[1] 张宏宇,马建云,周俊良,等. 脚手架坍塌事故应急救援对策研究[J]. 中国安全生产科学技术,2012,8(2):134-139.
(ZHANG Hongyu, MA Jianyun, ZHOU Junliang, et al. Study on emergency rescue countermeasures of the scaffold collapse accidents [J]. Journal of safety science and technology, 2012, 8 (2): 134-139.)
[2] 何芳东,张潇,张伟,等. 模板支撑体系坍塌事故规律[J]. 土木工程与管理学报,2018,35(4):137-145.
(HE Fangdong, ZHANG Xiao, ZHANG Wei, et al. Regularities for collapse accidents of formwork support system [J]. Journal of civil engineering and management, 2018, 35 (4): 137-145.)
[3] WANG Cao, ZHANG Hao, RASMUSSEN K, et al. System reliability-based limit state design of support scaffolding systems [J]. Engineering structures, 2020, 216:110677.
[4] BUONOPANE S G, SCHAFER B W. Reliability of steel frames designed with advanced analysis

- [J]. Journal of structural engineering, 2006, 132(2):267-276.
- [5] 陆征然,张茂胜,赵明歌,等.扣件式钢管模板支撑体系承载力可靠度研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(2):246-254.
(LU Zhengran, ZHANG Maosheng, ZHAO Mingge, et al. Research on the reliability of the bearing capacity of the fastener type steel pipe formwork support system [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(2):246-254.)
- [6] 陆征然,陈志华,王小盾,等.基于三点转动约束单杆稳定理论的扣件式钢管满堂支撑架承载力研究[J].土木工程学报,2012,45(5):104-113.
(LU Zhengran, CHEN Zhihua, WANG Xiaodun, et al. Research on the bearing capacity of coupler type steel pipe full hall support frame based on the single rod stability theory with three point rotation constraints [J]. Journal of civil engineering, 2012, 45(5):104-113.)
- [7] 张卫红,刘建民,朱国卫.基于整架试验的扣件式钢管脚手架半刚性节点计算方法[J].山东建筑大学学报,2009,24(1):38-42.
(ZHANG Weihong, LIU Jianmin, ZHU Guowei. Calculation method for semirigid nodes of coupler type steel pipe scaffolding based on whole frame test [J]. Journal of Shandong jianzhu university, 2009, 24(1):38-42)
- [8] 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. Method for checking the bearing capacity of coupler type steel pipe full hall scaffolding [J]. Building structure, 2016, 46(6):71-76.)
- [9] 中国建筑科学研究院.建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范:JGJ130—2011[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
(China Academy of Building Researching. Technical code for safety of steel tubular scaffold with couplers in construction: JGJ130—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [10] 胡晓鹏,仲帅,彭刚,等.锈蚀脚手架钢管轴压稳定性试验研究[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(6):136-143.
(HU Xiaopeng, ZHONG Shuai, PENG Gang, et al. Experimental study on the axial compressive stability of corroded scaffolding steel pipes [J]. Journal of civil and environmental engineering (Chinese and English), 2022, 44(6):136-143.)
- [11] 赵元一,徐佳,赵成成.考虑初始变形的钢管脚手架稳定性分析[J].施工技术,2021,50(23):132-135.
(ZHAO Yuanyi, XU Jia, ZHAO Chengcheng. Stability analysis of steel tube scaffold considering initial deformation [J]. Construction technology, 2021, 50(23):132-135.)
- [12] ZHANG Hao, RASMUSSEN K. Probabilistic study of the strength of steel scaffold systems [J]. Structural safety, 2010, 32(6):393-401.
- [13] 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. Reliability analysis and research on high formwork support system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012.)
- [14] 梁仁钟.高大模板支架的可靠性分析及安全性评价[D].北京:北京交通大学,2010.
(LIANG Renzhong. Reliability analysis and safety evaluation of tall formwork supports [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.)
- [15] 张君策.扣件式钢管支撑架直接分析法设计与工程应用[D].西安:西安工业大学,2022.
(ZHANG Junce. Design and engineering application of direct analysis method for coupler type steel pipe support frame [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.)
- [16] CHEN Zhihua, ZHAO Zhongwei. Analysis of door-type modular steel scaffolds based on a novel numerical method [J]. Advanced steel construction, 2016, 12(3):316-327.
- [17] ZHANG Hao, RASMUSSEN K. System-based design for steel scaffold structures using advanced analysis [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 89(10):1-8.
- [18] 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. Analysis of the influence of node semi rigidity on the stable bearing capacity of fastener type steel pipe formwork support [J]. Industrial building, 2010, 40(2):20-23.)
- (责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)