

多规范视阈下扣件式钢管支撑体系稳定承载力数值模拟分析

贾世龙¹, 谢建坤^{1,2}, 姚明乐¹, 陈忠良³, 孙磊⁴

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 中建三局集团(深圳)有限公司, 广东 深圳 518129;
3. 沈阳万科企业有限公司, 辽宁 沈阳 110062; 4. 中国建筑第八工程局有限公司东北分公司, 辽宁 大连 116000)

摘要 目的 研究多个相关规范关于模架支撑体系的构造差异, 分析不同构造形式对扣件式钢管支撑体系的力学性能影响, 为架体优化设计和工程应用提供借鉴。方法 基于 ANSYS 有限元分析软件, 建立有限元模型进行数值模拟, 通过改变支撑体系扫地杆的位置、横杆步距、立杆纵横向间距、自由端长度、架体高宽比及剪刀撑布设等构造参数, 对比不同构造形式的支撑体系稳定承载力数值和杆件内力分布, 研究相关构造因素对架体安全性的影响。结果 构造形式对扣件式钢管支撑体系的稳定承载力及位移变形的影响显著; 依照不同规范的设计方法, 相同的支撑体系力学计算结果差异明显。结论 扫地杆高度在 0.4 m 以下、步距 1.8 m 以内、纵横向立杆间距 1.5 m 以下、自由端高度 0.8 m 以下、高宽比不超过 2 或者增强剪刀撑布设能有效提高支撑体系的稳定承载力和安全性; 在支撑体系荷载标准值确定、荷载组合方式选取及立杆稳定性验算方面宜优先选用《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ162—2008) 和《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ130—2011) 执行; 扫地杆、横杆步距、立杆自由端长度和剪刀撑布设以《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ130—2011) 为宜; 对于超过 8m 的高支模, 《建筑施工脚手架安全技术统一标准》(GB51210—2016) 的安全储备更高。

关键词 支撑体系; 构造因素; 安全性; 承载力

中图分类号 TU312⁺.1

文献标志码 A

引用格式: 贾世龙, 谢建坤, 姚明乐, 等. 多规范视阈下扣件式钢管支撑体系稳定承载力数值模拟分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(2): 302-312. (JIA Shilong, XIE Jiankun, YAO Mingle, et al. Numerical simulation analysis of bearing capacity of fastener-type steel pipe support system under multi-specification [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(2): 302-312.)

Numerical Simulation Analysis of Bearing Capacity of Fastener-type Steel Pipe Support System under Multi-specification

JIA Shilong¹, XIE Jiankun^{1,2}, YAO Mingle¹, CHEN Zhongliang³, SUN Lei⁴

收稿日期: 2022-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978422); 辽宁省重大科技专项基金项目(2019JH2/10300054); 辽宁省自然科学基金项目(201602617); 辽宁省教育厅科研项目(LNJC201905)

作者简介: 贾世龙(1976—), 男, 副教授, 主要从事结构安全和施工管理等方面研究。

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Construction Third Engineering Bureau Group (Shenzhen) Co. Ltd., Shenzhen, China, 518129; 3. Shenyang Vanke Enterprise Co. Ltd., Shenyang, China, 110062; 4. China Construction Eighth Engineering Division Corp. Ltd., Northeast Branch, Dalian, China, 116000)

Abstract: The paper is proposed to study the differences of multiple relevant codes for comparative analysis of safety, the influence of different structural factors on the mechanical properties of the fastener-type steel pipe support system under multiple codes, and to draw some conclusions and suggestions that are beneficial to engineering practice. By changing the height of the sweeping pole, the step distance, the vertical and horizontal pole spacing, the height of the free end, the aspect ratio and the related structural factors of the scissor support layout of the support system, a number of different finite element models for numerical simulation were established based on ANSYS by comparing the differences of several relevant specifications and the calculation indicators and studied the influence of the relevant structural factors of the support system on the safety. The result showed that different structural factors have obvious effects on the stable bearing capacity and displacement of the fastener-type steel pipe support system, and the calculation results of the same support system under different specifications are significantly different. It can be concluded that in engineering practice, the height of the sweeping pole is less than 0.4 m, the step distance is less than 1.8 m, the vertical and horizontal pole spacing is less than 1.5 m, the height of the free end is less than 0.8 m, the aspect ratio is not more than 2, or the enhanced scissor bracing can effectively improve. Support system security. JGJ162 and JGJ130 should be preferred for the design of support system load, combination selection and stability check calculation of uprights. The sweeping rod, step distance, free end and scissor support are preferably set up with reference to the JGJ130. For high formwork over 8 meters, it tends to be safer and more reliable when in accordance with the requirements of the GB51210.

Key words: support system; structural factors; safety; bearing capacity

扣件式钢管脚手架由钢管和扣件组成,其特点是承载力高、安拆灵活、周转方便,自20世纪80年代起,逐渐成为我国使用量最大、应用最普遍的一种脚手架。相对于碗口式、盘扣式、轮扣式、承插槽式、榫卯式等类型的脚手架,在房屋建筑与市政工程的施工中,扣件式钢管脚手架不仅被用做作业脚手架,更因其杆件间距多样、剪刀撑(之字撑、斜抛撑)布置灵活、架体通用性强,被广泛地应用于承重架体支撑体系。

近年来,国内外专家学者关于扣件式钢管支撑体系承载力、稳定性的相关研究取得了众多研究成果:M. Homes等^[1]通过足尺试验的分析,对模板支撑架的稳定承载力进行了研究。M. H. Godley等^[2]对支撑架的刚度分别采用二维分析及三维分析的方法进行研

究,发现将架体的扣件节点作半刚性处理时,对其动力特性的影响程度较深。王绪旺等^[3]针对扣件式钢管高支模体系进行施工设计和验算,并运用脚手架半刚性节点计算方法分析其整体稳定性,提出了安全储备因数。贾莉等^[4]结合扣件式钢管支撑体系足尺破坏试验的试验现象和试验数据,基于部分侧移半刚性假定,提出了水平杆受力抗弯承载力、立杆受压稳定承载力以及极限承载力等关键受力构件和节点的计算方法。刘丽等^[5]利用ANSYS有限元分析软件建立了不同的模板支架连接模型,得出半刚性节点的连接方式最符合实际工况的结论,为扣件式钢管模板支架的理论研究提供了依据。庄金平等^[6]采用ABAQUS有限元分析软件对高大模板扣件式钢管支撑体系,对稳定承载力

进行参数分析,利用弹簧单元模拟扣件的半刚性连接,得到了各因素对其整体稳定承载力的影响规律。陈凡等^[7]以扣件式钢管架体为例,建立有限元模型,分析了支架的稳定性,计算了失稳破坏模式和极限承载力,并进行静力分析,研究施工过程中架体的位移和轴力响应,给出了加强架体稳定性和安全性的措施。徐琳等^[8]采用 ANSYS 有限元分析软件研究了扣件拧紧力矩、水平杆步高、水平杆搭设步数等对扣件式钢管支撑体系整体结构稳定性的影响。薛梓炎^[9]对比不同的施工安全计算软件依据不同的施工规范计算立杆稳定承载力,结果存在巨大差异,提出了应科学合理选用施工规范和安全计算软件的建议。薛炳泉等^[10]针对扣件式钢管支架现有规范在施工中的应用提出了建议,以供类似工程借鉴。李成禹^[11]对扣件式钢管支撑体系相关规范之间部分条款不一致的情况,对如何执行规范的问题加以分析并提出建议。综上所述,对支撑体系的稳定性研究主要集中在可靠度理论、设计方法、钢管扣件材质及初始缺陷等因素分析^[12],而关于构造因素对支撑体系力学性能及变形影响的研究相对较少。

目前,我国已颁布多部有关扣件式钢管脚手架的国家级规范和行业标准,为扣件式钢管脚手支撑架体的科学设计、安全使用提供了依据和指导。但部分规范、技术标准的设计理念、荷载组合方式不尽相同,架体构造要求存在差异,给工程技术人员带来一定困扰。基于此,笔者通过改变扣件式支撑体系的扫地杆布置位置、横杆步距、立杆纵横向间距、立杆自由端长度、架体高宽比及剪刀撑布置等构造参数,对比不同构造形式的支撑体系稳定承载力数值和杆件内力分布,探究相关构造因素对架体安全性的影响,进一步为扣件式钢管支撑体系的工程应用提供参考。

1 扣件钢管支撑体系相关规范差异性分析

1.1 各规范差异点对比分析

截至 2023 年,对于扣件式钢管模板支撑体系,现行可有效利用的国家标准、行业规范如下:《建筑施工模板安全技术规程》(JGJ162—2008)^[13]、《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ130—2011)^[14]、《混凝土结构工程施工规范》(GB50666—2011)^[15]、《建筑施工临时支撑结构技术规范》(JGJ300—2013)^[16]、《建筑施工脚手架安全技术统一标准》(GB51210—2016)^[17]、《施工脚手架通用规范》(GB 55023—2022)^[18]。

现行相关规范在荷载设计、荷载组合、立杆稳定性验算、自由端高度、剪刀撑布置、扫地杆高度等方面均存在较多的差异点。

1.2 依据不同规范相同支撑体系立杆稳定性分析

评价临时支撑体系的安全性时,支撑体系的稳定性是重要指标,研究支撑体系的整体稳定性分析通常简化为对单根立杆的稳定性分析。对于相同规模的扣件式钢管支撑体系,依据不同的规范进行验算时,得出的结果差异性比较明显。笔者选定一个常规支撑体系,相关参数如下:

支撑体系参数:钢管参数 $\varphi 48.3\text{ mm} \times 3.6\text{ mm}$, 截面积 $A = 506\text{ mm}^2$, 回转半径 $i = 15.9\text{ mm}$;扫地杆高度 200 mm ;立杆纵向间距 $l_a = 1\,200\text{ mm}$;立杆横向间距 $l_b = 1\,200\text{ mm}$;水平杆步距 $h = 1\,500\text{ mm}$;立杆伸出顶部水平杆高度 $a = 500\text{ mm}$;模板支撑体系高度 $H = 9\,700\text{ mm}$;剪刀撑布置方式为四周布设剪刀撑,底部、中部、顶部布设剪刀撑;楼板厚度 $h_1 = 250\text{ mm}$ 。

荷载设计参数:施工人员及设备荷载标准值 Q_{1k} ,当计算支撑体系立杆及其他支承结构构件时的均布活荷载取 1 kPa ;模板自重标准值 $G_{1k} = 0.50\text{ kPa}$;模板及其支架自重标

准值 $G_{1k}' = 0.75 \text{ kPa}$; 新浇混凝土自重标准值 $G_{2k} = 24 \text{ kN/m}^3$; 钢筋自重标准值 $G_{3k} = 1.10 \text{ kN/m}^3$; 模板支拆工况下不考虑风荷载。

表 1 不同规范下立杆稳定性验算

计算依据	强度计算值 σ , 设计值 $f=205 \text{ MPa}$	安全储备	备注
规范[13]	$N = 15.96 \text{ kN}, \sigma = 53.94 \text{ MPa}$	73.70%	不区分顶部和非顶部立杆段
规范[14]	顶部: $N = 9.53 \text{ kN}, \sigma = 150.67 \text{ MPa}$ 非顶部: $N = 9.83 \text{ kN}, \sigma = 155.42 \text{ MPa}$	24.40% ~ 26.81%	区分顶部和非顶部立杆段
规范[15]	$N = 17.33 \text{ kN}, \sigma = 68.91 \text{ MPa}$	66.41%	不区分顶部和非顶部立杆段
规范[16]	$N = 26.13 \text{ kN}, \sigma = 214.21 \text{ MPa}$	超过设计值	不区分顶部和非顶部立杆段
规范[17]	顶部: $N = 16.59 \text{ kN}, \sigma = 208.32 \text{ MPa}$ 非顶部: $N = 18.32 \text{ kN}, \sigma = 211.12 \text{ MPa}$	超过设计值	区分顶部和非顶部立杆段

(1)在上述计算结果中,按照规范[17]的计算结果最大,超过设计值,要求相对保守;按照规范[13]的计算结果最小,安全储备值达到 73.70%,要求相对宽松;两者结果相差近 4 倍。

(2)按照规范[17]和规范[16]计算结果超过设计允许值,其结果更加保守,为了验算结果符合要求,必须加强支撑体系杆件布设,来确保满足验算要求;按照规范[14]计算结果具有 26.81%的安全储备值,相对合理。

(3)按照规范[15]和规范[13]的计算结果安全储备分别为 66.41%、73.70%,相对充裕,规范要求比较宽泛,对于高大模板支撑体系的验算设计,不建议采用。

(4)按照规范[13]、规范[16]和规范[15]验算立杆时,不区分顶部立杆段和非顶部立杆段,导致结果偏大或偏小。

(5)在规范[13]和规范[14]中立杆稳定性验算要求中,区分顶部立杆段和非顶部立杆段,即稳定承载力考虑了立杆伸出顶层水平杆的高度。

2 构造因素对支撑体系稳定承载力影响分析

2.1 有限元模型选择

采用扣件式钢管支撑体系,钢管和扣件

基于上述支撑体系,分别按照不同规范的要求进行立杆稳定性验算,对比分析该支撑体系的强度计算值以及安全储备值(见表 1)。

钢材均为 Q235 级结构钢,钢管为 $\varphi 48.3 \times 3.6 \text{ mm}$,钢管间的扣件连接视为半刚性连接^[19],选用 Beam188 单元来模拟支撑体系中的纵横杆、立杆。选用 Link 8 单元能用来模拟支撑体系中的剪刀撑杆件。选用 Combin 14 线性弹簧单元模拟扣件连接的各个杆件的节点半刚性特性,如图 1 所示。弹性模量 E 取 $2.05 \times 10^5 \text{ MPa}$,屈服强度 f_y 取 205 MPa ,泊松比 $\mu = 0.3$,钢材密度 ρ 为 7850 kg/m^3 ,弹簧的转动刚度取值为 $35 (\text{kN} \cdot \text{m})/\text{rad}$ 。

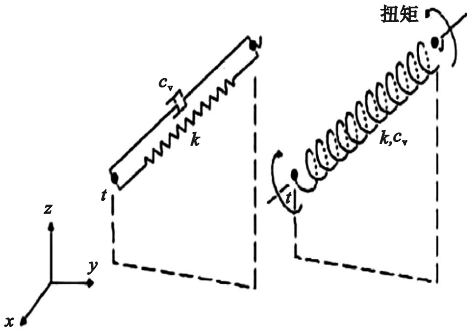


图 1 Combin14 单元示意图

Fig.1 The schematic diagram of Combin14 unit

2.2 扫地杆高度对支撑体系承载力和最大位移的影响

建立扫地杆高度分别为 100 mm, 200 mm,400 mm,600 mm 的数值分析模型,

如图 2 所示。其稳定性承载力和最大位移变化情况如表 2 所示。

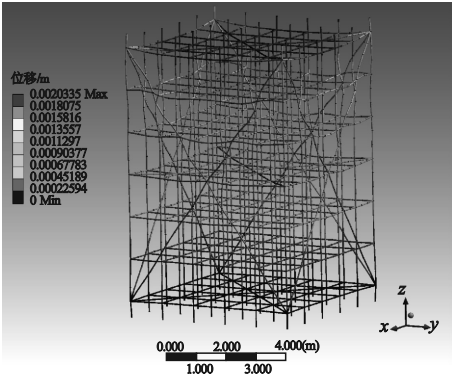


图 2 扫地杆高度 400 mm 有限元模拟

Fig. 2 The finite element simulation of sweeping bar with 400 mm height

表 2 支撑体系承载力及最大位移随扫地杆高度变化

Table 2 The bearing capacity and maximum displacement of the support system with different height of the sweeping bar			
序号	扫地杆高度/mm	稳定承载力/kN	最大位移/mm
1	100	32.16	1.54
2	200	31.23	1.65
3	400	28.24	1.86
4	600	24.86	2.03

注:横距 1.2 m,纵距 1.2 m,步距 1.5 m,自由端高度 0.5 m。

由表可知,随扫地杆高度在 100 ~ 600 mm 内增加,支撑体系的承载力会随之降低,最大位移变化增加且高度超过 200 mm 时,承载力降低 12% 左右;当扫地杆高度大于 400 mm 时,最大位移变化增加 10% 左右;支撑体系的稳定承载力与支撑体系的位移变化呈现负相关性,即支撑体系的稳定承载力越大,其最大位移变化越小,体系越稳定;从 100 ~ 600 mm 的扫地杆高度变化中发现,支撑体系的扫地杆高度越高,支撑体系的整个杆件变形越严重,从 1.54 mm 增加到

2.03 mm;从模态变化中发现,随扫地杆高度的增加,上部立杆的屈曲变化越明显。

2.3 步距对支撑体系承载力和位移的影响

分别建立不同步距高度的数值分析模型,步距高度分别为 1 m、1.5 m、1.8 m、2.2 m,如图 3 所示。研究步距高度对支持体系承载力和最大位移的影响,如表 3 所示。

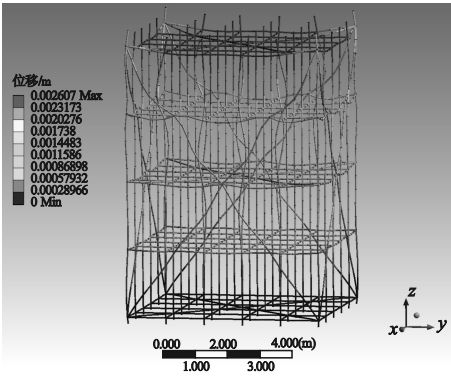


图 3 步距高度 2.2 m 有限元模拟图

Fig. 3 The finite element simulation with step height of 2.2 m

表 3 支撑体系承载力及最大位移随步距高度变化情况

Table 3 The bearing capacity and maximum displacement of support system with different step height			
序号	步距高度/m	稳定承载力/kN	最大位移/mm
1	1.0	77.75	1.40
2	1.5	63.14	1.65
3	1.8	51.47	1.90
4	2.2	36.56	2.67

根据数值模拟分析可以得出,步距高度对支撑体系的影响主要表现为:随着支撑体系的步距在 1.1 ~ 2.2 m 内增加,支撑体系的稳定承载力逐渐减弱;当步距达到 1.8 m 时,随步距增加,支撑体系的稳定承载力减弱达到 40.80%;在相同荷载下,支撑体系的最

大位移随着步距增加而增加,当步距达到 1.8 m 时,随步距增加,支撑体系的最大位移增加达到 40.51%,支撑体系的鼓曲变形逐渐波及最下层的杆件,支撑体系的抵抗稳定性能力变差。

2.4 纵横向立杆间距对支撑体系承载力和最大位移的影响

建立间距分别为 0.6 m、1.2 m、1.5 m、1.8 m、2.1 m 的支撑体系模型,有限元模拟如图 4 所示。研究纵横向立杆间距对支持体系承载力和最大位移的影响,如表 4 及图 5、图 6 所示。

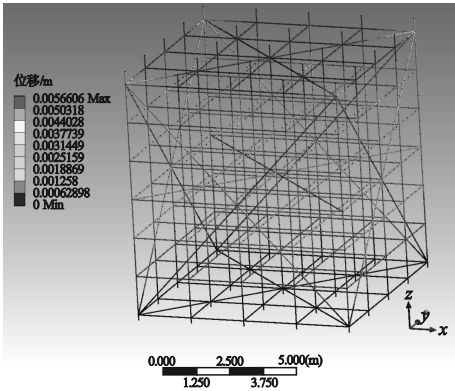


图 4 立杆间距 2.1 m 有限元模拟图

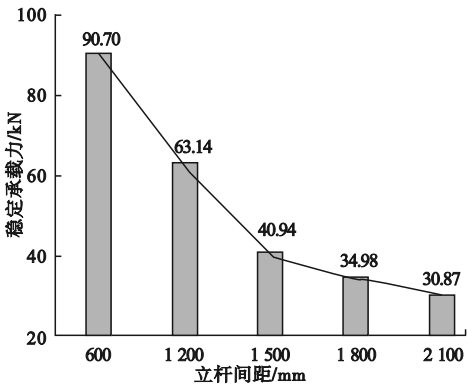


图 5 稳定承载力随立杆间距变化图

Fig. 5 The stability bearing capacity curve changing with pole spacing

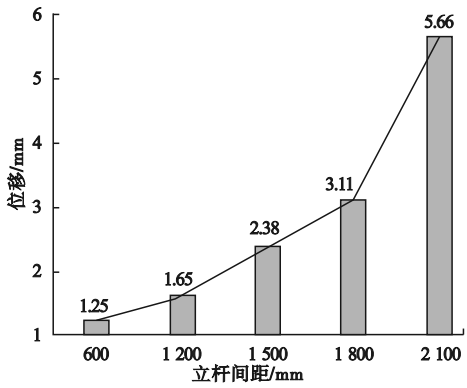


图 6 支撑体系最大位移随立杆间距变化图

Fig. 6 The frame displacement curve changing with pole spacing

表 4 支撑体系承载力及最大位移随纵横立杆间距变化

Table 4 The bearing capacity and maximum displacement of the support system changing with the distance between vertical and horizontal poles			
序号	横、纵向立杆间距/m	稳定承载力/kN	最大位移/mm
1	0.6	90.70	1.25
2	1.2	63.14	1.65
3	1.5	40.94	2.38
4	1.8	34.98	3.11
5	2.1	30.87	5.66

由 ANSYS 有限元模拟分析结果可知,立杆间距的变化对支撑体系的稳定性承载力和最大位移有很大的影响,主要表现在以下几个方面:立杆间距从 0.6 ~ 1.5m 变化时,支撑体系的稳定性承载力下降达到 17% 左右,当立杆间距达到 1.5 m 以上时,支撑体系的稳定性承载力下降在 15% 左右;立杆间距在 0.6 ~ 2.1 m 内不断增大时,支撑体系的位移变化逐渐增大,间距达到 1.5 m 时,最大位移增加幅度为 30.61%,间距达到 1.8 m 时,最大位移增加幅度达到 82%;从整体情况来看,通过逐渐改变立杆间距,支撑最大体系位移变化的部位主要集中在每一步中间的杆件、上部中间的杆件以及无剪刀撑拉结的杆件

件上,节点处、剪刀撑连接处及其他杆件连接处最大位移变化较小,整体稳定性强。

2.5 自由端高度对支撑体系承载力和最大位移的影响

分别建立不同自由端高度的数值分析模型,自由端高度分别为0.2 m、0.5 m、0.8 m、1.1 m,有限元模拟如图7所示。研究自由端高度对支持体系承载力和最大位移的影响,如表5所示。

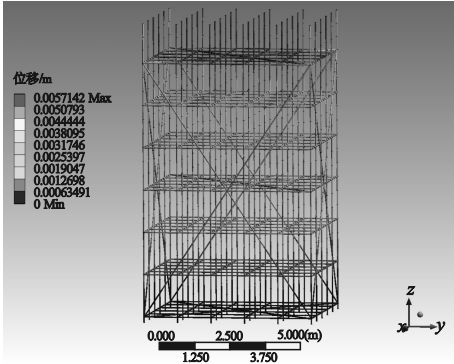


图7 自由端高度1.1 m有限元模拟图

Fig.7 The finite element simulation with free end height of 1.1 m

表5 支撑体系承载力及最大位移随自由端高度变化

Table 5 The bearing capacity and maximum displacement of the support system changing with the height of the free end

序号	自由端高度/m	稳定承载力/kN	最大位移/mm
1	0.2	61.39	1.65
2	0.5	57.87	2.53
3	0.8	50.56	3.01
4	1.1	36.05	5.71

从有限元模拟分析可以看出,自由端高度对支撑体系的影响主要表现为以下几个方面:支撑体系的稳定性承载力随自由端高度增加而降低,当自由端高度在0.2~0.8 m内时,稳定性承载力变化较小,当自由端高度超过0.8 m时,随自由端高度以0.3 m幅度增

加,支撑体系的稳定性承载力相比上一个支撑体系降低幅度达到24%~40%,位移增加19%;当支撑体系的自由端高度在0.2~0.8 m内时,支撑体系在施加一定的荷载后呈现出整体鼓曲变形,当自由端高度超过0.8 m时,支撑体系上部出现局部失稳,上部立杆及横杆变形严重;当支撑体系的自由端高度达到1.1 m时,支撑体系的稳定性承载力急剧下降,下降幅度达40%左右,同时最大位移变形量急剧增加,变形增幅达到原来的89%左右;从整个有限元模拟分析来看,支撑体系的四周立杆及横杆由于具有剪刀撑拉结,四周的杆件变形相对较小,主要变形集中在上端中部立杆、横纵杆。

2.6 水平剪刀撑对支撑体系承载力和最大位移的影响

利用ANSYS有限元分析软件建立三个不同数值分析模型,如图8所示。研究在一道水平剪刀撑、两道水平剪刀撑、三道水平剪刀撑、四道水平剪刀撑情况下支撑体系的稳定性承载力及最大位移变化情况^[20],如表6所示。

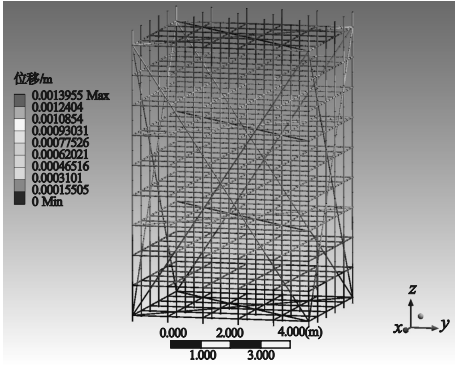


图8 四道水平剪刀撑有限元模拟图

Fig.8 The finite element simulation of four horizontal bracing

基于上述数值分析模型,从ANSYS有限元分析结果可看出,水平剪刀撑的布置情况对扣件式支撑体系承载力及最大位移变化影响较大,主要体现在:对于模型一,随剪刀撑增加承载力增加3%~8%,最大位移变化量减小10%~18%;模型二,随剪刀撑增加

表6 支撑体系承载力及最大位移随水平剪刀撑变化

Table 6 The bearing capacity and maximum displacement of support system changing with horizontal bracing						
水平剪刀撑 设置情况	模型一		模型二		模型三	
	稳定承载力/kN	最大位移/mm	稳定承载力/kN	最大位移/mm	稳定承载力/kN	最大位移/mm
一道	54.54	1.93	51.59	2.64	45.71	2.49
两道	56.29	1.62	55.58	2.27	52.66	2.16
三道	58.63	1.47	59.87	1.89	57.47	1.73
四道	63.00	1.27	63.46	1.59	68.62	1.40

承载力增加在 7% 左右,位移变化量减小 15% ~ 20%;模型三,随剪刀撑增加承载力增加 9% ~ 19%,最大位移变化量减小 13% ~ 19%;对于上述三种工况模型,增加剪刀撑对支撑体系的承载力影响较小,对于支撑体系最大位移变化的影响较大,随剪刀撑增加,最大位移变化量减小 10% 以上,部分达 20%;整个支撑体系的上部变形较为严重,下部出现轻微变形,无杆件加强的区域发生鼓曲变形。最大位移变化主要发生在无剪刀撑的位置,主节点和多杆件交接位置的位移变化较小。

2.7 竖向剪刀撑对支撑体系承载力和最大位移的影响

利用 ANSYS 有限元分析软件对三个不同的模型分别改变其竖向剪刀撑布设,如图 9 所示。研究三个数值分析模型分别设置无

竖向剪刀撑、一侧竖向剪刀撑、四周竖向剪刀撑,研究竖向剪刀撑对扣件式钢管支撑体系的影响,如表 7 及图 10、图 11 所示。

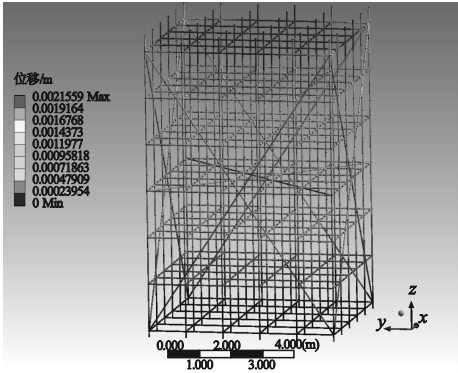


图9 四周竖向剪刀撑有限元模拟图

Fig. 9 The finite element simulation of vertical bracing around

表7 支撑体系稳定承载力及最大位移随竖向剪刀撑设置情况的变化

Table 7 Changes of stability bearing capacity and maximum displacement of support system changing with vertical bracing setting						
竖向剪刀撑 设置情况	模型一		模型二		模型三	
	稳定承载力/kN	位移/mm	稳定承载力/kN	位移/mm	稳定承载力/kN	位移/mm
无竖向	37.35	2.92	53.59	2.22	54.85	2.23
一侧竖向	43.93	2.41	58.67	1.85	62.33	1.80
四周竖向	54.55	2.16	68.01	1.51	66.36	1.57

根据数值模拟分析,随剪刀撑增加,整个支撑体系的抵抗位移及变形能力增强,剪刀撑的等效刚度对支撑体系的承载力及刚度有一定的贡献,当剪刀撑布设逐渐减少,支撑体系的稳定性承载力变化相对于最大位移变化更明显,说明竖向剪刀撑对支撑体系的位移影响较明显;支撑体系变形趋势为整体从上

部往下倾斜、波曲变形逐渐明显。
一阶模态图呈现为支撑最大体系发生整体侧向倾斜变形;二阶模态图呈现为整体侧向倾斜变形并出现轻微波曲变形;三阶模态图呈现为整体波曲变形,其中无竖向剪刀撑时出现整体扭曲变形;四阶模态图呈现为整体大波曲变形,整个杆件中部波曲变形严重。

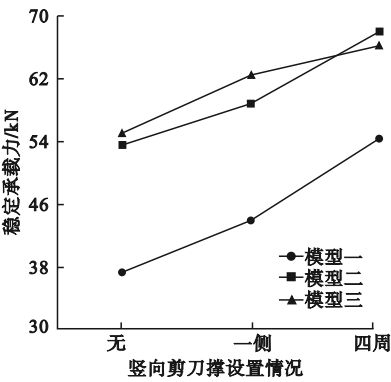


图 10 支撑体系稳定承载力随竖向剪刀撑布置情况变化

Fig. 10 The the stable bearing capacity curves of the support system changing with the layout of the vertical scissors

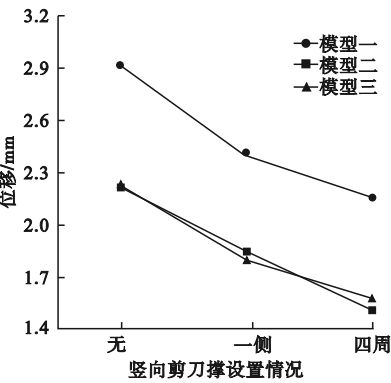


图 11 支撑体系最大位移随竖向剪刀撑布置情况变化

Fig. 11 The maximum displacement curves of supporting system changing with the arrangement of vertical bracing.

2.8 高宽比对支撑体系承载力和最大位移的影响

分别建立不同高宽比的数值分析模型,高宽比分别为 2.02, 1.61, 1.15, 0.81, 0.62, 0.51, 见图 12 及表 8。不同高宽比对支持体系承载力和最大位移的影响,如图 13、图 14 所示。从不同高宽比支撑体系的 ANSYS 有限元模型分析结果来看,支撑体系的高宽比对支撑体系的稳定性承载力和最大位移变化是有一定影响的,具体表现为:当支撑体系的高宽比在 1.15 以下时,随

高宽比增加,稳定性承载力减小在 11.50% 左右,最大位移变化量在 27.41% ~ 65%;高宽比在 1.15 ~ 2.02 时,随高宽比增加,稳定性承载力减小 15% 左右,最大位移变化量在 21.50% ~ 33.81%;随着支撑体系的高宽比增大,支撑体系的最大位移变化量达 20% 以上,部分达到 65%,高宽比对支撑体系的变形影响较为明显;随着支撑体系的高宽比增大,发生鼓曲变形的程度越明显,高宽比较小时主要出现小鼓曲变形,高宽比较大时支撑体系出现大鼓曲变形。

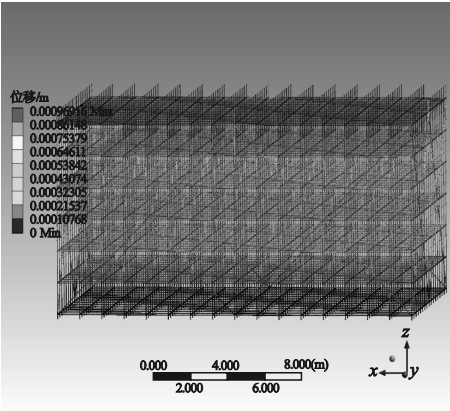


图 12 高宽比 0.51 支撑体系有限元模拟图

Fig. 12 The finite element simulation of support system with aspect ratio of 0.51

表 8 支撑体系模型高宽比变化情况

Table 8 The aspect ratio of the template support system model

模型	支撑体系高度/mm	支撑体系宽度/mm	高宽比
模型一	9.7	4.8	2.02
模型二	9.7	6.0	1.61
模型三	9.7	8.4	1.15
模型四	9.7	12.0	0.81
模型五	9.7	15.6	0.62
模型六	9.7	19.2	0.51

注:支撑体系高度共 9.7 m,扫地杆距地 0.2 m,自由端 0.5 m,立杆间距 1.2 m,步距 1.5 m,共 6 步,四周、底部、中部、顶部布设剪刀撑。

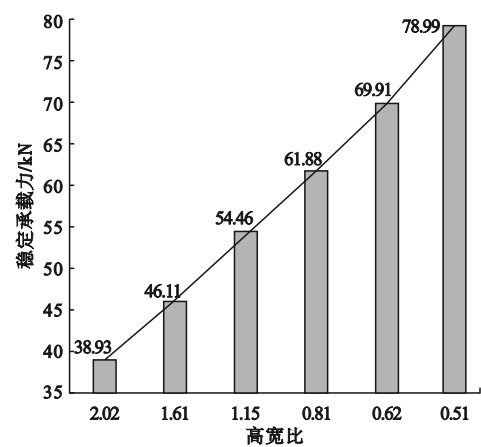


图 13 稳定承载力随高宽比变化

Fig. 13 The stable bearing curve changing with the layout of horizontal scissor brace

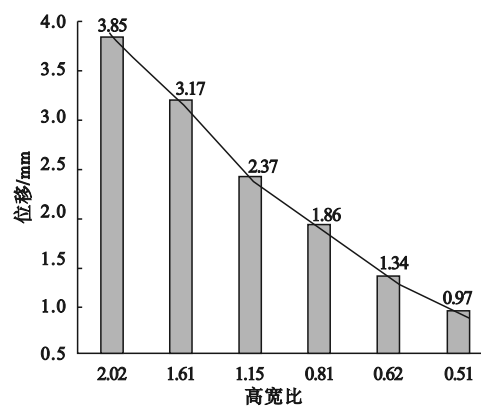


图 14 支撑体系最大位移随高宽比变化

Fig. 14 The maximum displacement curve of support system changing with height-width ratio

3 结 论

(1)综合数值分析结果及多规范对比分析,对于多规范约束下扣件式钢管支撑体系,关于荷载选取、荷载组合系数、立杆间距、步距、自由端高度等方面,每个规范存在不同的差异,实际应用时应该进行比较优选;且相关构造因素均会对立杆稳定性承载力有不同程度的影响,在实际工程应用中,应针对多个规范进行对比、合理选用。

(2)各项构造因素对支撑体系的稳定性均有一定的影响:扫地杆高度达到0.4 m时,承载力和位移受影响的变化幅度达 10% 以

上;自由端高度达到0.8 m时,承载力和位移都受影响的变化幅度达到 20% 左右;步距高度超过 1.8m 时,稳定性承载力下降和位移变化量达到 40% 以上;立杆间距在 1.5 m 以上时,承载力下降 15% 左右,位移变化量达到 30. 61% ;水平剪刀撑、竖向剪刀撑对承载力和位移影响变化量达到 10% ~20% ;高宽比 1. 15 以上时位移变化量达到 21. 52% 以上。

(3)支撑体系荷载设计、组合选取及立杆稳定性验算方面优先选用规范[13]及规范[14]执行;扫地杆、步距、自由端和剪刀撑布设优先选用规范[14]参照执行;立杆间距以及高宽比规范要求不统一,立杆间距建议不超过 1. 5m、高宽比不超过 3。

参考文献

[1] HOLMES M, HINDSON D, BRAGG B S. Structural behaviour of load bearing falsework [J]. Proceeding of the institution of civil engineers, 1979, 67(3) : 721 – 741.

[2] GODLLEY M H R, BEALE R G. Analysis of large proprietary access scaffold structures [J]. Structure & buildings, 2001, 146(1) : 31 – 39.

[3] 王绪旺. 扣件式模板高支撑体系设计与整体稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(3) : 148 – 152.

(WANG Xuwang. Design and overall stability analysis of high support system for fastener formwork [J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2017, 15(3) : 148 – 152.)

[4] 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. Calculation method of bearing capacity of fastener-type steel tube scaffolding [J]. Building structure, 2016, 46(6) : 71 – 76.)

[5] LIU Li, WANG Bo, WANG Juchao, et al. Analysis on impact of the node connection pattern for fastener-style steel pipe formwork support [J]. Applied mechanics and materials, 2014, 3307(580/581/582/583) : 2224 – 2227.

[6] 庄金平,蔡雪峰,郑永乾,等. 高大模板扣件式钢管支撑系统整体受力性能研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10) : 57 – 63.

(ZHUANG Jinping, CAI Xuefeng, ZHENG Yongqian, et al. Research on the overall

- mechanical performance of the fastener-type steel pipe support system for tall and large formwork [J]. China civil engineering journal, 2016, 49(10): 57-63.)
- [7] CHEN Fan, WAN Wendong, FAN Yibo, et al. Finite element analysis of typical fastener type full hall steel tubular scaffolds [J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2021, 634: 012095(7).
- [8] 徐琳, 张军. 扣件式钢管满堂支模架结构整体承载能力分析研究[J]. 钢结构, 2016, 31(6): 70-73.
(XU Lin, ZHANG Jun. Analysis and research on the overall bearing capacity of the fastener-type steel tube full-house formwork structure [J]. Steel structure, 2016, 31(6): 70-73.)
- [9] 薛梓炎. 基于安全计算软件依据不同施工规范的扣件式钢管模架立杆稳定性验算结果对比研究[J]. 建筑安全, 2020, 35(5): 41-44.
(XUE Ziyang. Comparative study on the stability checking results of fastener-type steel tube formwork vertical rods based on safety calculation software and different construction specifications [J]. Building safety, 2020, 35(5): 41-44.)
- [10] 薛炳泉, 胡斌, 徐军, 等. 扣件式钢管支架施工规范的正确应用[J]. 施工技术, 2017, 46(增刊2): 1161-1163.
(XUE Bingquan, HU Bin, XU Jun, et al. Correct application of construction specifications for fastener-type steel pipe supports [J]. Construction technology, 2017, 46(S2): 1161-1163.)
- [11] 李成禹. 高支模采用扣件式钢管支撑系统时该执行哪本规范? [J]. 建筑安全, 2018, 33(7): 18-23.
(LI Chengyu. Which code should be implemented when a fastener-type steel pipe support system is used for high formwork [J]. Building safety, 2018, 33(7): 18-23.)
- [12] YUAN Xuexia, WU Weixiu, YU Fangyong. Investigation of joint rotational stiffness and initial geometric imperfections of fastener-style tubular steel formwork-support [J]. Advanced in engineering research, 2017, 135: 278-282.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工模板安全技术规范: JGJ162—2008 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Safety technical specifications for building construction formwork: JGJ162—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 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.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Safety technical specification for fastener type steel pipe scaffolding in building construction: JGJ130—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构工程施工技术规范: GB50666—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for concrete structure engineering construction: GB50666—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工临时支撑结构技术规范: JGJ300—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for temporary support structures for building construction: JGJ300—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.)
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工脚手架安全技术统一标准: GB51210—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Unified standard for safety technology of building construction scaffolding: GB51210—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 施工脚手架通用规范: GB55023—2022 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. General code for scaffold in construction: GB55023—2022 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.)
- [19] MOHAMMED D R, ISMAEL M A. Effect of semi-rigid connection on post-buckling behaviour of frames using finite element method [J]. Civil engineering journal, 2019, 5(7): 1619-1630.
- [20] JIANG Fuxiang, ZHAO Lei, CHEN Lifei, et al. Influence of scissors support on ultimate bearing capacity of high-formwork support system [J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2019, 242(3): 032062(10).
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)