

超强薄壁钢管双排脚手架承载性能研究

刘红波¹, 闫智聪¹, 常浩腾¹, 吕嘉诚¹, 刘群²

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

摘要 目的 研究不同搭设参数对超强薄壁钢管双排脚手架承载力的影响, 提出一种稳定承载力计算方法。方法 对2组足尺模型进行静力破坏试验, 结合结构体系特点, 建立考虑杆件初弯曲以及扣件半刚性的有限元分析模型; 基于试验结果对数值模型进行验证, 并对其进行参数化分析; 通过改变搭设参数研究连墙件设置方式、立杆步距、扣件扭转刚度对架体承载力的影响; 基于单杆轴压稳定公式提出架体承载力计算方法。结果 在极限承载力相同的情况下, 超强薄壁钢管双排脚手架相比传统Q235钢管脚手架质量约降低82.7%, 成本约降低70.6%; 步距、连墙件设置方式、扣件扭转刚度对承载力有显著影响。结论 超强薄壁钢管双排脚手架体系具有轻质高强、施工效率高、节约成本等优点, 有限元和试验结果较为吻合, 提出的简化计算公式可为此类结构的设计提供理论依据。

关键词 超强薄壁钢管双排脚手架; 足尺试验; 半刚性; 有限元分析; 计算长度系数

中图分类号 TU731.2

文献标志码 A

Study on Bearing Capacity of Ultra-strong Thin-walled Steel Tube Double Row-scaffold

LIU Hongbo¹, YAN Zhicong¹, CHANG Haoteng¹, Lü Jiacheng¹, LIU Qun²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, China, 300072; 2. China Academy of Building Research, Beijing, China, 100013)

Abstract: This paper investigated the influence of different installation parameters on the bearing capacity of super strong thin-walled steel pipe double row scaffolding, and proposed a calculation method for stable bearing capacity. The static failure tests on two sets of full-scale models were conducted, combined the characteristics of the structural system to propose a finite element analysis model that considers the initial bending of the members and the semi rigidity of the fasteners. Based on the test results, the numerical model was validated and perform parametric analysis on it. By changing the installation parameters, the influence of the setting method of the connecting wall components, the spacing of the upright poles, and the torsional stiffness of the fasteners on the

收稿日期: 2023-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1101005)

作者简介: 刘红波(1983—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构与空间结构等方面研究。

bearing capacity of the frame were analyzed to propose a calculation method for the bearing capacity of the frame based on the stability formula of single pole axial compression. Compared to the traditional Q235 steel pipe scaffold, the ultra strong thin-walled steel pipe double row scaffold has a quality reduction of 82.7% and a cost reduction of 70.6%, while the ultimate bearing capacity has basically not decreased. The step distance, the setting method of connecting wall components, and the torsional stiffness of fasteners have a significant impact on the bearing capacity. The super strong thin-walled steel pipe double row scaffold system has advantages such as lightweight and high strength, high construction efficiency, and cost savings. The finite element analysis and experimental results are in good agreement, and the proposed simplified calculation formula can provide a theoretical basis for the design of such structures.

Key words: ultra-strong thin-walled steel tube double row-scaffold; full scale test; semi-rigid; finite element analysis; calculation length factor

脚手架是施工过程中必不可少的临时支撑结构,扣件式双排脚手架在目前各式脚手架中应用广泛,对其承载性能的研究也更为深入。刘红波等^[1-3]对有无剪刀撑的扣件式钢管脚手架承载性能进行了全面研究,通过总结足尺模型试验和有限元模拟结果,提出了简易的承载力计算方法。PENG Juilin^[4]研究指出无斜撑的扣件式钢管脚手架与门式脚手架极限承载力相差不大,增加斜撑可明显提高扣件式脚手架的承载性能。秦桂娟等^[5]运用 ANSYS 有限元软件分析了连墙件布置方式对扣件式钢管脚手架极限承载力的影响。敖鸿斐^[6]、黄宝魁^[7]和郭志鑫^[8]分别通过试验和有限元模拟的方法分析了立杆步距、立杆纵距、立杆横距、连墙件布置等参数对双排扣件式钢管脚手架极限承载力的影响。陆征然等^[9]在钢结构框架理论中梁柱节点刚度分析方法的基础上,通过建立三维有限元模型,得出扣件连接抗弯性能与转动刚度的关系。张厚先等^[10]利用 ANSYS 软件建立了三维非线性屈曲双排扣件式钢管脚手架模型,并对风荷载对脚手架承载力的影响进行分析;结果表明:风荷载对扣件式钢管脚手架整体稳定承载力有显著影响。秦桂娟等^[11]在提出扣件式钢管脚手架风荷载计算方法的基础上,运用 ANSYS 软件对立杆最大弯矩受连墙件设置缺陷影响程度和变化规律进行研究。

综上所述,现有关于双排扣件式脚手架承载性能的研究主要集中在传统钢材,对架体新材料方面的研究较少。传统钢管壁厚 3.5 mm,单根构件质量较大,搭设效率较低,基于此,笔者以超强薄壁钢管作为双排脚手架材料,通过 2 组足尺模型静力破坏试验和数值模拟探究搭设参数对超强薄壁钢管脚手架承载性能的影响,并基于单杆轴压稳定公式提出超强薄壁钢管双排脚手架承载力的计算方法;结果表明,笔者提出的计算方法可以满足工程要求,可为此类结构的设计提供理论依据。

1 试验方案

1.1 模型设计

为了研究超强薄壁钢管双排脚手架承载性能,笔者设计了 2 个足尺模型,模型搭设参数见表 1,超强薄壁钢管双排脚手架示意图如图 1 所示。其中, l_a 、 l_b 、 h 分别为立杆的纵距、横距、步距。

表 1 超强薄壁双排脚手架搭设参数
Table 1 The erection parameters of super thin wall double-row scaffold

编号	高/ m	横距/ m	纵距/ m	步距/ m	扫地杆 高/m	连墙件布 置方式
ST1	7.7	1.3	1.5	1.8	0.4	三步三跨
ST2	7.7	1.3	1.5	1.8	0.4	两步三跨

2 组足尺试验均在非连墙侧设置竖向剪

试验架体内部杆件的应变的量测是通过胶基应变片与振弦式表面应变计共同完成。应变测点布置如图 5 所示,每组试验均设置 20~30 个应变测点对应变进行量测。

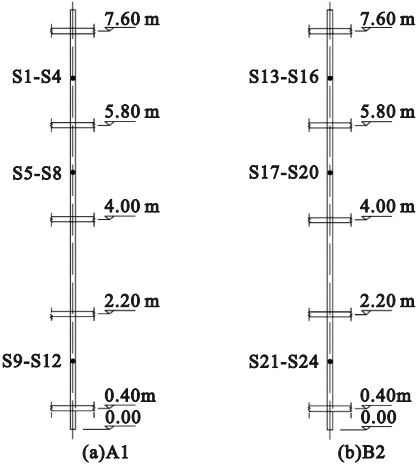


图 5 立杆应变测点布置图

Fig. 5 Layout of strain measurement points for vertical poles



(a)顶层横杆下挠



(b)非连墙侧立杆向外鼓曲

图 6 模型 ST1 失效模式

Fig. 6 The failure modes for ST1

2.2 稳定承载力分析

将加载过程中加载区域单杆平均承载力达到的最大值定义为试验模型的承载力。模型 ST1 单杆平均承载力为 19.41 kN,模型 ST2 单杆平均承载力为 22.83 kN。本次试验通过位移传感器,进行加载全过程位移检测,得到了 2 组试验的荷载-位移曲线,如图 7 所示。

由图 7 可知:①模型 ST1 除东侧顶部测点位置发生明显大位移外,其余测点处位移较小,位移量在 -5~5 mm。②模型 ST2 东侧顶部和中部测点位置在架体达到极限承载力时

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

模型 ST1 和模型 ST2 的破坏模式相同,均为“顶层横向水平杆挠曲”、“非连墙侧立杆鼓曲”的整体失稳破坏。以模型 ST1 为例,当总荷载加载至 96 kN 时,架体出现连续轻微响声,顶层扣件开始出现下滑。继续加载,在加载至 112 kN 时,立杆鼓曲,第一步立杆开始向东方向挠曲。当荷载增加至 120 kN,持荷期间可以观察到顶层水平杆开始向下挠曲(见图 6(a))。继续加载至 128 kN 时,期间可以观察到第一、二步立杆明显向东方向鼓曲。由 128 kN 继续加载至 144 kN 的过程中,架体出现晃动,非连墙侧的立杆出现明显鼓曲(见图 6(b)),且荷载无法继续增加,判断此时已经达到了该双排脚手架的极限承载力,结束加载。

位移较大,分别为 14.97 mm 和 19.76 mm,南侧中部测点处位移为 7.81 mm。③设置两步三跨连墙件的模型 ST2 比设置三步三跨连墙件的模型 ST1 承载力提高约 17.6%。

文献[7]对 4 个传统双排扣件式脚手架开展足尺试验,其中方案 1 与本次试验中模型 ST2 的单杆平均承载力较为接近,方案 1 单杆平均承载力为 19.75 kN,在相同承载力条件下,超薄壁钢管比传统 Q235 钢管双排脚手架重量约降低 82.7%,成本约降低 70.6%,体现出其轻质高强、施工效率高、节

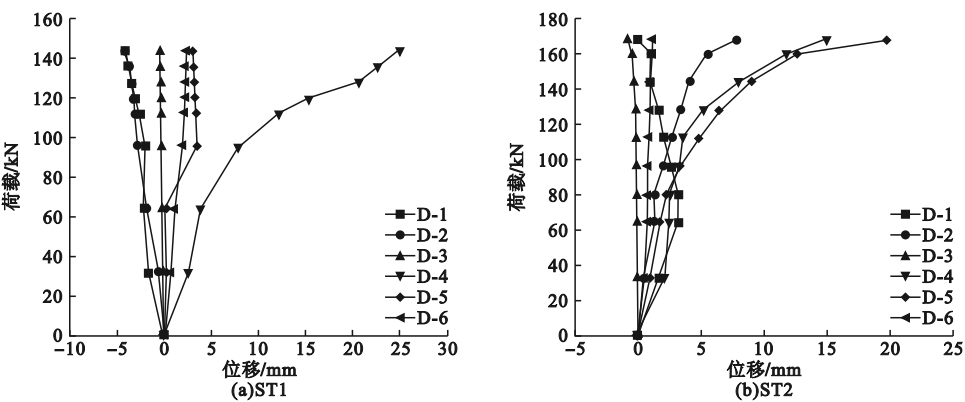


图7 模型 ST1 与 ST2 荷载-位移曲线

Fig. 7 The load displacement curve of model ST1 and ST2

约成本的特点,所以在搭设同类型双排脚手架时可优先考虑采用超薄壁钢管代替传统 Q235 钢管。

2.3 荷载-应力分析

立杆的荷载-应力曲线如图 8 所示。从图中可以看出,ST1 和 ST2 立杆在弹性阶段发生失稳,ST1 南侧立杆上部测点在初始阶

段出现拉应力,随着荷载的增加,拉应力也不断增加,直至立杆发生严重鼓曲丧失承载能力,这与试验现象相吻合;ST1 东侧立杆在加载后期出现应力降低的现象;ST2 东侧立杆在加载至极限荷载时拉应力突然降低,这是由于随着荷载增加,立杆突然失稳,发生鼓曲所导致的。

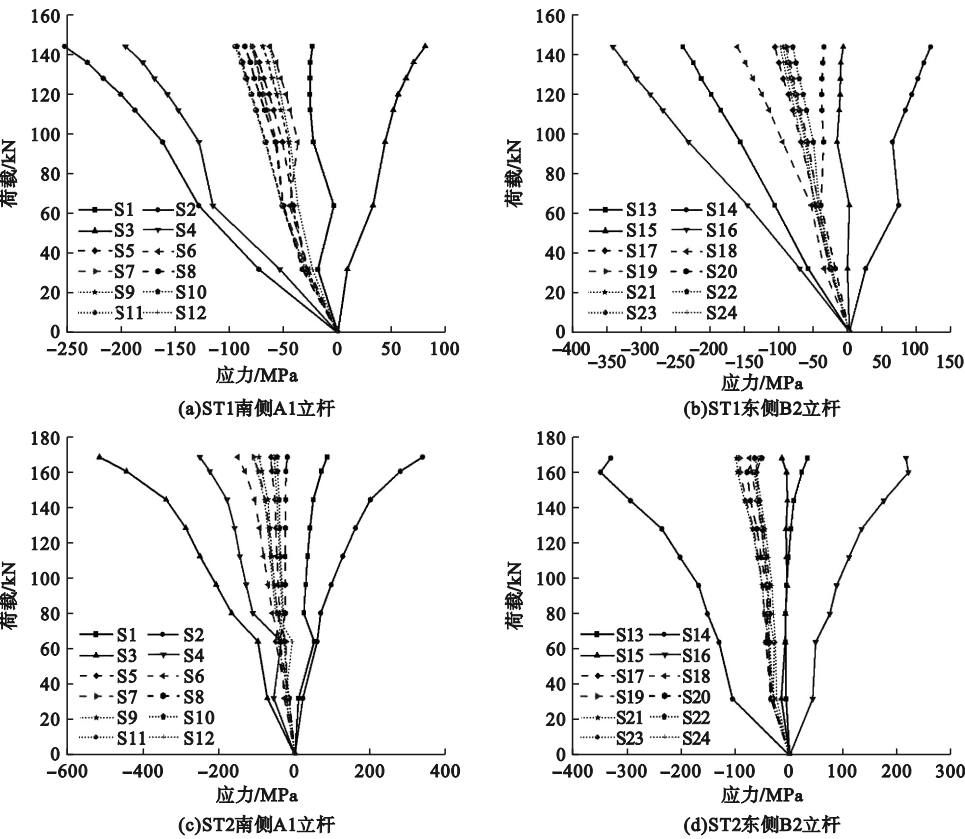


图8 立杆荷载-应力曲线

Fig. 8 The load stress curve

3 有限元分析

3.1 数值模型

为了研究超强薄壁钢管脚手架的承载能力及承载力随连墙件设置方式、步距、扣件扭转刚度等参数变化的规律,笔者利用 ABAQUS 软件进行了不同搭设参数下的有限元承载力分析计算。有限元分析中,钢管外径 48 mm,壁厚 1.3 mm,按照本次材料性能试验结果,钢材的弹性模量为 190 MPa,屈服强度为 1 351 MPa,密度为 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3。用 coupling 分别耦合顶层及其他层节点的平动自由度,采用弹簧单元模拟扣件半刚性性质,本次试验中节点搭设方式与文献[15]中节点搭设方式相同,因此节点刚度参照该文献的研究成果,有限元模型节点设置如图 9 所示。将特征值屈曲分析中所得第一阶失稳形态按照比例作为初始缺陷进行非线性分析。由于超强薄壁钢管长细比相对传统钢管较大,因此在储存及运输过程中会产生相对较大的初始缺陷,根据现有研究成果^[16],在实际施工中,脚手架的最大初始缺陷会达到 $L/100$,因本试验中脚手架均为工人现场搭设,初始缺陷取 $L/100$,其中 L 为杆件长度。

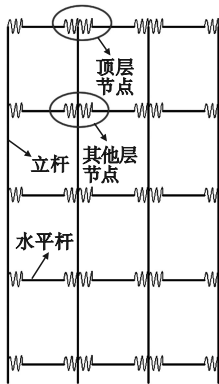


图 9 有限元模型节点
Fig. 9 The FEM nodes

3.2 模型验证

有限元模型破坏模式如图 10 所示。由图可知,超强薄壁钢管双排脚手架的失稳模

式主要为顶层横向水平杆挠曲和非连墙侧立杆鼓曲,这与试验现象基本一致。试验和有限元承载力计算结果如表 3 所示。从表中可以看出,有限元计算结果与试验数据平均误差为 -6.2%。考虑到试验模型的扣件均直接从市场购买,构件质量参差不齐,此外,工人在安装的过程中搭设顺序也不相同,结构整体缺陷要比永久结构大得多,且无法实现理想化均布加载。综上,笔者所提出的超强薄壁钢管双排脚手架有限元模型基本正确,可以预测脚手架的承载力和失稳模式。

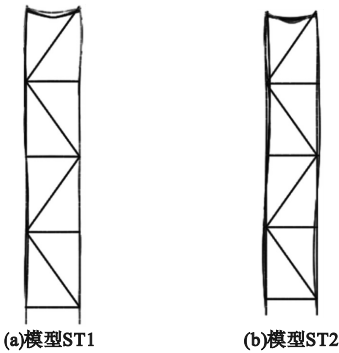


图 10 有限元分析失稳模式

Fig. 10 The failure modes for FEM

表 3 超强薄壁钢管脚手架试验承载力
和有限元结果对比

Table 3 The comparison between test bearing capacity and FEM results

试验模型	试验承载力/ kN	数值模拟承 载力/kN	承载力 误差/%
ST1	19.41	19.33	-0.4
ST2	22.83	20.10	-12.0

4 参数化分析

搭设参数是影响脚手架承载能力的重要因素,按照前述提出的数值计算模型,进行了不同间距、扣件扭转刚度和连墙件设置方式的参数化分析。通过参数化分析,得到了承载力随搭设参数的变化曲线(见图 11)。

结合足尺试验的分析结果,总结出搭设参数对超强薄壁钢管双排脚手架承载力的影响。

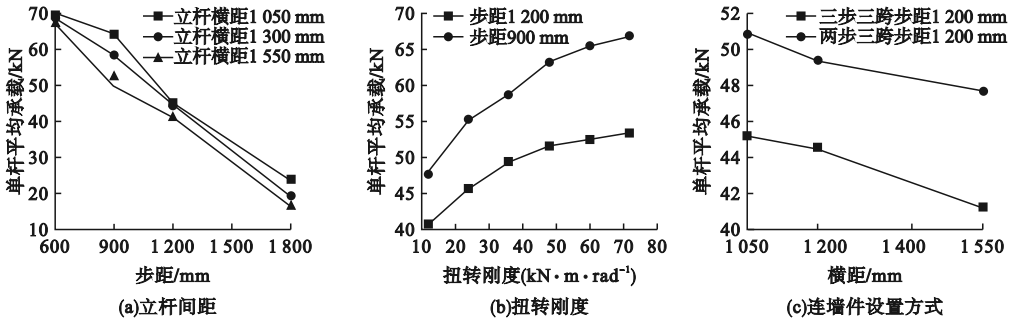


图 11 搭设参数对脚手架承载力影响的参数化分析

Fig. 11 Parametric analysis of the erection parameters influence on the bearing capacity of scaffolding

(1) 步距:步距对单杆平均承载力的影响较为明显。步距由 1 200 mm 增加到 1 800 mm 时,单杆平均承载力降低 54.7%;步距由 900 mm 增加到 1 200 mm 时,单杆平均承载力降低 23.7%。

(2) 立杆横距:立杆横距在步距为 1 800 mm 时对单杆平均承载力影响较为显著。随着步距的减小,立杆横距对单杆平均承载力的影响逐渐减小,立杆横距由 1 050 mm 增加到 1 550 mm 时,单杆平均承载力降低 8.9%~23.8%。

(3) 连墙件设置方式:连墙件竖向间距由 5.4 m 减小到 3.6 m,单杆平均承载力提高程度在 13.5%。

(4) 扣件扭转刚度:增加扣件扭转刚度对单杆平均承载力的提高程度有限。单杆平均承载力随扣件扭转刚度的变化呈抛物线状,当扣件扭转刚度大于 50 (kN·m)/rad 时,单杆平均承载力增长放缓并逐渐趋于稳定。因此,安装时扣件扭转刚度应保证在 50 (kN·m)/rad 以上,这样不仅可以保障工人施工安全,还可以保证架体发挥良好的承载性能。

5 承载力计算方法

《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ130—2011)^[17]将双排脚手架稳定问题简化为立杆轴心受压问题,残余应力、初弯曲和初偏心等初始缺陷对轴心受力构件稳

定承载力有较大的影响,《钢结构设计标准》(GB50017—2017)^[18]考虑到三种因素同时达到最大值的概率较小,因此确定构件稳定系数时仅考虑初弯曲的影响。

《钢结构设计标准》(GB50017—2017)^[18]提出轴心受压构件的整体稳定承载力按式(1)进行验算,轴心受压构件的稳定系数按式(2)和式(3)计算。

$$\frac{N}{\varphi A} \leq f. \tag{1}$$

当 $\lambda_n^2 \leq 0.215$ 时:

$$\varphi = 1 - \alpha_1 \lambda_n^2. \tag{2}$$

当 $\lambda_n^2 > 0.215$ 时:

$$\varphi = \frac{1}{2\lambda_u} [(\alpha_2 + \alpha_3 \lambda_n + \lambda_n^2) - \sqrt{(\alpha_2 + \alpha_3 \lambda_n + \lambda_n^2)^2 - 4\lambda_n^2}]. \tag{3}$$

式中: φ 为稳定系数; N 为单杆极限承载力; λ_n 为正则化长细比; α_1 、 α_2 、 α_3 为缺陷系数; f 为钢材强度设计值。

利用 ABAQUS 有限元软件分析计算得到了初始偏差分别为 $L/100$ 、 $L/200$ 、 $L/300$ 、 $L/500$ 、 $L/1\,000$ 不同正则化长细比的单杆极限承载力 N ,由式(1)反推计算得到单杆稳定系数,并在《钢结构设计标准》^[18]和《规范》^[17]中查表得到了对应长细比 Q235 钢管轴心受压稳定系数,如表 4 所示。

根据长细比与稳定系数的关系,在规范中查表得到对应的长细比,再根据式(4)和式(5)得到计算长度系数 μ ,如表 5 所示。

表 4 不同初始缺陷下超强钢管稳定系数

Table 4 The stability coefficient of super strong steel pipe with different initial defects

长细比	$\varphi_{L/100}$	$\varphi_{L/200}$	$\varphi_{L/300}$	$\varphi_{L/500}$	$\varphi_{L/1\,000}$	$\varphi^{[18]}$	$\varphi^{[17]}$
0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000	1.000
20	0.916 6	0.956 3	0.970 5	0.981 9	0.990 9	0.970	0.947
40	0.797 8	0.884 4	0.919 0	0.949 1	0.972 9	0.899	0.886
60	0.646 9	0.766 8	0.824 5	0.881 7	0.934 3	0.807	0.818
80	0.559 0	0.675 7	0.736 2	0.801 7	0.872 7	0.687	0.722
100	0.447 4	0.543 0	0.593 8	0.650 2	0.712 4	0.555	0.588
120	0.340 4	0.415 0	0.453 4	0.493 9	0.534 5	0.436	0.452
140	0.259 4	0.315 6	0.342 0	0.370 2	0.399 1	0.344	0.349
160	0.229 5	0.270 0	0.287 5	0.304 2	0.318 9	0.276	0.274
180	0.190 5	0.220 2	0.233 0	0.244 8	0.254 7	0.225	0.220
200	0.162 6	0.183 2	0.192 4	0.200 8	0.207 8	0.186	0.180
220	0.132 1	0.150 4	0.158 3	0.165 5	0.171 6	0.156	0.150

$\lambda = l_o/i.$ (4)

$l_o = \mu h.$ (5)

式中: λ 为长细比; l_o 为计算长度; i 为回转半径; h 为步距。

表 5 不同初始缺陷超强钢管计算长度系数

Table 5 The effective length coefficient of super strong steel pipe with different initial defects

步距/ mm	不同初始缺陷下超强钢管长度系数				
	L/100	L/200	L/300	L/500	L/1 000
600	1.500	1.277	1.161	1.016	0.781
900	1.288	1.146	1.070	1.014	0.929
1 200	1.203	1.092	1.041	1.003	0.970
1 500	1.162	1.072	1.040	1.009	0.980
1 800	1.121	1.067	1.027	1.003	0.988

为了验证该方法的可靠性,笔者计算了 2 个足尺试验的承载力,与试验结果的对比如表 6 所示。由表 6 可看出,承载力最大误差为 -11.8%,考虑到脚手架在初始缺陷、搭设误差、扣件质量等方面的因素,该方法可以满足工程要求。

表 6 承载力计算结果与试验结果比较

Table 6 The comparison of bearing capacity calculation with test results

试验编号	承载力试验值/kN	承载力计算 值/kN	误差/%
ST1	19.41	20.14	3.8
ST2	22.83	20.14	-11.8

6 结 论

(1)在极限承载力相同的条件下,超薄壁钢管比传统 Q235 钢管双排脚手架质量约降低 82.7%,成本约降低 70.6%,具有成本低、轻质高强、施工效率高等优点。

(2)笔者提出了考虑扣件半刚性和杆件初弯曲的超薄壁钢管双排脚手架数值计算模型,有限元与试验结果吻合较好,可以考虑利用该方法应用于今后的架体计算中。

(3)通过对不同搭设参数下脚手架承载力的参数化分析,找出了其对脚手架承载性能的影响规律;立杆步距、连墙件设置方式和扣件扭转刚度对超薄壁钢管双排脚手架承载性能有显著的影响,随着立杆步距的增加,承载力下降尤为显著。

(4)笔者提出了超薄壁钢管双排脚手架承载力的简化计算公式,在工程中,可根据立杆步距利用公式对架体承载力进行验算。

参考文献

[1] 刘红波,陈志华,王小盾,等.有剪刀撑扣件式钢管模板支架简化计算方法[J].土木建筑与环境工程,2011,33(4):65-72.
(LIU Hongbo, CHEN Zhihua, WANG Xiaodun, et al. Simplified calculation method of steel tube and coupler scaffold with X-bracing [J]. Journal of civil architectural & environmental engineering, 2011, 33(4): 65-72.)

[2] LIU Hongbo, ZHAO Qiuhong, WANG Xiaodun, et al. Experimental and analytical studies on the

- stability of structural steel tube and coupler scaffolds without X-bracing [J]. Engineering structures, 2010, 32(4): 1003–1015.
- [3] LIU Hongbo, CHEN Zhihua, WANG Xiaodun, et al. Theoretical analysis and experimental research on stability behavior of structural steel tube and coupler falsework with X-bracing [J]. Advanced steel construction, 2010, 6(4): 946–962.
- [4] PENG Juilin, YEN Tsong, KUO Chingchi. Analytical and experimental bearing capacities of system scaffolds [J]. Journal of Zhejiang university (science A), 2010, 10(1): 82–92.
- [5] 秦桂娟, 刘海军, 贾连光, 等. 连墙件布置对脚手架整体稳定承载力的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(6): 981–987.
(QIN Guijuan, LIU Haijun, JIA Lianguang, et al. Influence of arrangement of tie members on overall stability of scaffolds [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(6): 981–987.)
- [6] 敖鸿斐, 李国强. 双排扣件式钢管脚手架的极限稳定承载力研究[J]. 力学季刊, 2004, 25(2): 213–218.
(AO Hongfei, LI Guoqiang. Investigation of overall load-bearing stability capacity of tube-and-coupler scaffolds [J]. Chinese quarterly of mechanics, 2004, 25(2): 213–218.)
- [7] 黄宝魁, 徐崇宝, 张铁铮, 等. 双排扣件式钢管脚手架整体稳定实验与理论分析[J]. 建筑技术, 1991(9): 40–45.
(HUANG Baokui, XU Chongbao, ZHANG Tiezheng, et al. Experiment and theoretical analysis on the overall stability of double row fastener type steel tube scaffold [J]. Architecture technology, 1991(9): 40–45.)
- [8] 郭志鑫, 周洪涛. 双排扣件式钢管脚手架ANSYS受力性能分析[J]. 施工技术, 2013, 42(14): 102–105.
(GUO Zhixin, ZHOU Hongtao. Mechanical analysis of double pole fastener steel tube scaffold with ANSYS [J]. Construction technology, 2013, 42(14): 102–105.)
- [9] 秦桂娟, 刘国文. 连墙件设置缺陷对脚手架立杆最大弯矩的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(1): 109–116.
(QIN Guijuan, LIU Guowen. The Influence of the tie member with defects on the maximum bending moment of scaffold upright tube [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(1): 109–116.)
- [10] 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.
(CHEN Zhihua, LU Zhengran, WANG Xiaodun, et al. Study of the bearing capacity of fastener steel tube full hall formwork support using the theory of stability of pressed pole with three-point rotation restraint [J]. China civil engineering journal, 2012, 45(5): 104–113.)
- [11] 张厚先, 徐奋强, 张德恒, 等. 用ANSYS分析扣件式钢管脚手架整体稳定承载力[J]. 建筑技术, 2009, 40(6): 555–557.
(ZHANG Houxian, XU Fenqiang, ZHANG Deheng, et al. ANSYS-based analysis on whole stable load-bearing capacity of steel tubular scaffold with couplers [J]. Architecture technology, 2009, 40(6): 555–557.)
- [12] 秦桂娟, 张淑慧, 张学峰. 超高层建筑施工脚手架风载作用下立杆最大弯矩分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(4): 651–657.
(QIN Guijuan, ZHANG Shuhui, ZHANG Xuefeng. Analysis on scaffold tie member in super high-rise building construction under wind load [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(4): 651–657.)
- [13] 贾世龙, 陈凯荟, 刘莉, 等. 风荷载作用下超高层建筑脚手架立杆稳定性研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(4): 676–684.
(JIA Shilong, CHEN Kaihui, LIU Li, et al. Study on stability of scaffolding poles for super high-rise buildings under wind loads [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(4): 676–684.)
- [14] YUE Feng, YUAN Yong, LI Guoqiang, et al. Wind load on integral-lift scaffolds for tall building construction [J]. Journal of structural engineering, 2005, 131(5): 816–824.
- [15] 王刚. 扣件式满堂钢管脚手架试验及设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
(WANG Gang. Experimental and design method studies of the full hall steel tubular scaffold with couplers [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.)
- [16] 贾莉. 扣件式钢管满堂脚手架力学性能与设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
(JIA Li. Study on structural behavior and design method of steel tube-coupler scaffolds [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.)
- [17] 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.
(The Ministry of Development of the People's Republic of China. Safety technical specifications of construction fastener type steel pipe scaffold: JGJ130—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [18] 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, 2017.
(The Ministry of Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.)
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)