

# 连墙件设置缺陷对脚手架立杆最大弯矩的影响

秦桂娟,刘国文

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究风荷载作用下连墙件设置缺陷对脚手架立杆最大弯矩的影响程度和规律,为脚手架合理设计提供依据. 方法 考虑高层建筑施工脚手架风振影响计算出风载荷标准值,对扣件节点采用半刚性研究,利用有限元 ANSYS 分析软件对脚手架架体进行模拟分析,研究连墙件设置缺陷下架体立杆最大弯矩的变化及规律. 结果 从模拟分析中得出连墙件设置方式不同时脚手架立杆最大弯矩的变化趋势和结果,对比分析后得出当连墙件只与内立杆连接时,最大弯矩主要出现在有连墙件立杆节点处,其立杆最大弯矩增加,连墙件设置缺陷对脚手架立杆最大弯矩的影响程度可达近一倍. 结论 当连墙件设置只与内立杆相连时,对立杆弯矩增加较大,降低其承载力,在施工过程中脚手架连墙件设置应该保证与内外立杆同时连接.

**关键词** 脚手架;立杆;连墙件;风荷载;最大弯矩

中图分类号 TU731.2 文献标志码 A

## The Influence of the Tie Member with Defects on the Maximum Bending Moment of Scaffold Upright Tube

QIN Guijuan, LIU Guowen

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to provide some design references for scaffold, influence of the tie members with defect on maximum bending moment of its upright tube under wind loads were studied. In view of wind vibration for high-rise structure of scaffold, the scaffold structure was simulated to analyze the change of its upright tube maximum bending moment for the tie members with defect by ANSYS software. Semi-rigid nodes is applied to its connection joints. The maximum bending moment mainly appears at the joint when the tie member is only connected with the inner upright tube, and the maximum bending moment is obviously increased than that of other tie member. So the installation of the tie member should be connected with the inner and outer upright tube at the same time.

**Key words:** scaffold; upright tube; tie member; wind load; maximum bending moment

双排扣件式钢管脚手架由钢管大横杆、小横杆、立杆、扣件、脚手板、连墙件、剪刀撑、挡脚板组成<sup>[1-2]</sup>。各杆通过扣件连接形成的空间结构体系,架体侧向通过连墙件与结构连接。连墙件是保证脚手架架体侧向稳定的关键构件,连墙件设置的某些缺陷会给施工过程中带来极大影响,连墙件在施工过程中应既能承受拉力又能承受压力,设置连墙件不仅防止脚手架在风载和其他水平力作用下的倾覆,同时还对立杆有侧向支撑的作用,保证立杆的稳定。作用在脚手架上的风载随着风向及建筑物高度而不断改变<sup>[3-6]</sup>。在风载作用下,脚手架整体脱离建筑结构从而形成塌落施工,事故居多。脚手架体系连接节点并不是理想状态下的“刚接”或“铰接”,而是介于两者之间的半刚性连接<sup>[7-11]</sup>。

2001年美国的L. B. Weesner和H. L. Jones<sup>[12]</sup>对高承重脚手架进行足尺试验,并且运用有限元软件ANSYS分析脚手架的特征值屈曲及几何非线性,得到的结果与试验结果较接近。2001年刘宗仁等<sup>[13]</sup>提出了一种扣件式钢管脚手架临界力下限的计算法,将三维立体空间的脚手架结构简化为平面结构进行架体计算是安全可靠的。2003年敖鸿斐等<sup>[14]</sup>对双排扣件式钢管脚手架的极限承载力进行研究,分析了脚手架立杆纵距、架体步距、连墙件布置、架体宽度等对脚手架极限承载力的影响。2009年J. L. Peng等<sup>[15-16]</sup>将扣件式钢管脚手架和门式脚手架作对比分析,发现扣件式钢管脚手架与门式

脚手架两者的临界承载力相差不大,证明剪刀撑的设置对两种脚手架形式的临界承载力影响较小。2016年傅宇等<sup>[17]</sup>通过悬挑脚手架足尺模型试验,得出加载过程中悬臂式钢管脚手架体系应力和挠度变化规律。2017年蔡明金等<sup>[18]</sup>通过对外脚手架与满堂红脚手架施工技术进行研究,并对脚手架工程安全性进行了验算,2018年覃明<sup>[19]</sup>通过阐述脚手架连墙件的定义、作用,将连墙件分成刚柔连接法、预连接法、预埋后连接法和后连接法,明确连墙件的安全技术与管理思路,并提出了制定连墙件安全技术规范的提议与设想。基于已有研究成果,笔者利用有限元ANSYS分析软件对脚手架架体进行模拟分析,研究连墙件设置缺陷下架体立杆最大弯矩的变化及规律,为脚手架合理设计提供依据。

## 1 连墙件设置和风荷载标准值的计算

### 1.1 连墙件设置方式的分析模型

在实际施工过程中脚手架搭设人员因节省时间、节省材料等原因,时常在安装脚手架时只与内立杆而不与外立杆相连,连墙件设置出现缺陷。因此研究连墙件设置缺陷对脚手架的影响对安全设计非常重要。笔者研究连墙件同时与内、外立杆连接和连墙件只与内立杆连接两种工况下连墙件设置对立杆最大弯矩的影响。两种工况分析模型见图1、图2。

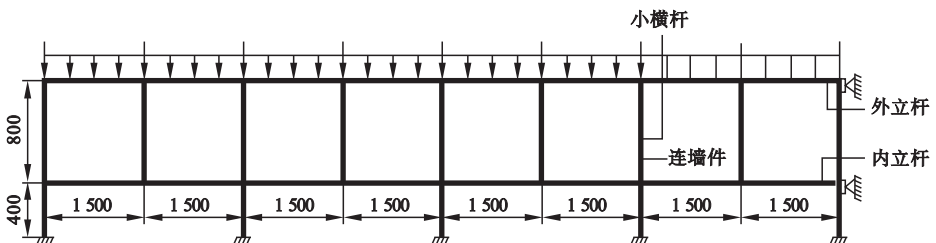


图1 连墙件同时与内外立杆连接

Fig. 1 The tie member connecting with inside and outside upright tube

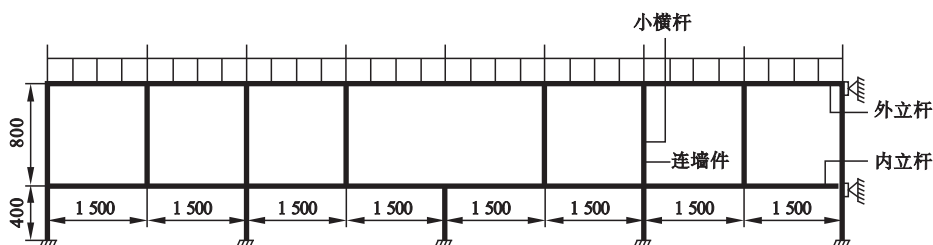


图2 连墙件只与内立杆连接

Fig. 2 The tie member connecting with the insider upright tube

## 1.2 考虑风振影响水平风荷载标准值计算

风振是风的脉动部分对高耸或高层结构所引起的动态作用。一般结构对风力的动态作用并不敏感,可仅考虑静态作用。但对于高耸结构和高层建筑,除考虑静态作用外,还需考虑动态作用。动态作用与结构自振周期、结构振型、结构阻尼和结构高度等因素有关,脉动风压可以假定为各态历经随机过程并按随机振动理论的基本原理导出。

风振系数随脚手架架体高度的变化而变化。风振系数不仅与建筑场地有关,而且与结构自振特性有关。对于高层及超高层建筑施工脚手架而言,由于脚手架通过连墙件与主体结构相连且以主体结构为依托,因此对于外形和质量沿高度无变化的等截面结构可只考虑第一振型的影响。

随着建筑结构高度的增加,风荷载作用不断增强,风振的影响不可忽略。因此计算作用于脚手架上的水平风荷载标准值时,除了考虑基本风压值、风荷载体形系数、风压高度变化系数之外,还需考虑风振系数 $\beta_z$ 的影响,计算式如下:

$$w_k = \beta_z \cdot \mu_z \cdot \mu_s \cdot w_0 \quad (1)$$

$$\beta_z = 1 + 2g \cdot I_{10} \cdot B_z \cdot \sqrt{1 + R^2} \quad (2)$$

式中: $w_k$ 为风荷载标准值 kPa; $\mu_z$ 为风压高度变化系数,应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》(GB50009—2012)规定取值; $\mu_s$ 为脚手架风荷载体型系数,按《建筑施工脚手架安全技术规范》(JGJ130—2011)的规定取值; $w_0$ 为基本风压值 kPa,按现行国家标准《建筑结构荷载规范》(GB50009—2012)的

规定取值,取重现期 $n=10$ 对应的风压值。

$w_0$ 取10年重现期基本风压,沈阳地区 $w_0=0.4$  kPa,根据模型架体尺寸(跨距 $l_a$ 、步距 $h$ 分别为1500 mm),取C类地面粗糙类别进行计算,得到脚手架所处高度不同时的风荷载标准值(见表1)。

表1 不同高度处脚手架所受风荷载标准值

Table 1 Wind load standard value at different height of scaffold

脚手架所处高度/m	风荷载标准值/kPa
50	1.52
100	2.01
150	2.33
200	2.56
250	2.75
300	2.91
350	3.04
400	3.16
450	3.27
500	3.30

## 2 有限元模型建立

### 2.1 连墙件同时与内外立杆连接有限元模型建立

连墙件采用工程中常用的两步两跨布置且均设置在主节点处。钢管规格选用 $\phi 48 \times 3$  mm,步距和跨距取1.5 m,建筑结构距内、外立杆间距分别取400 mm、1200 mm,弹性模量 $E=2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比 $\mu=0.3$ 。脚手架内外立杆与悬挑工字钢的连接视为铰接,连墙件与主体结构的连接视为刚性连接。为了使扣件处节点的受力更符合实际情况,在模拟的过程中引入弹簧单元 combin14 来模拟扣件的连接,杆件与杆件之间通过扣件

连接的转动刚度,按照《建筑施工临时支撑结构技术规范》(JGJ300—2013)的规定取转动刚度  $S = 35 \text{ (kN} \cdot \text{m) / rad}$ . 钢管脚手架连墙件的具体布置图如图3所示,连墙件的具体布置立面图如图4所示,图中符号“×”代表连墙件的布置位置,数字代表节点位置号,有限元分析模型如图5所示. 取整个架体中间部分立杆段节点位置进行分析(见图4虚线部分).

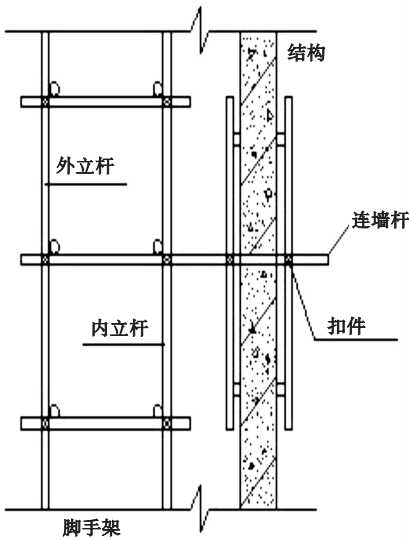
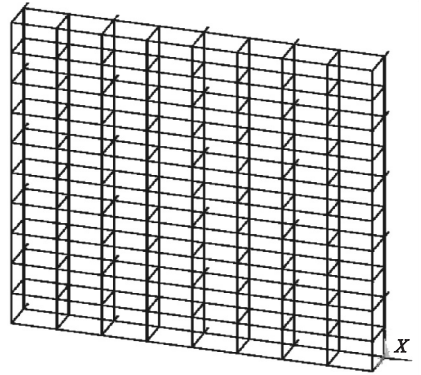
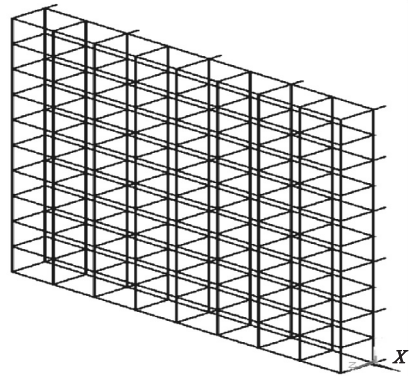


图3 钢管脚手架

Fig. 3 The tie member connecting with the insider upright tube



(a)正视图Normal view



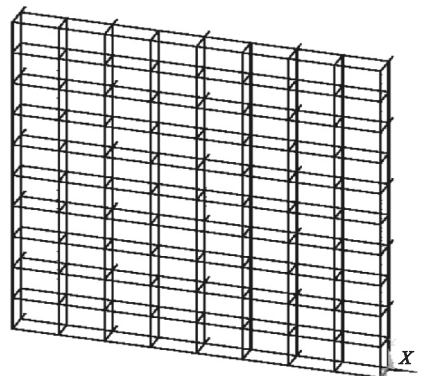
(b)侧视图Side view

图5 有限元分析模型

Fig. 5 Finite element model

### 2.2 连墙件只与内力杆相连有限元模型建立

有限元模拟分析过程与连墙件同时与内外力杆相连有限元分析(位于主节点)主节点的模拟思想基本相同,只是去掉与外立杆连接杆部分. 有限元模型如图6所示.



(a)正视图Normal view

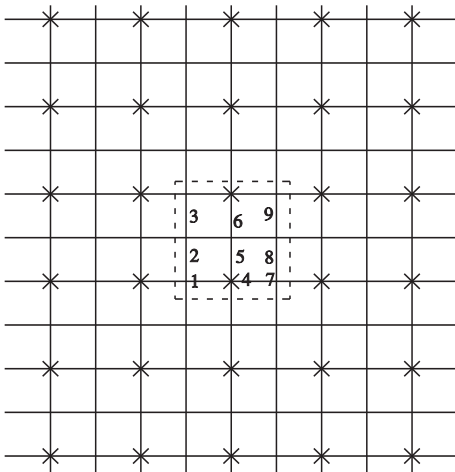
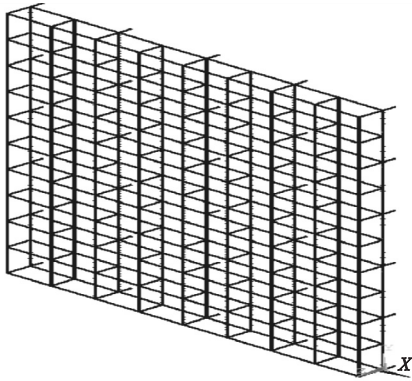


图4 连墙件布置立面图

Fig. 4 Elevation of tie member arrangements



(b)侧视图Side view

图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model

### 3 模拟结果与分析

#### 3.1 连墙件同时与内外立杆连接有限元结果

通过施加脚手架所处不同高度处的等效风载标准值,将其转化为线载荷施加在架体外排杆件上,取连墙件布置为两步两跨进行水平风载荷作用下架体分析,从有限元数据中提取架体中间部分(见图 4 虚线部分),得到脚手架在不同高度处立杆节点弯矩标准值(见表 2),规定架体立杆迎风侧受拉其相应变矩值为正,反之则为负。

表 2 节点位置处立杆弯矩标准值

Table 2 Bending moment standard value of node 1 to node 3

脚手架所处高度/m	立杆弯矩/ $10^5$ (N·mm)					
	位置 1		位置 2		位置 3	
	外立杆	内立杆	外立杆	内立杆	外立杆	内立杆
50	3.36	1.80	-0.26	-1.81	3.34	1.78
100	4.76	2.70	-0.67	-2.73	4.73	2.67
150	5.67	3.29	-0.93	-3.31	5.65	3.26
200	6.34	3.72	-1.12	-3.74	6.30	3.70
250	6.88	4.07	-1.27	-4.10	6.86	4.05
300	7.33	4.36	-1.40	-4.38	7.31	4.33
350	7.71	4.60	-1.52	-4.63	7.68	4.57
400	8.05	4.82	-1.62	-4.85	8.02	4.80
450	8.36	5.02	-1.70	-5.04	8.33	5.00
500	8.45	5.08	-1.74	-5.11	8.42	5.06

#### 3.2 连墙件只与内力杆相连有限元结果

从有限元模型的相关数据中提取了距离位于主节点,但只与内力杆相连位置连墙件

节点弯矩值进行分析,得到风荷载作用下脚手架所处不同高度时,不同连墙件位置的立杆主要节点弯矩值,结果见表 3。

表 3 不同节点位置处立杆弯矩标准值

Table 3 Bending moment standard value of node 1 to node 3

脚手架所处高度/m	立杆弯矩/ $10^5$ (N·mm)					
	位置 1		位置 2		位置 3	
	外立杆	内立杆	外立杆	内立杆	外立杆	内立杆
50	6.12	2.46	-0.65	-2.76	5.43	2.43
100	8.44	3.69	-1.28	-4.16	7.89	3.64
150	11.52	4.56	-2.34	-5.05	10.12	4.71
200	13.4	5.09	-2.41	-5.71	12.56	5.63
250	13.4	5.59	-2.57	-6.26	13.4	6.66
300	13.4	6.12	-2.71	6.66	13.4	7.59
350	13.4	6.78	-2.89	-7.11	13.4	8.63
400	13.4	7.45	-2.99	-7.59	13.4	9.13
450	13.4	8.11	-3.18	-8.23	13.4	9.63
500	13.4	8.67	-3.31	-8.51	13.4	10.12



### 3.3 有限元结果分析

应用 originpro 绘图及数据分析软件,根据以上有限元分析结果,取不同节点位置分别作出连墙件位于主节点、位于主节点只和内立杆相连,内外立杆之间弯矩标准变化曲线进行对比分析,结果见图7~图12.

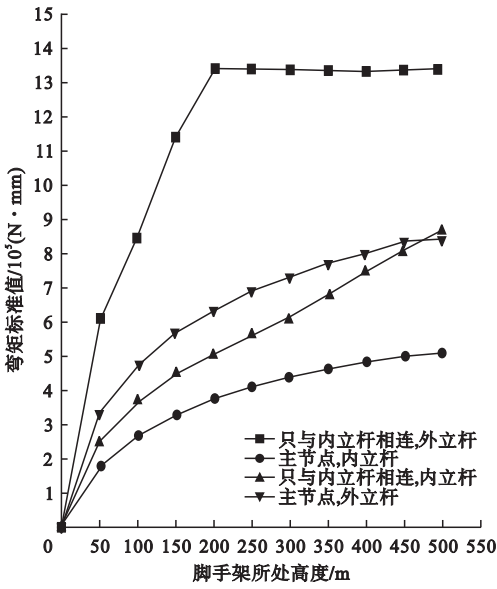


图7 节点位置1弯矩值变化曲线

Fig.7 Change of bending moment in node 1

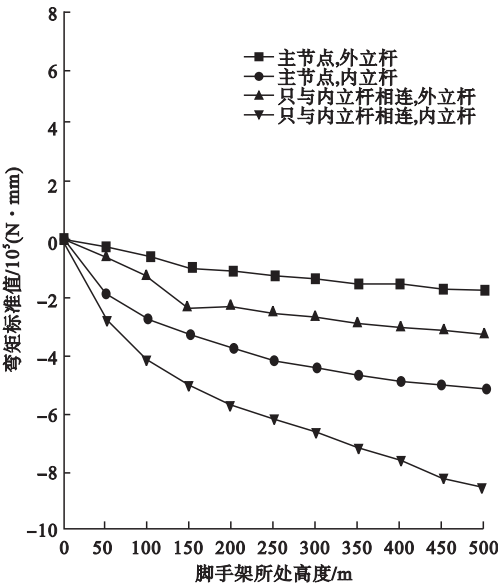


图8 节点位置2弯矩值变化曲线

Fig.8 Change of bending moment in node 2

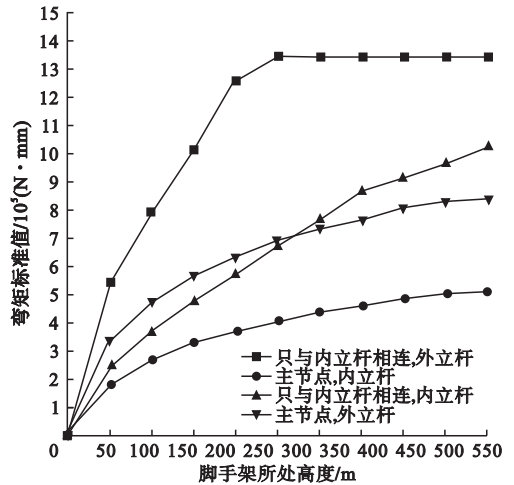


图9 节点位置3弯矩值变化曲线

Fig.9 Change of bending moment in node3

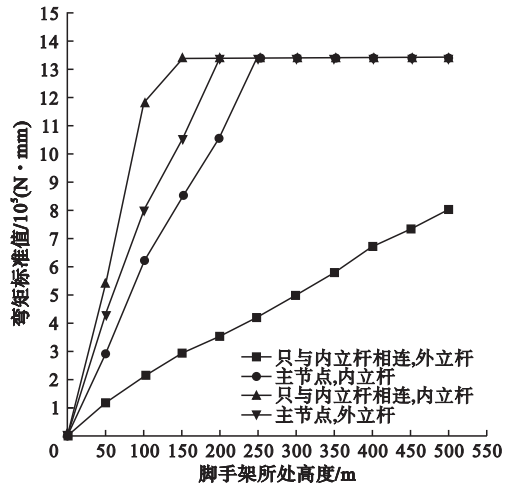


图10 节点位置4弯矩值变化曲线

Fig.10 Change of bending moment in node4

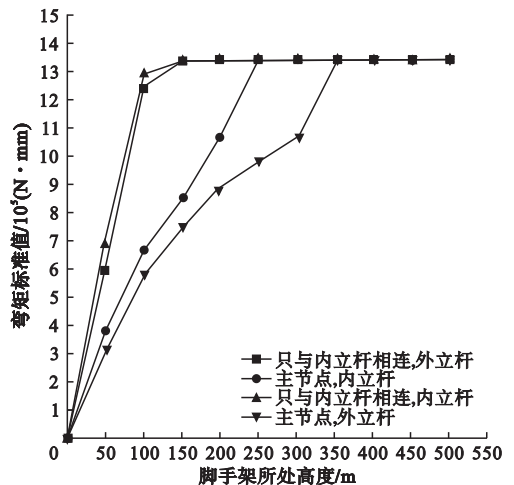


图11 节点位置5弯矩值变化曲线

Fig.11 Change of bending moment in node5

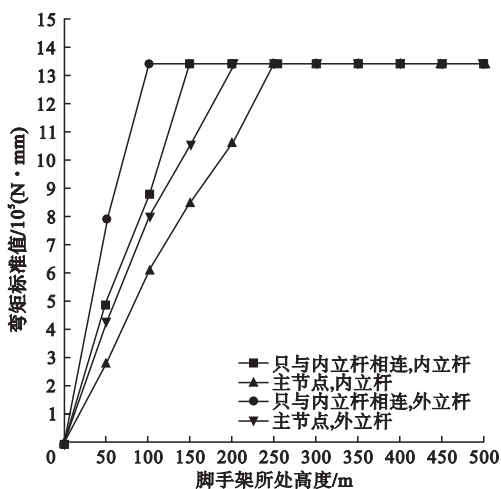


图12 节点位置6弯矩值变化曲线

Fig. 12 Change of bending moment in node6

通过对表2、表3和图中曲线对比分析可以得出:

(1)图7为位置1立杆弯矩变化曲线,当位置4处连墙件只与内立杆相连时,位置1外立杆弯矩最大值要大于连墙件与内外立杆同时连接时位置1内、外立杆最大弯矩值.图8为位置2立杆弯矩变化曲线,当位置4处连墙件只与内立杆相连时,位置2内立杆弯矩最大值要大于连墙件与内外立杆同时连接时节点2立杆最大弯矩值.图9为位置3立杆弯矩变化曲线,当位置4处连墙件只与内立杆相连时,位置3外立杆弯矩最大值要大于其他连墙件与内外立杆同时连接时位置3内、外立杆最大弯矩值.

(2)图10为位置4立杆弯矩变化曲线,将图中两种工况曲线对比得出,位置4处连墙件同时与内、外立杆相连时,受风面外立杆弯矩最大值大于内立杆弯矩最大值,但位置4处连墙件只与内立杆相连时外立杆弯矩最大值有所降低,内立杆最大弯矩值上升明显,内立杆最大弯矩大于外立杆弯矩最大值并大于位置4与内、外立杆同时连接时位置4内、外立杆最大弯矩值.

(3)图11为位置5立杆弯矩变化曲线,将图中两种工况曲线对比得出,位置4处连墙件只与内立杆连接时,没有连墙件的位置

5内外立杆明显增大.相对于图10中位置6弯矩最大值变化小.

(4)图12为位置6立杆弯矩变化曲线,可以看出,当位置4处连墙件只与内立杆连接时,位置6处外立杆弯矩最大值明显大于内立杆,并大于位置4处连墙件与内外立杆同时连接时位置6处立杆弯矩最大值.

(5)根据图10、图11、图12分析可知,当脚手架所处高度大于150m时,由于钢材应力接近弹性极限,会出现内力重分布.处于使用中的脚手架设计应调整连墙件布置及步距和跨距,使材料处于弹性工作状态.

(6)综合考虑,当脚手架节点4处连墙件只与内立杆连接时对脚手架使用更为不利,位置6处外立杆弯矩值增加  $3.7 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ,接近一倍.位置5外立杆在100m时最大弯矩从  $5.8 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{mm}$  增大到  $12.4 \times 10^5 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ,增大了一倍多.

## 4 结论

(1)当连墙件只与内立杆连接时,该位置处的外立杆弯矩值有所下降,但该位置区连墙件只与内立杆连接处立杆弯矩明显增大,且为架体立杆最大弯矩.与此同时,其他各节点位置架体内、外立杆弯矩最大值均有所增加.

(2)脚手架在连墙件只与内立杆相连时,立杆弯矩最大值可增大一倍.数值分析证明合理的连墙件设计应保证连墙件与内外立杆同时相连.

## 参考文献

- [1] 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 of maximum bending moment of upright tube wind load of construction scaffold of super high-rise building[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016,32(4):651-657.)
- [2] 张培信.建筑结构风荷载[M].上海:上海

- 科学技术出版社,2013.  
(ZHANG Peixin. Wind loads on building and structures [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press,2013.)
- [3] 刘景国. 脚手架连墙件施工方法探讨[J]. 河北建筑工程学院学报,2013,31(1):57-59.  
(LIU Jingguo. The discussion of scaffolding tie members construction[J]. Journal of Hebei institute of architecture and civil engineering, 2013,31(1):57-59.)
- [4] 赵滇生,田兴长,章雪峰,等. 扣件式钢管模板高支撑架整体稳定分析[J]. 浙江工业大学学报,2007,35(1):78-81.  
(ZHAO Diansheng, TIAN Xingchang, ZHANG Xuefeng, et al. Global stability analysis of high formwork supporting frame with fastener-style steel pipe system[J]. Journal of Zhejiang university of technology, 2007,35(1):78-81.)
- [5] 郭正兴,陈亚平,朱忠益. 爬升式脚手架的工程应用技术[J]. 建筑技术,1994(8):2-8.  
(GUO Zhengxing, CHEN Yaping, ZHU Zhongyi. Engineering application of climbing scaffolding[J]. Construction technology, 1994, (8):2-8.)
- [6] 卓新,郑念中. 对扣件式钢管脚手架规范部分内容的商榷[J]. 施工技术,2005,34(3):78-79,84.  
(ZHUO Xin, ZHENG Nianzhong. Discussion on the part of the Steel tubular scaffold with couplers specification [J]. Construction technology, 2005,34(3):78-79,84.)
- [7] 陈小俊. 新型外脚手架连墙件的开发应用[J]. 建筑技术,2011,42(8):714-717.  
(CHEN Xiaojun. Development and application of new wall fasteners of external scaffold [J]. Architecture technology, 2011,42(8):714-717.)
- [8] 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:中国工业出版社,2011.  
(The Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Safety technical specification of construction fastener type steel pipe scaffold: JGJ130—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.)
- [9] HADIPRIONO F C, WANG H K. Analysis of causes of formwork failures in concrete structures[J]. Journal of construction engineering & management, 1986,112(1):112-121.
- [10] POULOS H G. A practical design approach for piles with negative friction [J]. Geotechnical engineering issue GEI, 2008,161(1):19-27.
- [11] LENG J S, ASUNDI A. NDE of smart structures using multimode fiber optic vibration sensor[J]. NDT & E international, 2002,35(1):45-51.
- [12] WEESNER L B, JONES H L. Experimental and analytical capacity of frame scaffolding [J]. Engineering structures, 2001,23(6):592-599.
- [13] 刘宗仁,涂新华,丁永胜. 扣件式钢管脚手架临界力下限计算方法[J]. 建筑技术,2001,3(8):541-543.  
(LIU Zongren, TU Xinhua, DING Yongsheng. Steel tubular scaffold with couplers critical force lower limit method [J]. Architecture technology, 2001,3(8):541-543.)
- [14] 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,2005,3(3):82-89.  
(AO Hongfei, LUO Xinglong. A general calculation method for the ultimate bearing capacity of integral stability of two-wall scaffolding [J]. Construction technology, 2005,3(3):82-89.)
- [15] PENG J L, PAN A D, ROSOWSKY D V, et al. High clearance scaffold systems during construction-I. Structural modelling and modes of failure[J]. Engineering structures, 1996,18(3):247-257.
- [16] PENG J L, PAN A D, ROSOWSKY D V, et al. High clearance scaffold systems during construction-II. Structural analysis and development of design guidelines [J]. Engineering structures, 1996,18(3):258-267.
- [17] 傅宇,刘宇宏. 悬挑脚手架型钢挑梁极限应力测试及 ANSYS 分析比较研究[J]. 施工技术,2016(增刊1):732-735.  
(FU Yu, LIU Yuhong. Comparative study on the limit stress test and ANSYS analysis of hanging scaffold steel beam [J]. Construction technology, 2016(S1):732-735.)
- [18] 蔡明金,毛祥华,章伟,等. 双排脚手架施工技术研究[J]. 四川建材,2017,12:146-174.  
(CAI Mingjin, MAO Xianghua, ZHANG Wei, et al. Research on construction technology of double pole scaffold [J]. Sichuan building materials, 2017,12:146-174.)
- [19] 覃明. 脚手架连墙件设置的探究[J]. 安全, 2018(3):39-42.  
(QIN Ming. Research on tie member of scaffold [J]. Safety, 2018(3):39-42.)