

# 偏心荷载作用下扣件式钢管满堂支承体系承载性能研究

陆征然<sup>1,2</sup>, 郭超<sup>\*3</sup>, 温永钦<sup>1</sup>, 陈志华<sup>4</sup>, 刘彤<sup>2</sup>, 曹硕<sup>2</sup>

1. 吉林建筑大学 土木工程学院, 吉林 长春 130118;
2. 沈阳建筑大学 管理学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
4. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 如何准确地对扣件式钢管满堂支承体系的稳定承载力进行计算是亟待解决的一个技术难题. 现有的各种满堂支承体系承载力计算方法中, 均没有考虑由于扣件的偏心连接而导致水平杆与立杆不在同一平面内的情况以及满堂脚手架通过水平杆将上部荷载偏心传递给立杆的影响(以上两种偏心情况统称为偏心荷载). 在分析满堂支承体系结构特点的基础上, 提出了考虑偏心荷载作用下的满堂支承体系数值计算模型. 通过对大量不同搭设参数下的满堂支承体系分别进行是否考虑偏心荷载影响的非线性有限元模型分析及2个满堂脚手架的原型试验, 证实了偏心荷载这一因素对扣件式钢管满堂支承体系承载性能的影响. 所提出的计算模型合理、安全, 可为今后满堂支撑架及满堂脚手架的设计提供有价值的参考.

**关键词:** 满堂支撑架; 满堂脚手架; 扣件; 偏心荷载; 承载性能; 有限元分析

**中图分类号:** TU731.2      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7511/dllgxb201601004

## 0 引言

我国建筑事业的蓬勃发展, 特别是大跨度结构的大规模建设, 使得在施工过程中满堂支承体系搭设的跨度大、高度高, 承受较大的上部荷载, 如交通建设中的各种大跨度连续梁桥、城市高架桥的混凝土墩台、箱梁、大跨度空间结构的施工等. 这些工程项目的顺利进行, 对于满堂支承体系的设计和施工都提出了很高的要求. 然而, 一方面, 作为临时结构物, 它的重要性往往被人忽视; 另一方面, 由于对此体系的构造因素及荷载作用形式与承载性能之间的关系尚缺乏详细的了解, 导致了近些年来满堂支承体系倒塌事故频发<sup>[1-5]</sup>.

满堂支承体系是在纵、横方向, 均由不少于3排立杆与水平杆、水平剪刀撑、竖向剪刀撑通过扣件连接而构成的承力体系. 按照立杆受力形式的不同, 满堂支承体系可分为满堂支撑架和满堂脚手架, 两者立杆的受力方式参考文献[6-8].

扣件式钢管满堂支承体系的纵、横向水平杆与立杆均通过直角扣件连接, 水平杆与立杆的轴线不在同一平面内, 两者之间存在一定的偏心距. 此外, 按照搭设要求, 主节点连接处的不同方向杆件之间仍然需要保持一定的距离, 这也使得上部荷载在向下传递的过程中存在偏心情况. 满堂脚手架中的荷载首先施加在水平杆上, 再通过扣件的连接传递给立杆, 与满堂支撑架顶部荷载通过上部可调顶托传递给立杆相比, 其荷载的施加方式上同样存在偏心情况<sup>[9-10]</sup>. 本文将以上列举的几种偏心情况统称为偏心荷载, 这种偏心荷载很可能是导致立杆失稳进而引发整体支承系统倒塌的原因之一. 然而, 在过去的研究和计算理论中往往忽视这一因素, 而且在我国国家规范中尚未有任何相关的规定<sup>[11]</sup>.

本文在文献[12]的直角扣件半刚性试验以及文献[13-14]的13个满堂支撑架原型试验的基础上, 考虑扣件的偏心连接以及满堂脚手架中荷载

收稿日期: 2015-05-25; 修回日期: 2015-09-17.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51308255); 辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划资助项目(LJQ2014059); 沈阳建筑大学青年基金资助项目; 沈阳建筑大学学科培育计划资助项目(XKH Y-62).

作者简介: 陆征然(1982-), 女, 博士, 副教授, E-mail: luzhengranglovel@126.com; 郭超\*(1980-), 男, 博士, 副教授, E-mail: guochaoglovel@126.com.

的偏心施加,对工程中常用的大量不同搭设参数下的满堂支撑体系进行考虑初始缺陷的非线性有限元分析,并进行2个不同搭设参数下的满堂脚手架原型试验,深入地研究此类结构体系在偏心荷载作用下的承载性能。

## 1 计算参数选取

在有限元计算中,钢管外径取48 mm,壁厚3.5 mm,按照文献[12]中所进行的钢管材料性能试验,钢材的弹性模量 $2.06 \times 10^5$  MPa,屈服强度235 MPa,极限强度374 MPa,密度 $7.8 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>,泊松比0.3,采用弹簧单元 combin14 模拟扣件的半刚性性质,弹簧刚度的取值参考文献[12]中对于直角扣件刚度性质的研究成果。

首先,对满堂脚手架整体模型进行特征值屈曲分析,然后,将从特征值屈曲分析中所得第一阶失稳形态按照一定比例作为初始缺陷加入模型中,并赋予材料非线性性质,进行下一步的非线性屈曲分析,所添加的初始缺陷数值符合《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2011)中对满堂脚手架搭设中允许偏差的规定数值。此外,由于满堂脚手架的纵、横向水平杆与立杆之间利用直角扣件连接,其轴线不在同一水平面上,力的传递存在偏心,取偏心距为53 mm。同时,在纵、横向水平杆与立杆相交处的主节点,按照规范的搭设要求,两个不同方向上水平杆件之间的垂直距离取为150 mm。

## 2 偏心荷载作用下满堂脚手架承载性能的有限元分析

### 2.1 扣件偏心的影响分析

#### (1) 不考虑扣件偏心影响

采用 beam188 三维梁单元模拟满堂脚手架中的所有杆件,该单元基于 Timoshenko 梁结构理论,并能考虑剪切变形的影响。在直角扣件连接处以及纵、横向水平杆与立杆相交的主节点处,不考虑由于直角扣件的连接所导致的各杆件间的偏心影响,采用以下方式建立计算模型:在空间中的同一坐标位置建立3个节点,分别用  $N_{vi}$ 、 $N_{hi}$ 、 $N_{li}$  表示,如图1所示,其中, $N_{vi}$ 是立杆中的单元节点(设立杆延伸方向为  $z$  轴方向), $N_{hi}$ 、 $N_{li}$  分别为横、纵向水平杆中的单元节点(设横向水平杆延伸方向为  $x$  轴方向,纵向水平杆延伸方向为  $y$  轴方向)。对3个节点在所有方向上的平动自由度以及

绕立杆的转动自由度采用耦合约束,在由直角扣件连接的两根杆件能够产生相对扭转的平面内,两节点之间通过加入弹簧单元 combin14 以模拟直角扣件提供有限转动约束的半刚性性质。根据在文献[13]所进行的原型试验过程中观察到的现象,立杆顶部的边界条件可以视为自由,底部视为铰接。

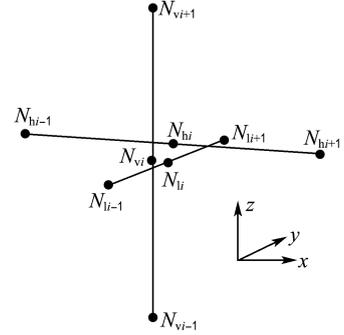


图1 不考虑扣件偏心时有限元分析中节点建立  
Fig. 1 Establishment of nodes in FEA without consideration of coupler eccentricity

对于满堂脚手架顶部荷载的施加方式,考虑偏心的影响:在满堂脚手架顶部形心处建立一个关键点,作为主控节点,在顶层水平杆上欲施加荷载的区域内(在实际工程中为通过搭设脚手板使之受荷的区域)的各节点与主控节点之间通过增设刚度较大的 beam188 梁单元进行连接,这样,施加在主控节点上的荷载就能传递到顶层水平杆上,通过这种方式,实现了满堂脚手架中荷载的偏心施加。采用上述方法,建立的有限元模型如图2所示。

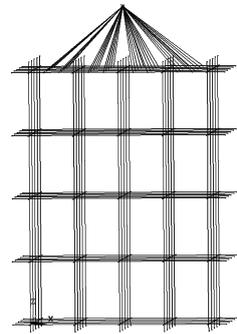


图2 不考虑扣件偏心时满堂脚手架的有限元模型  
Fig. 2 FE model of full hall formwork scaffold without consideration of coupler eccentricity

从之前对设置了剪刀撑的满堂支撑架的研究成果中可以发现,剪刀撑的设置对搭设参数不同的满堂支撑架承载性能的影响程度有所不同,为了

使得偏心荷载对此体系承载性能的影响单独显现出来,这里仅对不同搭设参数下的无剪刀撑扣件式

钢管满堂脚手架进行了非线性有限元分析,其单根立杆的稳定承载力计算结果  $P_{FEA1}$  如表 1 所示.

表 1 不同搭设参数下满堂脚手架的承载力

Tab. 1 Bearing capacity of full hall formwork scaffold in different geometric parameters

编号	步距 $h/m$	立杆间距 $S_1 \times S_2/$ (m×m)	高宽比	考虑荷载偏心时		$d/\%$
				不考虑扣件偏心 $P_{FEA1}/kN$	考虑扣件偏心 $P_{FEA2}/kN$	
1	1.8	1.5×1.5	1.8	11.05	10.11	-8.51
2	1.8	1.2×1.2	1.6	11.24	10.39	-7.56
3	1.8	1.0×1.0	1.6	12.86	10.51	-18.27
4	1.8	0.9×0.9	1.5	13.43	10.57	-21.30
5	1.5	1.2×1.2	1.6	13.35	11.49	-13.93
6	1.5	1.0×1.0	1.6	13.22	12.29	-7.03
7	1.5	0.9×0.9	1.5	15.01	14.02	-6.60
8	1.2	1.2×1.2	1.6	14.72	14.46	-1.77
9	1.2	1.0×1.0	1.6	15.73	14.61	-7.12
10	1.2	0.9×0.9	1.5	17.11	16.39	-4.21
11	0.9	1.2×1.2	1.6	15.03	14.88	-1.00
12	0.9	1.0×1.0	1.6	18.11	16.89	-6.74
13	0.9	0.9×0.9	1.5	18.14	17.87	-1.49

注: 1)  $P_{FEA1}$ 、 $P_{FEA2}$  均为单根立杆的稳定承载力; 2)  $d = \frac{P_{FEA2} - P_{FEA1}}{P_{FEA1}} \times 100\%$

## (2) 考虑扣件偏心影响时

依然采用 beam188 三维梁单元模拟满堂脚手架中的所有杆件. 考虑到在直角扣件连接处, 立杆及纵、横向水平杆不在一个平面内的真实情况, 采用以下方式建立计算模型: 在空间某一位置上, 沿  $z$  轴方向(立杆延伸方向)依次建立两个节点, 分别用  $N_{vhi}$  和  $N_{vli}$  表示, 如图 3 所示, 两节点间距离为 150 mm,  $N_{vhi}$ 、 $N_{vli}$  均为立杆中的单元节点. 沿  $y$  轴方向(纵向水平杆的延伸方向)将节点  $N_{vhi}$  偏移 53 mm, 建立横向水平杆上的单元节点  $N_{hi}$ , 沿  $x$  轴方向(横向水平杆的延伸方向)将节点  $N_{vli}$  偏移 53 mm, 建立纵向水平杆上的单元节点  $N_{li}$ . 为了描述直角扣件的半刚性特征, 在横向水平杆单元节点  $N_{hi}$  与立杆单元节点  $N_{vhi}$  之间, 加入一个绕  $y$  轴扭转的弹簧单元 combin14 约束两节点的相对扭转, 其他方向上的自由度均采用耦合约束.

同理, 在纵向水平杆单元节点  $N_{li}$  与立杆单元节点  $N_{vli}$  之间, 加入一个绕  $x$  轴扭转的弹簧单元 combin14 约束两节点的相对扭转, 其他方向上的自由度也均采用耦合约束, 边界条件及荷载偏心施加的模拟方式与不考虑扣件偏心时相同. 采用上述方法建立的有限元模型如图 4 所示.

对不同搭设参数下的无剪刀撑扣件式钢管满堂脚手架进行了考虑初始缺陷的非线性有限元分析,

单根立杆的稳定承载力计算结果  $P_{FEA2}$  如表 1 所示.

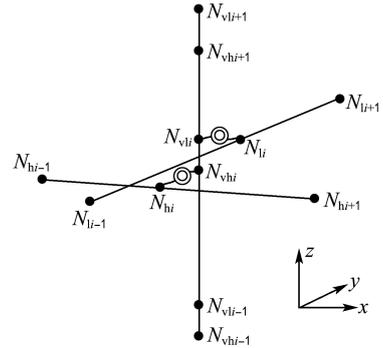


图 3 考虑扣件偏心时有限元分析中节点建立  
Fig. 3 Establishment of nodes in FEA with consideration of coupler eccentricity

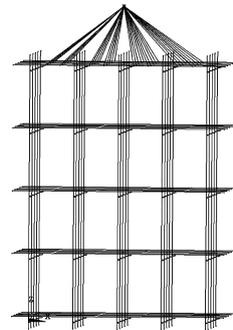
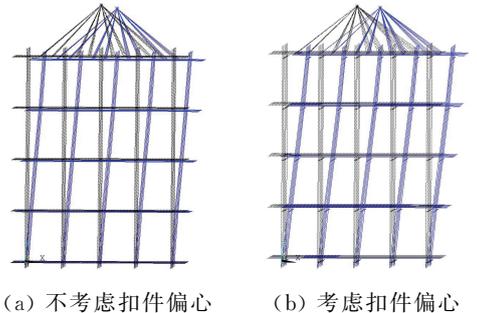


图 4 考虑扣件偏心时满堂脚手架的有限元模型  
Fig. 4 FE model of full hall formwork scaffold with consideration of coupler eccentricity

从表 1 中可以看出,在满堂脚手架上部荷载施加方式相同的情况下,考虑了直角扣件偏心影响计算所得的单根立杆的稳定承载力比不考虑直角扣件偏心影响时要低,说明在满堂脚手架的设计、计算中如果不考虑扣件偏心这一影响因素是不安全的.然而,两者之间的差值大小随着满堂脚手架的搭设参数的不同而发生变化(从表 1 列出的  $d$  数值中可以看出);当步距较大时(如表中步距为 1.8 m 时),考虑扣件偏心这一因素时,所得的承载力要比不考虑时低很多,说明扣件偏心这一因素对满堂脚手架承载力的不利影响在搭设步距较大时更加明显.因此,在今后的满堂脚手架的设计、计算中,应当考虑直角扣件偏心这一不利因素的影响,尤其是在搭设较大步距的脚手架时,应将此不利因素对承载力的影响予以更加充分的考虑,以保证在实际使用中满堂脚手架的安全、可靠.

按照表 1 中编号为 2 的脚手架搭设参数,采用不同计算模型得到的失稳模式分别如图 5(a)、(b)所示.从图中可以看出,没有设置剪刀撑的满堂脚手架失稳时,均发生整体大波鼓曲破坏.但是,从两张图的对比中可以发现,采用不同的模型建立方式,两者发生失稳破坏时的屈曲形状略有不同.由于在满堂脚手架中,上部荷载是通过顶部水平杆件向下传递的,使得立杆处于偏心受压的状态,在此基础上,再考虑扣件偏心影响(即通过扣件的连接向下层层传递荷载时依然存在偏心情况),使得两种偏心荷载的作用得到了叠加,当满堂脚手架失

稳时,从图 5(b)中可以看到,整根立杆从顶部至底部均发生较大的侧向变形,比没有考虑扣件偏心影响时立杆发生较大侧向变形的区域(如图 5(a)所示)更大、更广.因此,在实际工程中,应当重视对于满堂脚手架的剪刀撑采取从底部到顶部连续设置的构造要求,以保证满堂脚手架的整体安全.



(a) 不考虑扣件偏心 (b) 考虑扣件偏心  
图 5 采用不同计算模型得到的无剪刀撑满堂脚手架失稳模式

Fig. 5 Failure modes of the full hall formwork scaffold without bridgings received from different calculation models

### 2.2 荷载偏心的影响分析

对大量不同搭设参数下的满堂支撑体系,分别进行是否考虑荷载偏心以及扣件偏心两种情况下的承载性能分析.当不考虑荷载偏心时,在每根立杆顶部施加集中荷载(模拟满堂支撑架的受荷方式),单根立杆的稳定承载力计算结果  $P_{FEA3}$ 、 $P_{FEA4}$  如表 2 所示.

表 2 不同搭设参数下满堂支撑体系的承载力

Tab. 2 Bearing capacity of full hall formwork support system in different geometric parameters

编号	步距 $h/m$	立杆间距 $S_1 \times S_2/(m \times m)$	高宽比	考虑扣件偏心		不考虑扣件偏心		$d_1/\%$	$d_2/\%$
				不考虑荷载偏心	考虑荷载偏心	不考虑荷载偏心	考虑荷载偏心		
				$P_{FEA4}/kN$	$P_{FEA2}/kN$	$P_{FEA3}/kN$	$P_{FEA1}/kN$		
1	1.8	1.5×1.5	1.8	10.55	10.11	11.27	11.05	-4.17	-1.95
2	1.8	1.2×1.2	1.6	10.65	10.39	12.01	11.24	-2.44	-6.41
3	1.8	1.0×1.0	1.6	10.79	10.51	13.56	12.86	-2.59	-5.16
4	1.8	0.9×0.9	1.5	10.85	10.57	14.15	13.43	-2.58	-5.09
5	1.5	1.2×1.2	1.6	11.82	11.49	13.68	13.35	-2.79	-2.41
6	1.5	1.0×1.0	1.6	12.66	12.29	14.82	13.22	-2.92	-10.80
7	1.5	0.9×0.9	1.5	14.19	14.02	15.26	15.01	-1.20	-1.64
8	1.2	1.2×1.2	1.6	14.93	14.46	15.03	14.72	-3.15	-2.06
9	1.2	1.0×1.0	1.6	15.04	14.61	16.38	15.73	-2.86	-3.97
10	1.2	0.9×0.9	1.5	16.42	16.39	17.22	17.11	-0.18	-0.64
11	0.9	1.2×1.2	1.6	15.48	14.88	15.58	15.03	-3.88	-3.53
12	0.9	1.0×1.0	1.6	17.41	16.89	18.28	18.11	-2.99	-0.93
13	0.9	0.9×0.9	1.5	18.37	17.87	18.65	18.14	-2.72	-2.73

注:1)  $P_{FEA3}$ 、 $P_{FEA4}$  为单根立杆的稳定承载力;2)  $d_1 = \frac{P_{FEA2} - P_{FEA4}}{P_{FEA4}} \times 100\%$ ,  $d_2 = \frac{P_{FEA1} - P_{FEA3}}{P_{FEA3}} \times 100\%$

从表2中可以看出, 无论是否考虑扣件偏心, 当将上部荷载偏心地施加在满堂支承体系顶部水平杆上时(满堂脚手架的受荷方式), 计算所得单根立杆的稳定承载力都比将上部荷载直接施加在满堂支承体系立杆顶端(满堂支撑架的受荷方式)要低. 这充分说明了满堂支撑架与满堂脚手架两种结构体系的承载性能具有显著差异: 满堂脚手架由于上部荷载首先作用在水平杆上, 进而通过直角扣件的连接传递到立杆上, 荷载向下存在偏心传递的情况, 从而导致了其承载能力比在满堂支撑架上上部荷载直接通过可调顶托传递给立杆的情况要低. 因而, 在实际工程中, 即使搭设参数完全一样, 由于受力方式存在不同, 如果直接将满堂支撑架的设计及计算方法应用于满堂脚手架中, 忽略荷载偏心这一影响因素, 也是不安全的.

### 3 偏心荷载作用下满堂脚手架承载性能的试验研究

参照表1、2中的满堂脚手架编号及搭设参

数, 选取编号为1和5的两个脚手架, 按照其搭设参数进行了原型试验(见图6、7). 试验中采用两组高度超过10 m的反力架, 利用8个液压千斤顶, 通过两道分配梁, 将千斤顶施加的集中荷载均匀地传递到满堂脚手架的顶层水平杆上. 2个满堂脚手架的搭设参数及相应的试验结果如表3所示.

从表3中可以看出, 采用4种不同的满堂脚手架有限元模型建立方式, 计算所得的结果与原型试验结果相比, 相差最多、承载力计算结果最不安全的就是不考虑偏心荷载的模型建立方式, 而采用同时考虑两种偏心荷载作用的模型建立方式, 其计算结果最偏于安全. 充分说明了考虑偏心荷载作用的重要性. 试验过程中2个足尺模型失稳时情况如图8所示. 从图8中能够看出, 当模型发生整体失稳时, 无剪刀撑满堂脚手架出现沿刚度较弱方向的整体大波鼓曲现象, 与如图5所示的有限元计算所得的失稳模式一致, 证明了有限元计算过程的正确性.

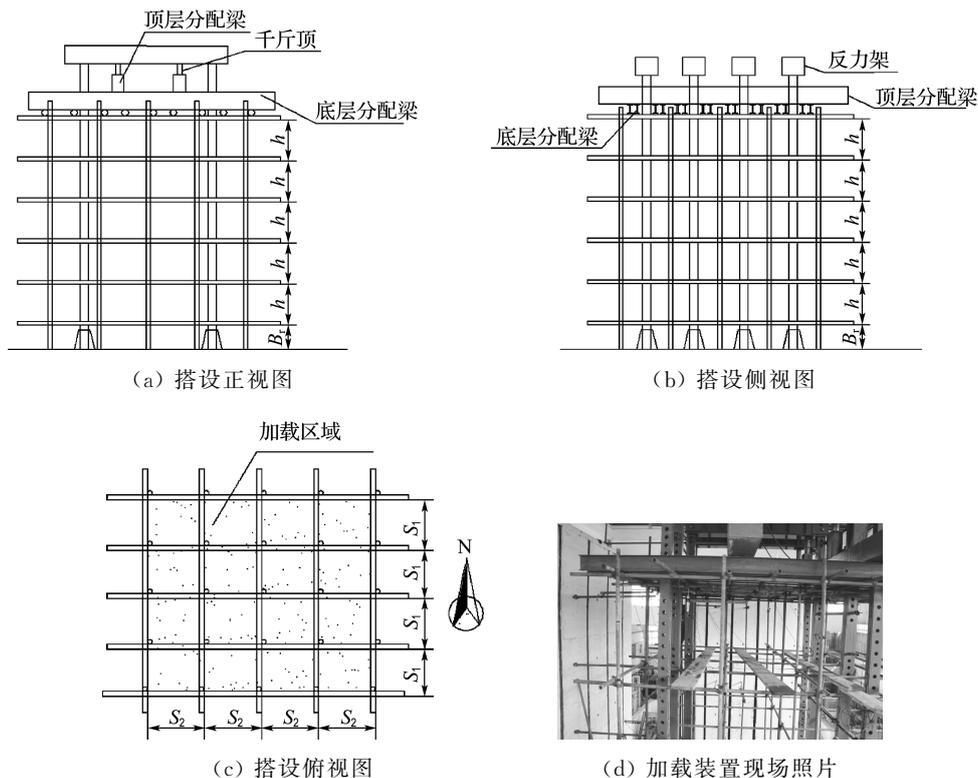


图6 编号1的满堂脚手架搭设示意图及现场照片

Fig. 6 General layout and photo of No. 1 full hall formwork scaffold

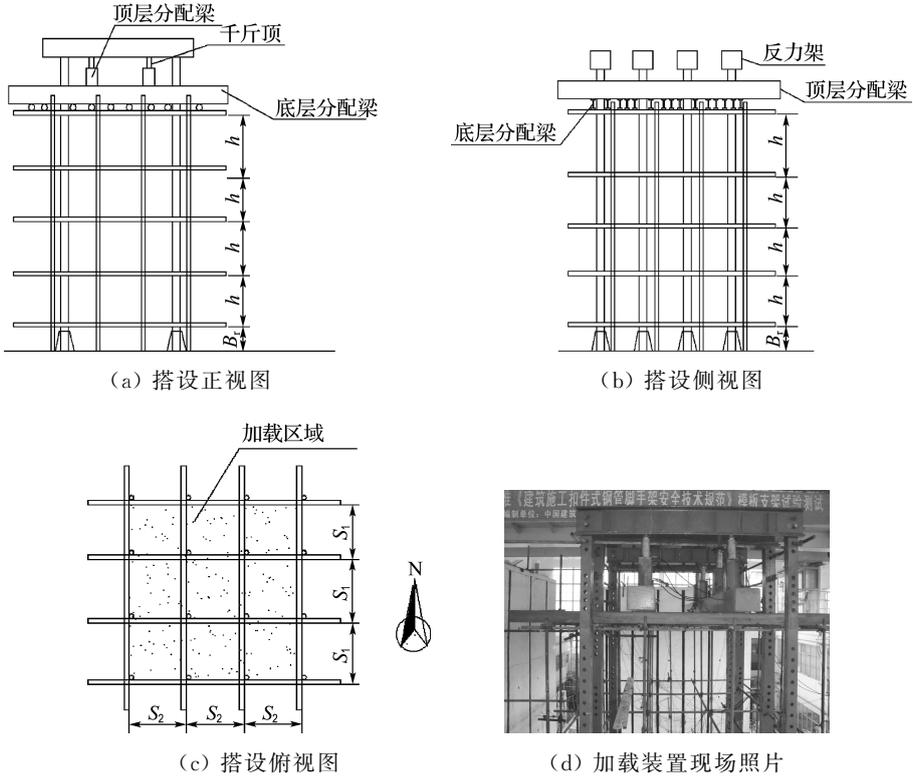


图 7 编号 5 的满堂脚手架搭设示意图及现场照片

Fig. 7 General layout and photo of No. 5 full hall formwork scaffold

表 3 满堂脚手架原型搭设参数及试验结果

Tab. 3 Geometric parameters and test results for the full hall formwork scaffold

编号	步距 $h/m$	立杆间距 $S_1 \times S_2 / (m \times m)$	高宽比	架高 $H/m$	扫地杆 $B_r/m$	加载区 跨 $\times$ 跨	试验承载力 $P_{test}/kN$	$e_1/\%$	$e_2/\%$	$e_3/\%$	$e_4/\%$
1	1.8	1.5 $\times$ 1.5	1.8	8.00	0.4	3 $\times$ 3	9.40	17.55	7.55	19.89	12.23
5	1.5	1.2 $\times$ 1.2	1.6	8.00	0.3	4 $\times$ 4	12.22	9.25	-5.97	11.95	-3.27

注： $e_1 = \frac{P_{FEA1} - P_{test}}{P_{test}} \times 100\%$ ,  $e_2 = \frac{P_{FEA2} - P_{test}}{P_{test}} \times 100\%$ ,  $e_3 = \frac{P_{FEA3} - P_{test}}{P_{test}} \times 100\%$ ,  $e_4 = \frac{P_{FEA4} - P_{test}}{P_{test}} \times 100\%$



(a) 编号 1 (b) 编号 5

图 8 满堂脚手架原型试验失稳照片

Fig. 8 Failure pictures of full hall formwork scaffold in prototype tests

## 4 结 论

(1) 在满堂支架体系中,纵、横向水平杆与立杆均通过直角扣件连接,各根杆件的轴线不在同一平面内,荷载在向下层层传递的过程中存在偏心.此外,与满堂支撑架不同的是,满堂脚手架中的荷载首先作用在顶层水平杆上,再通过扣件的连接进而将荷载传递给立杆,其荷载的施加方式也存在偏心.在满堂脚手架的设计和计算中应当考虑以上两种偏心因素(统称为偏心荷载)对整体结构承载性能的影响.

(2) 对大量不同搭设参数下的扣件式钢管满堂脚手架分别进行了是否考虑直角扣件偏心影响

的两种不同情况下的非线性有限元分析. 从计算结果中可以看出, 在采用相同的上部荷载施加方式的前提下, 考虑直角扣件的偏心影响时, 计算所得的单根立杆的稳定承载力比不考虑直角扣件偏心影响时要低. 并且, 当脚手架的搭设步距较大时, 这一不利因素对结构整体承载力的影响更为明显.

(3)对大量不同搭设参数下的扣件式钢管满堂脚手架分别进行了考虑上部荷载偏心施加与否的两种不同情况下的非线性有限元分析. 从计算结果中可以看出, 考虑上部荷载偏心时, 计算所得单根立杆的稳定承载力比不考虑上部荷载偏心时要低, 说明了满堂支撑架和满堂脚手架两种结构体系的受力方式存在差异, 忽略上部荷载偏心而将满堂支撑架的计算和设计方法直接应用于满堂脚手架中是不安全的.

(4)参考满堂脚手架的有限元模型搭设参数, 进行了其中两个满堂脚手架的原型试验, 将有限元和试验结果进行对比, 两者吻合较好, 同时还发现, 考虑满堂脚手架中偏心荷载作用时的有限元计算结果是最偏于安全的, 充分说明了考虑偏心荷载作用的重要性, 并且, 有限元计算所得的满堂脚手架失稳形态与原型试验结果相符, 均产生沿刚度较弱方向的整体大波鼓曲现象.

## 参考文献:

- [1] 陈安英, 郭正兴. 扣件式钢管高大支模架坍塌事故分析[J]. 建筑技术, 2008, **39**(12):936-938.  
CHEN An-ying, GUO Zheng-xing. Analysis on collapse accident of high and large fastener steel pipe formwork support [J]. **Architecture Technology**, 2008, **39**(12):936-938. (in Chinese)
- [2] 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 Hong-bo, CHEN Zhi-hua, WANG Xiao-dun, *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. (in Chinese)
- [3] 刘建民, 李慧民. 扣件式钢管模板支撑架计算模型回顾与思考[J]. 建筑技术, 2005, **36**(11):860-862.  
LIU Jian-min, LI Hui-min. Review and meditation on calculation model of fastener-type steel pipe scaffolding [J]. **Architecture Technology**, 2005, **36**(11):860-862. (in Chinese)
- [4] LIU Hong-bo, ZHAO Qiu-hong, WANG Xiao-dun, *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.
- [5] LIU Hong-bo, CHEN Zhi-hua, WANG Xiao-dun, *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.
- [6] 袁雪霞, 金伟良, 鲁征, 等. 扣件式钢管支模架稳定承载能力研究[J]. 土木工程学报, 2006, **39**(5):43-50.  
YUAN Xue-xia, JIN Wei-liang, LU Zheng, *et al.* A study on the stability bearing capacity of fastener-style tubular steel formwork-supports [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, **39**(5):43-50. (in Chinese)
- [7] 刘建民, 李慧民. 构造因素对扣件式钢管模板支架稳定承载力的影响[J]. 四川建筑科学研究, 2007, **33**(1):16-18.  
LIU Jian-min, LI Hui-min. The influence of fastener-style steel pipe falsework's configurations on bearing capacity [J]. **Sichuan Building Science**, 2007, **33**(1):16-18. (in Chinese)
- [8] 谢楠, 王勇. 超高模板支架的极限承载能力研究[J]. 工程力学, 2008, **25**(增刊 I):148-153.  
XIE Nan, WANG Yong. Study on load-carrying capacity of super high supports for formwork [J]. **Engineering Mechanics**, 2008, **25**(sup1):148-153. (in Chinese)
- [9] 熊耀莹, 谢宇岫, 周金根. 关于模板扣件钢管支撑系统诱发荷载讨论[J]. 建筑施工, 2004, **26**(1):56-57.  
XIONG Yao-ying, XIE Yu-xiu, ZHOU Jin-gen. Discussion on induced load of formwork with fastener-style steel-pipe support system [J]. **Building Construction**, 2004, **26**(1):56-57. (in Chinese)
- [10] 曾凡奎, 刘学兵, 胡长明, 等. 高大模板支架承受的两种特殊荷载分析[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2007, **24**(4):308-309.  
ZENG Fan-kui, LIU Xue-bing, HU Chang-ming, *et al.* Analysis of two kinds of special loads that high-formwork supports system [J]. **Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)**, 2007, **24**(4):308-309. (in Chinese)

- [11] 中国建筑科学研究院. JGJ 130—2011 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.  
China Academy of Building Research. JGJ 130-2011 Technical code for safety of steel tubular scaffold with couplers in construction [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [12] 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 Zhi-hua, LU Zheng-ran, WANG Xiao-dun. Numerical analysis and experimental study of the stiffness of right angle couplers in tubular steel scaffolds [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2010, **43**(9):100-108. (in Chinese)
- [13] 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 Zheng-ran, CHEN Zhi-hua, WANG Xiao-dun, *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. (in Chinese)
- [14] 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.  
LU Zheng-ran, CHEN Zhi-hua, WANG Xiao-dun, *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. (in Chinese)

## Study of bearing capacity of fastener steel tubular full hall formwork support system under eccentric load

LU Zheng-ran<sup>1,2</sup>, GUO Chao<sup>\*3</sup>, WEN Yong-qin<sup>1</sup>,  
CHEN Zhi-hua<sup>1</sup>, LIU Tong<sup>2</sup>, CAO Shuo<sup>2</sup>

( 1. School of Civil Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China;

2. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

3. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

4. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China )

**Abstract:** How to accurately calculate the bearing capacity of fastener steel tubular full hall formwork support system is currently an urgent technical problem to be solved. The existing calculation methods didn't consider the situation that upright tube and horizontal tube were not in the same plane induced by eccentric connection of coupler, and the effect of eccentric transfer of upper load from horizontal tubes to upright tubes (The above two eccentric situations are totally named eccentric load). A series of numerical calculation models with consideration of eccentric load for full hall formwork support system are put forward based on the analysis of its structure features. Through the analysis of non-linear finite element models for full hall formwork support system in different geometric parameters with and without consideration of eccentric load and two full hall formwork scaffold prototype tests, the effect of eccentric load on the bearing capacity of fastener steel tubular full hall formwork support system is verified. The proposed calculation models are rational and safe, which can offer valuable reference for design of full hall formwork support and full hall formwork scaffold.

**Key words:** full hall formwork support; full hall formwork scaffold; coupler; eccentric load; bearing capacity; finite element analysis