

扭剪作用下钢管支架直角扣件受力性能试验分析研究

何夕平¹, 朱 坤¹, 陈 燕¹, 常东明¹, 梁 义²

(1. 安徽建筑大学土木工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 中国十七冶集团有限公司, 安徽 马鞍山 243001)

摘要: 通过构造 6 组直角扣件连接节点试件, 进行了连接节点同时承受扭转力和滑移力的试验. 试验结果表明: 扣件紧固力矩越大, 扣件连接节点的初始抗扭刚度越大; 不同紧固力矩的扣件连接节点, 在较小的扭剪作用下, 其初始扭转刚度变化不大, 当试件受扭剪作用逐渐增大时, 紧固力矩大的直角扣件抵抗变形的能力增强. 通过统计回归分析, 得出直角扣件连接节点初始扭转刚度与紧固力矩的关系, 以及扭转力矩与杆件转角关系. 调整了钢管支架连接节点考虑扭剪效应时无侧移和有侧移架体立杆的计算长度系数, 并与纯扭效应下的计算值进行了对比分析, 得出扭剪同时作用下更不利于钢管支撑架体的稳定.

关键词: 扭剪作用; 抗扭刚度; 紧固力矩; 计算长度系数

中图分类号: TU731.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)01-0047-05

Analysis and research of testing about right-angle fastener of steel pipe support on the mechanics properties under torsional force and shear force

HE Xiping¹, ZHU Kun¹, CHEN Yan¹, CHANG Dongming¹, LIANG Yi²

(1. School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2. China MCC17 Group CO., LTD., Maanshan 243000, China)

Abstract: By constructing six test-pieces of right-angle fastener, a test with torsional force and slip force was carried out. The test results show the greater fastener tightening torque produce, the greater joint initial anti-torsional rigidity. When the torsional force and slip-shear force are smaller, the joint initial anti-torsional rigidity is almost equal for different fastener tightening torque. But the increasing of torsional force and slip-shear force, the right-angle fastener is stronger to resist deformation along with a bigger fastener tightening torque. Through statistical analysis of the test data, this paper obtains the formula between initial torsional rigidity of the right-angle fastener and fastener tightening torque and between torsional torque and member corner. This paper considers the joint torsional-shear effect, and adjusts the formula to calculated the length coefficient of scaffolding vertical rod about lateral displacement or not, and compares the length coefficient of scaffolding vertical rod with only considering the joint torsional effect. It will not be good for stability on steel pipe support under torsional force and shear force at the same time.

Key words: torsional-shear effect; anti-torsional rigidity; tightening torque; calculated length coefficient

扣件式钢管支架广泛应用于房屋建筑、桥梁隧道等领域的施工措施中, 是工程施工中最为常用的施工措施, 也是工程安全事故经常发生的地方. 在扣件式钢管支架系统中, 架体构造原理相对简单, 其受荷时发挥作用的关键在于纵、横向钢管和立杆交点处连接扣件的工作性能表现, 因此, 通过研究总结出连接节点处真实的工作性能是保证架体安全使用的重要前提^[1-2].

目前, 国内施行的有关扣件式钢管支架体规范中, 对于架体连接节点的力学性能规定了连接节点的直角扣件必须保证抗滑移、抗扭转和抵抗强度破坏的性能, 但在进行架体承载力的计算时只考虑按照连接节点力学特征把架体计算模型分为铰接和刚接两种体系^[3]. 然而, 架体在实际使用中的变形特征表明架体连接节点实际上并非是一种完全刚性的连接节点, 架体连接的节点变形特征应当为

半刚性时更为合适, 半刚性节点的受力变形介于刚性和铰接之间. 事实上, 架体连接节点处的扣件受力是比较复杂的, 它受到施工荷载的影响, 使立杆、水平杆之间产生相对角位移, 使直角扣件和立杆之间产生剪切滑移变形. 目前, 国内对钢管支架体连接节点的受力性能研究主要是对连接扣件抗滑移和抗扭转分别进行研究^[4-5], 而对扭转力和滑移剪切力(扣件与钢管之间的竖向摩擦力)共同作用的直角扣件连接节点力学性能的研究却很少见. 但是架体在使用过程中其连接节点不仅受到扭转力, 还受到相邻杆件传递至连接节点的滑移剪切力, 因此, 扭剪共同作用下连接节点的力学表现更能描述其力学性能. 根据相关文献, 扣件式钢管支架体中扣件连接节点的扭转力矩-转角呈非线性关系, 其非线性关系随受力状况有所差异, 但其力学规律表现基本一致^[6]. 为了分析直角扣件连接节点在扭剪共

同作用下的半刚性变形特征,文中通过试验结果进行统计分析,得出扭剪共同作用下节点受力与变形之间关系的力学表述和钢管支撑架体立杆的计算长度系数。

1 扣件式钢管支撑架直角扣件受力性能试验方案

1.1 试件设计和制作

根据有关文献,直角扣件连接节点的扭转刚度呈半刚性变形的特点,并提出了多种扭转刚度随时间变化的非线性力学模型。为了进一步探索这种连接节点受到扭剪共同作用时的力学特性,设计了架体直角扣件连接节点试验方案,考虑到施工现场各直角扣件的紧固力矩受到多种施工因素的影响会有所差距,设计了不同的紧固力矩以反映架体连接节点的多种受力情况。

试验所使用的试件主要由钢管和直角扣件构成,为真实反映直角扣件连接节点的实际受力情况,试验共制作6组十字形直角扣件连接节点试件。试验所用钢管分为横向钢管和竖向钢管,均从施工现场随机抽取,经测量所采用的钢管外径为48 mm,壁厚为3.3 mm,其中横管长1.6 m,竖管长1.5 m。直角扣件材料为铸铁,钢管材料为Q235碳素结构钢。

1.2 加载装置和制度

按照扭剪共同作用的原则设计了直角扣件式钢管支撑架体连接节点的室内试验装置,试验装置如图1所示。试验仪器选用油压千斤顶、位移计、压力传感器、扭矩扳手、游标卡尺和试验机等。试验时竖向钢管两端用试验机夹持钳将其固定,在试验机上安放前对其位置进行精确校正。横向钢管两端采用液压千斤顶进行不平衡加载,所加荷载值的大小由压力传感器进行控制。

加载方式按照将直角扣件试件的拧紧力矩分别拧至20 N·m、25 N·m、30 N·m、35 N·m、40 N·m和45 N·m时,在不同的紧固力矩下,测得直角扣件与钢管之间的抗滑移和抗扭转程度。试验方案设计为在距扣件中心0.8 m处的横向钢管加载点1处施加分级集中荷载 P_1 , P_1 分级荷载从300~3 100 N共分15级,每级递增200 N,在加载点2处施加分级集中荷载 P_2 ,使直角扣件和钢管之间产生滑移力, P_2 分级荷载从300~1 700 N共分15级,每级递增100 N,通过加载点1和2的集中力差值逐渐增大实现扭转力的逐步施加,直角扣件受到的滑移力

等于加载点1和2的集中力之和,即:滑移力 $P=P_1+P_2$ 。加载过程中通过压力传感器控制荷载的施加,试验加载如图2所示。

试验加载制度分为预加载、正式加载、卸载三个阶段进行。

(1) 预加载阶段:检测各装置及量测仪表是否正常工作,使各部分紧密接触进入工作状态。本试验预加载为 P_1, P_2 对称施加300 N,检查并调试加载装置和测试仪器的工作情况。

(2) 正式加载:正式加载按上述等级加载,每级加载后每5 min测读1次数据,在仪器仪表连续读3次数值保持稳定后再加下一级荷载。

(3) 试验出现下列情形之一即表明试件破坏或已产生滑移,立即停止加载并进行卸载。

①连续测得5次异常跳动的不稳定数据;②钢管明显弯曲失稳;③听到扣件爆裂的声音。



图1 扣件式钢管支撑架连接节点试验装置

Fig.1 The test device for scaffold supports system joints

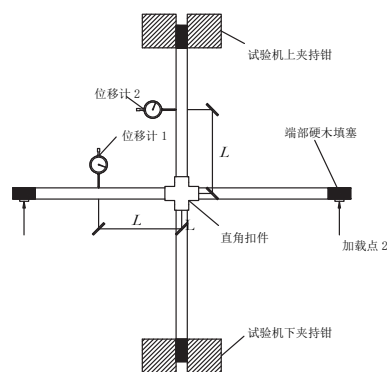


图2 试验装置布置图

Fig.2 The test device layout

1.3 测试内容和仪器布置

试验主要测试直角扣件在不等的竖向荷载作用下抗滑移和抗扭转的性能,在横向钢管和竖向钢管上距离扣件中心 L 处分别设置一个位移观测点,考虑到了直角扣件周边产生的刚性影响区域,为使

位移测量更趋于实际, L 值不应大于 400 mm, 在上述不平衡荷载作用下, 对扣件节点的扭矩 $M=(P_1-P_2)\times 0.8\text{ N}\cdot\text{m}$, 如图 2 所示。

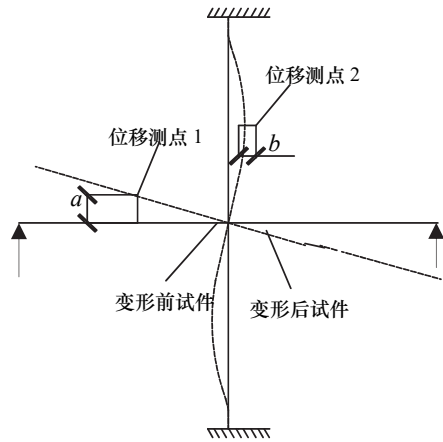


图 3 连接节点变形示意图

Fig.3 Deformation characteristics of joints

通过位移计测量这两点的位移值 a 、 b ，按照几何公式 $\theta = \arctan(a-b)/L$ 计算出位移测点 1、2 两点的相对转角，如图 3 所示。

2 扭剪共同作用下直角扣件试验结果分析

2.1 直角扣件连接节点的扭剪试验结果

通过直角扣件连接节点扭剪受力性能的试验, 经过整理, 得出表 1、表 2 所示的扣件紧固力矩为 20 N·m、25 N·m、30 N·m、35 N·m、40 N·m 和 45 N·m 时直角扣件连接节点的滑移力、扭转力矩以及通过上述几何公式得出的扭转角度值。

表 1 直角扣件连接节点在扭剪受力状态下试验结果统计

Tab.1 The statistics of torsional-shear effect test results about the joint

紧固力矩 20 N·m			紧固力矩 25 N·m			紧固力矩 30 N·m		
滑移力 P/kN	扭转力矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	扭转角 θ/rad	滑移力 P/kN	扭转力矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	扭转角 θ/rad	滑移力 P/kN	扭转力矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	扭转角 θ/rad
0.6	0	0	0.6	0	0	0.6	0	0
0.9	0.08	0.004 7	0.9	0.08	0.004 3	0.9	0.08	0.003 8
1.2	0.16	0.009 3	1.2	0.16	0.008 3	1.2	0.16	0.007 6
1.5	0.24	0.014 1	1.5	0.24	0.012 8	1.5	0.24	0.011 1
1.8	0.32	0.019 7	1.8	0.32	0.016 9	1.8	0.32	0.015 1
2.1	0.40	0.024 7	2.1	0.40	0.022 0	2.1	0.40	0.019 4
2.4	0.48	0.029 1	2.4	0.48	0.026 2	2.4	0.48	0.022 6
2.7	0.56	0.035 2	2.7	0.56	0.030 9	2.7	0.56	0.027 2
3.0	0.64	0.043 9	3.0	0.64	0.038 7	3.0	0.64	0.033 6
3.3	0.72	0.051 9	3.3	0.72	0.047 5	3.3	0.72	0.043 2
3.6	0.80	0.064 4	3.6	0.80	0.059 2	3.6	0.80	0.054 5
3.9	0.88	0.084 1	3.9	0.88	0.075 4	3.9	0.88	0.067 6
4.2	0.96	0.106 9	4.2	0.96	0.095 4	4.2	0.96	0.086 3
4.5	1.04	0.137 05	4.5	1.04	0.118 8	4.5	1.04	0.106 7
4.8	1.12	0.166 55	4.8	1.12	0.143 6	4.8	1.12	0.133 7

注: 表中滑移力 $P = P_1 + P_2$; 表中扭转力矩 $M = (P_1 - P_2) \times 0.8$ 。

表 2 直角扣件连接节点在扭剪受力状态下试验结果统计

Tab.2 The statistics of torsional-shear effect test results about the joint

紧固力矩 35N·m			紧固力矩 40N·m			紧固力矩 45N·m		
滑移力 P/kN	扭转力矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	扭转角 θ/rad	滑移力 P/kN	扭转力矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	扭转角 θ/rad	滑移力 P/kN	扭转力矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	扭转角 θ/rad
0.6	0	0	0.6	0	0	0.6	0	0
0.9	0.08	0.003 05	0.9	0.08	0.003 55	0.9	0.08	0.002 35
1.2	0.16	0.007 2	1.2	0.16	0.006 05	1.2	0.16	0.004 7
1.5	0.24	0.010 1	1.5	0.24	0.009 75	1.5	0.24	0.007 95
1.8	0.32	0.014 15	1.8	0.32	0.013 65	1.8	0.32	0.010 9
2.1	0.40	0.018 05	2.1	0.40	0.016 2	2.1	0.40	0.013 15
2.4	0.48	0.020 6	2.4	0.48	0.018 6	2.4	0.48	0.016 55
2.7	0.56	0.024 55	2.7	0.56	0.021 2	2.7	0.56	0.019 45
3.0	0.64	0.028 1	3.0	0.64	0.025 6	3.0	0.64	0.022 35
3.3	0.72	0.037 25	3.3	0.72	0.030 65	3.3	0.72	0.027 35
3.6	0.80	0.048 65	3.6	0.80	0.042 05	3.6	0.80	0.035 6
3.9	0.88	0.062 05	3.9	0.88	0.054 6	3.9	0.88	0.045 1
4.2	0.96	0.074 65	4.2	0.96	0.066 15	4.2	0.96	0.055 2
4.5	1.04	0.093 1	4.5	1.04	0.080 6	4.5	1.04	0.065 85
4.8	1.12	0.115 7	4.8	1.12	0.102 05	4.8	1.12	0.081 9

注: 表中滑移力 $P = P_1 + P_2$; 表中扭转力矩 $M = (P_1 - P_2) \times 0.8$ 。

2.2 扭剪共同作用下直角扣件连接节点的扭转力矩-转角关系

对表1、表2中的直角扣件扭剪试验数据进行整理,得出在不同紧固力矩下直角扣件连接节点的扭转力矩-转角关系曲线图如图4所示。

从图4中可以看出, $M-\theta$ 有以下几点规律:

(1) 在一定的紧固力矩下, 直角扣件的转角随着扭转力矩的变大而逐渐增大, 变化趋势较为平缓, 这表明直角扣件在发生扭剪破坏之前的受力性能比较稳定。

(2) 在不同的紧固力矩下, 直角扣件的紧固力矩越大其连接节点的初始抗扭刚度变化不大, 在0.4 KN·m 扭转力矩前, 具有一定的线性规律, 在达到0.4 KN·m 扭转力矩后具有明显的非线性性, 同时在达到扭剪极限受力状态之前, 直角扣件的抗扭刚度随着扭转力矩的增加而增大。

结合 $M-\theta$ 变化规律, 通过 MATLAB 的拟合工具构造两参数对数函数对试验数据进行拟合分析, 发现采用式(1)非线性模型对直角扣件扭剪力学试验数据的拟合效果最为显著。

$$M(\theta) = n \ln(1 + K\theta) \quad (1)$$

式中: K 为初始抗扭刚度, n 为曲线拟合形状参数。

运用这个非线性模型, 对紧固力矩在 20~45 N·m 范围内直角扣件连接节点分析, 得到不同紧固力矩作用下的初始抗扭刚度值 K , 如表3所示。

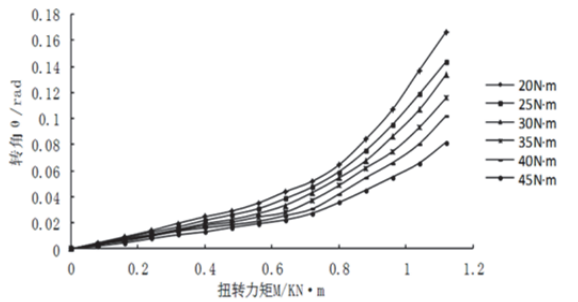


图4 直角扣件扭转力矩-转角关系曲线

Fig.4 The curve of $M-\theta$

表3 不同紧固力矩下连接节点的 $M-\theta$ 关系拟合参数值

Tab.3 The $M-\theta$ curve fitting value of joints carried different fastener tightening torque

拟合参数	直角扣件紧固力矩/40N·m ⁻¹					
	20N·m	25N·m	30N·m	35N·m	40N·m	45N·m
n	1.158	1.189	1.145	1.188	1.23	1.293
K	53.73	57.55	68.87	72.3	76.52	83.3

对表3在不同紧固力矩下直角扣件的初始抗扭刚度与紧固力矩的回归分析,得出直角扣件连接节点初始扭转刚度与紧固力矩的关系式(2)。

$$K = 1.19T + 30.04 \quad (2)$$

式中: T 为直角扣件的紧固力矩, K 为初始扭转刚度。

2.3 直角扣件连接节点在扭转和扭剪分别作用下钢管支撑架立杆的计算长度系数

考虑钢管支撑架体连接节点在扭转、扭剪作用下的半刚性特征, 对钢结构规范中有侧移和无侧移框架柱的计算长度系数公式进行调整, 得出钢管支撑架体立杆的计算长度系数公式(3)和(4)^[7-8], 考虑架体有侧移和无侧移两种情况, 如图5所示, 计算直角扣件的紧固力矩为 40 N·m 时立杆的计算长度系数 μ 。

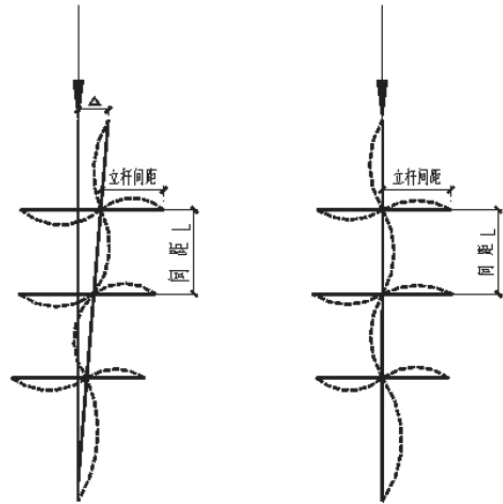


图5 有、无侧移钢管支撑架体的变形示意图

Fig.5 The deformation characteristics of scaffold supports system that is considered horizontal displacement or not

$$\mu_1 = \sqrt{\frac{7.5k_1k_2\left(\frac{1}{1+6EI/KL}\right)^2 + 4(k_1+k_2)\cdot\frac{1}{1+6EI/KL} + 1.52}{7.5k_1k_2\left(\frac{1}{1+6EI/KL}\right)^2 + (k_1+k_2)\cdot\frac{1}{1+6EI/KL}}} \quad (3)$$

$$\mu_2 = \frac{0.64k_1k_2\left(\frac{1}{1+2EI/KL}\right)^2 + 1.4(k_1+k_2)\cdot\frac{1}{1+2EI/KL} + 3}{1.28k_1k_2\left(\frac{1}{1+2EI/KL}\right)^2 + 2(k_1+k_2)\cdot\frac{1}{1+2EI/KL} + 3} \quad (4)$$

式中: μ_1 、 μ_2 分别为钢管支撑架体有侧移和无侧移计算临界荷载的欧拉公式中立杆计算长度系数; k_1 、 k_2 分别为连接于钢管支撑架立杆上、下端的水平杆线刚度之和与架体立杆线刚度之和的比值; K 为考虑半刚性特征的连接节点初始扭转刚度, 由公式(2)得出; L 为计算立杆的长度。

扣件式钢管支撑架体在搭设时设置的步距、立杆间距一般较为统一, 其 k_1 、 k_2 的值除顶部和底部外通常相等。利用文中通过试验总结出的扭剪作用下连接节点初始扭转刚度值, 考虑钢管支撑架体无侧移和有侧移两种情况, 计算出不同架体的立杆稳定计算长度系数, 并与已有的连接节点纯扭转作用时得出的计算长度系数进行比较, 结果见表4、表

5 所示. 对连接节点在扭转和扭剪两种受力状态下表 4、表 5 中立杆的计算长度系数进行对比分析, 发现直角扣件连接节点在承受扭剪作用时架体立杆的计算长度系数要比承受纯扭转作用时大. 表 4 中无侧移的钢管支撑架立杆, 扭剪共同作用下的计算长度系数要比纯扭转作用时大 0.39%~0.93%; 表 5 中有侧移的钢管支撑架立杆, 扭剪共同作用下的

计算长度系数要比纯扭转作用时大 2.22%~3.03%. 表明钢管支撑架考虑扭剪共同作用比仅考虑纯扭转作用下的临界承载力要小. 同时, 有侧移钢管支撑架立杆计算长度系数比无侧移钢管支撑架立杆计算长度系数, 在架体搭设相同条件下, 前者比后者大得多, 表明有侧移比无侧移临界承载力小得多.

表 4 无侧移钢管支撑架立杆的计算长度系数
Tab.4 The calculated length coefficient of scaffolding vertical rod without horizontal displacement

立杆计 算长度/m	钢管支撑架体搭设步距/m							
	0.8		1.0		1.2		1.4	
	扭转	扭剪	扭转	扭剪	扭转	扭剪	扭转	扭剪
0.8	0.844 7	0.850 3	0.819 9	0.825 9	0.798 4	0.804 7	0.779 6	0.786 1
1.0	0.858 5	0.863 1	0.834 8	0.839 8	0.814 0	0.819 4	0.795 7	0.803 1
1.2	0.870 0	0.873 9	0.847 4	0.851 7	0.827 4	0.832 0	0.809 6	0.814 4
1.4	0.879 7	0.883 1	0.858 2	0.862 0	0.839 0	0.843 0	0.821 7	0.826 0

表 5 有侧移钢管支撑架立杆的计算长度系数
Tab. 5 the calculated length coefficient of scaffolding vertical rod without horizontal displacement

立杆计 算长度/m	钢管支撑架体搭设步距/m							
	0.8		1.0		1.2		1.4	
	扭转	扭剪	扭转	扭剪	扭转	扭剪	扭转	扭剪
0.8	1.897 5	1.955 0	1.756 8	1.806 6	1.656 0	1.700 2	1.579 9	1.619 8
1.0	1.947 6	2.003 6	1.800 2	1.848 9	1.694 6	1.737 8	1.614 7	1.653 7
1.2	1.996 4	2.051 0	1.842 6	1.890 2	1.732 2	1.774 5	1.648 6	1.686 8
1.4	2.044 0	2.097 4	1.884 1	1.930 5	1.769 1	1.810 4	1.681 9	1.719 3

3 结论

通过对扣件式钢管支撑架直角扣件连接节点扭剪共同作用受力性能试验研究, 得到如下结论:

(1) 扭剪共同作用下直角扣件连接节点的初始抗扭刚度及扭剪变形受到直角扣件的紧固力矩、连接节点的扭转力矩和滑移力的影响. 提高扣件紧固力矩使直角扣件与钢管之间接触更为紧密, 可提高连接节点抗扭转刚度, 但当紧固力矩过大时这种效果并不显著, 滑移力增大会减弱扣件与钢管表面之间的接触效果, 导致其抗扭刚度降低.

(2) 对扭剪作用下连接节点的实验数据进行了回归分析, 得出了直角扣件连接节点初始扭转刚度与紧固力矩的 $K-T$ 关系式以及扭转力矩与杆件转角 $M-\theta$ 关系式, 调整了钢管支撑架体有侧移和无侧移立杆计算长度系数 μ .

(3) 钢管支撑架体连接节点受扭剪作用时的架体立杆失稳临界值要比纯扭转作用时小, 因此扭剪受力状态对钢管支撑架体的稳定更为不利; 钢管支撑架立杆有侧向变形的立杆长度计算系数比不考虑侧移时要大的多, 这种状态下架体更容易失稳破坏, 因此在钢管架体的搭设或使用中要尽可能避免导致其发生侧移现象的产生.

参考文献 References

[1] 闵玉忠, 何夕平, 陈东, 等. 渡江战役纪念馆施工监测方案的设计与优化[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2011,19(1): 33-36.
MIN Yuzhong, HE Xiping, CHEN Dong, et al. Design and optimization of the scheme of construction monitoring in Yangtze-crossing campaign memorial [J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry(Natural Science Edition), 2011,19(1):33-36.

[2] 何夕平, 张运帅, 程群, 等. 现浇混凝土结构层间模板支撑架体受力传递规律研究[J].工业建筑, 2014,44(1): 07-111.
HE Xiping, ZHANG Yunshuai, CHENG Qun, et al. Research on force transfer law of interlayer form supporting Frame for cast-in-situ concrete structure [J]. Industrial Construction, 2014, 44(1): 107-111.

[3] 钢管脚手架扣件: GB15831-2006 [S].北京:中国标准出版社, 2006.
Steel tube scaffold couplers: GB15831-2006 [S]. Beijing: China Standards Press,2006.

[4] 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,2009,43(9): 100-108.
CHEN Zhihua, LU Zhengran, WANG Xiaodun. Numerical analysis and experimental study of the stiffness of right angle couplers in tubular steel scaffolds [J]. China Civil Engineering Journal, 2009,43(9):100-108.

(下转第 57 页)