

# 考虑直角扣件失效的脚手架稳定性及 振动特性研究

黄春<sup>1</sup>,杨希温<sup>1</sup>,蔺宏远<sup>2</sup>,刘猛<sup>3</sup>

(1. 北京工业大学建筑工程学院,北京 100124;2. 山东省建筑设计研究院有限公司,  
山东 济南 250000;3. 中建三局集团有限公司,湖北 武汉 430064)

**摘要** 目的 研究直角扣件失效下双排脚手架稳定性及振动特性的变化规律,验证采用振动频率理论判断脚手架结构体系中直角扣件失效的合理性与可行性.方法 以6步3跨双排扣件式脚手架为对象,采用ANSYS有限元软件,分别考虑立杆方向和纵向水平杆方向直角扣件失效的工况,进行稳定承载力、振型和振动频率计算,建立各计算参数与直角扣件失效之间的关系.结果 在立杆或纵向水平杆方向的直角扣件失效数量增加时,脚手架稳定承载力呈现出不同程度的下降趋势,且脚手架的振型由整体横向振动转变为立杆或纵向水平杆的局部振动,导致其振动频率减小.结论 立杆方向直角扣件失效对脚手架稳定承载力下降的影响更大,且用振动频率理论判断脚手架直角扣件失效具有可行性.

**关键词** 双排扣件式脚手架;直角扣件失效;稳定承载力;振动特性

中图分类号 TU73

文献标志码 A

## Research on Stability Analysis and Vibration Characteristics of Scaffolding Considering Failure of Right-angle Couplers

HUANG Chun<sup>1</sup>, YANG Xiwen<sup>1</sup>, LIN Hongyuan<sup>2</sup>, LIU Meng<sup>3</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, China, 100124; 2. Shandong Provincial Architecture Design and Research Institute Co. Ltd., Ji'nan, China, 250000; 3. China Construction Third Engineering Bureau Co. Ltd., Wuhan, China, 430064)

**Abstract:** In order to prove the rationality and feasibility of using vibration frequency theory to judge the failure of right-angle couplers in the scaffolding structure system, the change law of stability and vibration characteristics of double-row scaffolding under the failure of right-angle coupler is studied. Taking six-step three-span double-row coupler scaffolding as an object, using ANSYS finite element software, the stable bearing capacity, vibration mode and vibration frequency are

收稿日期:2020-03-05

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51978017)

作者简介:黄春(1982—),男,博士,主要从事施工安全管理方面研究.

calculated under the failure conditions of the right-angle couplers in the vertical and longitudinal horizontal directions. And the relationship between the calculation parameters and the failure of the right-angle coupler is established. When the number of right-angle coupler failures in the direction of the vertical pole or the longitudinal horizontal rod increases, the stable bearing capacity of the scaffold shows a downward trend, and the mode shape of the scaffold changes from overall lateral vibration to local vibration of the vertical rod or longitudinal horizontal rod. As a result, its vibration frequency is reduced. The failure of the right-angle coupler in the vertical direction has a greater impact on the decline of the stable bearing capacity of the scaffold, and it is feasible to use the vibration frequency theory to judge the failure of the right-angle coupler of the scaffold.

**Key words:** double-pole fastening steel pipe scaffold; right angle coupler failure; stability bearing capacity; vibration characteristics

伴随我国基础建设发展的需求,扣件式脚手架作为保证施工正常运行的工作平台应运而生并发挥了重要的作用.近十几年来,由于大量现代化大型建筑结构的出现,各施工现场相继开始使用插销式脚手架、圆盘式脚手架、方塔式脚手架等新型脚手架,但扣件式脚手架因其维修方便、承载力大、投入成本低的优点,使用范围仍然较广阔.

在整个建筑施工期间,扣件式脚手架面临的施工环境较为复杂,导致其各类倒塌事故频繁发生<sup>[1-5]</sup>.针对扣件式脚手架的安全事故.秦桂娟等<sup>[6-7]</sup>利用 ANSYS 有限元软件分析连墙件的布置方式和设置缺陷对双排扣件式脚手架的影响,指出连墙件应优先采用两步两跨或两步三跨的布置方式,保证连墙件在施工期间同时与内外立杆相连接.陆征然等<sup>[8-10]</sup>对大量不同搭设参数的扣件式满堂支撑架和扣件式满堂脚手架进行了非线性有限元分析,对比分析两种满堂支撑体系的承载能力,并对满堂脚手架在偏心荷载作用下的承载性能做了进一步研究,证明较大的局部偏心荷载容易使满堂脚手架发生局部杆件失稳.贾莉等<sup>[11]</sup>建立了考虑直角扣件半刚性和杆件初始弯曲的扣件式满堂脚手架有限元模型,其结果与7组脚手架原型试验结果吻合较好,表明该有限元分析方法可以较准确预测满堂脚手架的稳定承载力和破坏形式.H. Liu 等<sup>[12-13]</sup>通过不考虑设置剪刀撑的

扣件式满堂支撑体系失稳试验,发现其主要破坏形式为沿弱轴发生屈曲失稳,并提出满堂脚手架顶层节点的连接方式对架体稳定性影响较大.

扣件式脚手架在正常使用过程中,受限于扣件质量、扣件拧紧状况以及扣件在多次使用过程中不可避免的锈蚀等因素影响,部分扣件可能会出现松脱、滑移、断裂的情况<sup>[14]</sup>,这将对脚手架的整体稳定性造成很大的不利影响,但以往的研究和分析往往忽略了这一因素.笔者以6步3跨双排扣件式脚手架为研究对象,分别进行了立杆方向和纵向水平杆方向直角扣件失效时的非线性屈曲分析,计算脚手架在各工况下的稳定承载力,研究“直角扣件失效”这一因素对双排扣件式脚手架整体稳定性的影响.在此基础上,深入研究立杆和纵向水平杆方向直角扣件失效数量对脚手架振动特性的影响,建立模态振型、振动频率和直角扣件之间的关系,并通过现场试验进行了验证,进而证明采用振动频率理论判断双排脚手架结构体系中直角扣件失效的合理性与可行性.

## 1 脚手架稳定性有限元分析

### 1.1 有限元模型建立

在 ANSYS 有限元分析中,定义脚手架钢管的材料为 Q235,外径为 48.3 mm,壁厚为 3.6 mm.根据双排扣件式脚手架的受力特

点,采用 Beam188 梁单元模拟横向水平杆、纵向水平杆以及立杆,采用 Link 180 单元模拟剪刀撑。

模型忽略立杆、水平杆和剪刀撑交点处的偏心,在空间同一坐标位置处建立立杆节点、纵向水平杆节点、横向水平杆节点和剪刀撑节点,并采用弹簧单元 Combin14 模拟直角扣件的半刚性特点。其中,弹簧刚度参考文献 [15-18] 中对其转动刚度进行的有限元数值模拟和试验研究结果,取值  $20 \text{ (kN}\cdot\text{m)/rad}$ 。假定脚手架立杆与地面的连接为铰接,且不考虑基础沉降。此外,根据施工作业中常用的外脚手架搭设规格,取双排脚手架的立杆横距  $L_1$  为  $1.3 \text{ m}$ ,立杆纵距  $L_2$  为  $1.5 \text{ m}$ ,立杆步  $h$  为  $1.5 \text{ m}$ ,底部扫地杆的高度  $b$  为  $0.2 \text{ m}$ 。

### 1.2 直角扣件失效影响分析

双排扣件式脚手架的搭设形式一般为纵向水平杆作为横向水平杆的支座,再用直角

扣件固定在立杆上。笔者研究直角扣件失效对双排脚手架整体稳定性的影响,分别对 6 步 3 跨脚手架无直角扣件失效和不同数量的直角扣件纵向水平杆与立杆连接的直角扣件(见图 1)失效的工况下进行非线性屈曲分析。立杆方向直角扣件失效的工况如图 1(a)所示,连接纵向水平杆与立杆的弹簧单元,将 I 号立杆的 ①~④号扣件依次删除,生成扣件失效数量分别为 1、2、3、4 的 4 种工况;在添加 ①~④号扣件的弹簧单元后按照相同顺序松开 ⑤~⑧号扣件,并计算此 6 步 3 跨脚手架分别在这 8 种工况下的稳定承载力。对于纵向水平杆方向直角扣件失效工况如图 1 所示(b),依次断开 II 号、IV 号、VI 号纵向水平杆的 ①~④、⑤~⑧、⑨~⑫号扣件,3 个杆件方向直角扣件从左向右依次失效为 1、2、3、4 个的 4 种情况,并计算脚手架在 12 种工况下的稳定承载力,计算结果如表 1 所示。

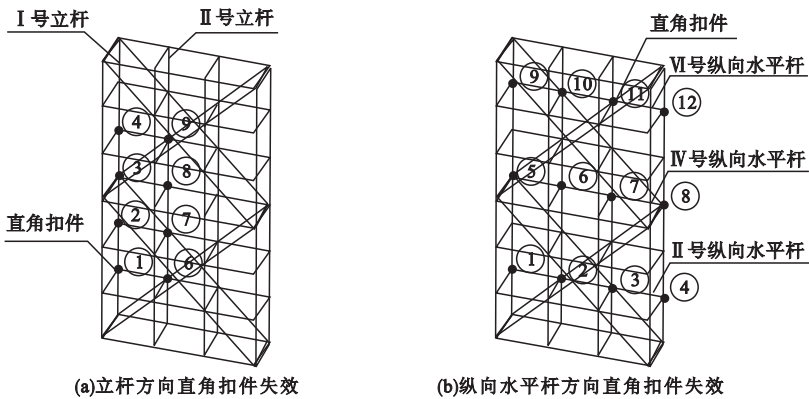


图 1 直角扣件失效

Fig. 1 The right-angle coupler failure

表 1 脚手架在不同直角扣件失效工况下的稳定承载力及下降幅度

Table 1 Stability bearing capacity and decline amplitude of six-step three-span scaffold under different failure conditions of right-angle couplers

直角扣件失效数量	I 号立杆		II 号立杆		II 号纵向水平杆		IV 号纵向水平杆		VI 号纵向水平杆	
	稳定承载力/kN	下降幅度/%	稳定承载力/kN	下降幅度/%	稳定承载力/kN	下降幅度/%	稳定承载力/kN	下降幅度/%	稳定承载力/kN	下降幅度/%
0	36.149	—	36.149	—	36.149	—	36.149	—	36.149	—
1	36.022	0.35	36.053	0.27	36.022	0.35	36.091	0.16	36.115	0.09
2	29.304	18.94	31.215	13.65	35.901	0.69	35.977	0.48	36.060	0.25
3	21.399	40.80	22.681	37.26	35.514	1.76	35.825	0.90	35.920	0.63
4	12.657	64.99	13.473	62.73	35.355	2.20	35.735	1.15	35.903	0.68

对比两立杆方向扣件失效的影响,从表1中6步3跨脚手架的稳定承载力可知,在①号扣件失效,即I号立杆方向直角扣件失效数量为1时,其稳定承载力从36.149 kN下降到36.022 kN,承载力下降0.35%,随着直角扣件失效数量的增加,承载力分别下降了18.94%、40.80%和64.99%。而在⑤号扣件失效,即II号立杆方向直角扣件失效数量为1时,其稳定承载力从36.149 kN下降到36.053 kN,承载力下降0.27%,随着直角扣件失效数量的增加,承载力分别下降了13.65%、37.26%和62.73%。经过对比可以发现,脚手架承载力的下降趋势随着直角扣件失效数量增加而逐步增大,而II号立杆方向直角扣件失效对脚手架稳定承载力的影响始终小于外侧的I号立杆。

对比3个纵向水平杆方向扣件失效的影响。由表1可知,在⑨~⑫号扣件依次失效时,脚手架稳定承载力分别下降了0.09%、0.25%、0.68%和0.63%,下降幅度始终小于①~④、⑤~⑧号依次扣件失效的情况,即VI号纵向水平杆方向直角扣件失效对脚手架稳定承载力影响较小。双排扣件式脚手架的稳定承载力对外侧立杆方向和底部纵向水平杆方向直角扣件失效的工况敏感性较高。

从表1还可知,脚手架稳定承载力在立杆方向直角扣件失效的下降幅度较明显。在I号和II号立杆方向直角扣件失效数量为4的工况下,脚手架稳定承载力为从36.149 kN降到12.657 kN和13.473 kN,分别下降了64.99%和62.73%。而当II号、IV号和VI号纵向水平杆方向的4个扣件全部失效时,稳定承载力只降低了2.20%、1.15%和0.63%,表明立杆方向直角扣件失效的工况对双排扣件式脚手架稳定性的不利影响程度更大。

## 2 脚手架模态分析

模态分析是分析结构振动特性的一种方

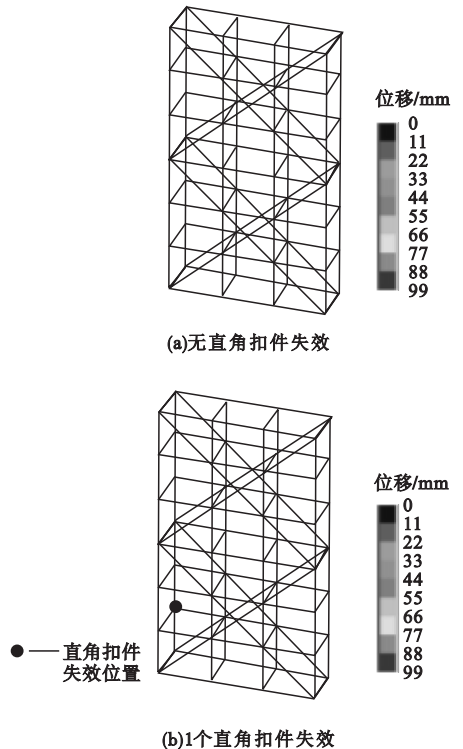
法,对于具有多个自由度的脚手架结构,其发生自由振动时的运动方程为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0. \quad (1)$$

式中: $M$ 为结构质量矩阵; $C$ 为阻尼矩阵; $K$ 为结构刚度矩阵; $\ddot{u}$ 为节点加速度向量; $\dot{u}$ 为节点速度向量; $u$ 为节点位移向量。

在无外荷载的作用下,方程的解只反映结构的固有特性,即振动频率和振型。若任意位置处的直角扣件出现松动甚至失效的情况,脚手架结构的刚度矩阵、阻尼矩阵必然发生变化,假定损伤后结构的质量矩阵不发生变化,相应地,脚手架结构的各阶频率和对应的振型也将发生变化。因此,笔者把振动频率理论引入双排脚手架结构体系以实现其直角扣件失效的检测。

笔者对双排脚手架在立杆和纵向水平杆方向直角扣件失效的工况进行模态分析,计算得到脚手架的振动频率与模态振型。图2为在I号立杆方向不同数量直角扣件失效时脚手架的第1阶模态振型。



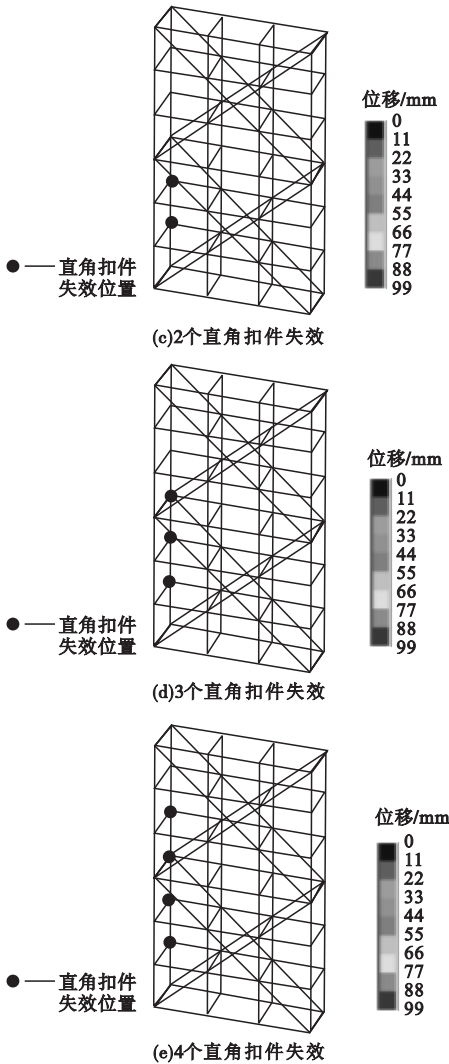


图2 I号立杆方向直角扣件失效时的模式振型  
 Fig.2 The first mode shape of the scaffolding right-angle coupler in the direction of the No. 1 pole

在无直角扣件失效的情况下,6步3跨双排扣件式脚手架第1阶振型表现为整体横向振动,振型以连墙件所在平面为分界线,上部呈现大波鼓曲振动,下部的振动位移依次小于上部振动位移(见图2(a)).在直角扣件失效数量为1时,6步3跨脚手架第1阶振型仍然表现为整体横向振动(见图2(b)).当直角扣件失效数量为2时,脚手架的第1阶振型在直角扣件失效处的局部振动位移增加明显(见图2(c)).在直角扣件失效数量大于2时,由于纵、横向水平杆对

立杆的约束作用进一步减弱如图2(d)、(e)所示,其第1阶振型变为了I号立杆的局部振动.对于II号立杆方向直角扣件失效的工况,脚手架的第1阶振型呈现出相同的变化规律.

图3为II号纵向水平杆不同数量直角扣件失效时脚手架的第1阶模态振型.

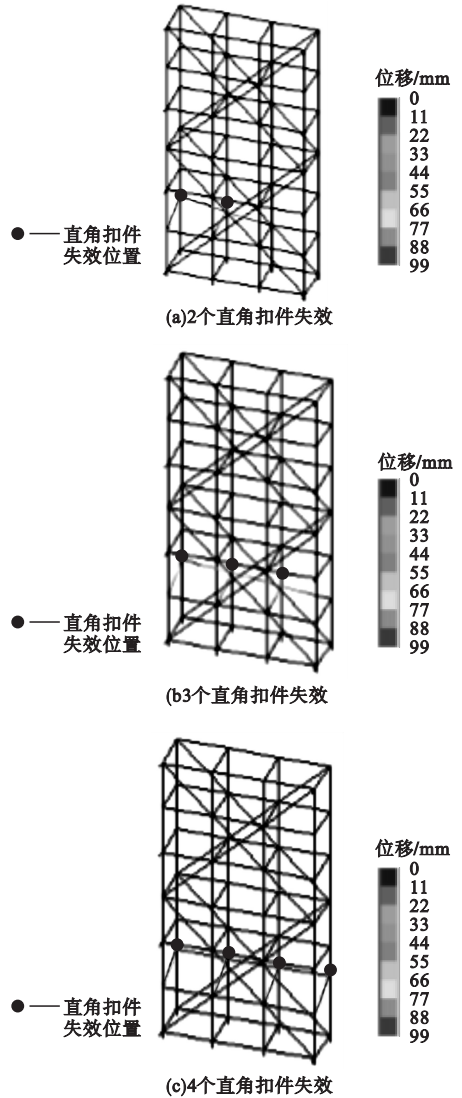


图3 II号纵向水平杆方向直角扣件失效时的模式振型  
 Fig.3 The first mode shape of the scaffolding right-angle coupler in the direction of the No. 2 longitudinal horizontal rod

在II号纵向水平杆方向直角扣件失效数量为0、1时,脚手架的第1阶模态振型与I号立杆方向扣件失效的工况完全相同,均表

现出整体横向振动的特征.随着失效数量的增加,脚手架的局部振动位移增加明显,且振型呈现出局部振动的特征.

现为整体横向振动.从图3可以看出,从Ⅱ纵向水平杆方向直角扣件失效数量达到2开始,脚手架的第1阶振型转变为了水平杆的局部振动.同样,在Ⅳ、Ⅵ号纵向水平杆方向直角扣件失效数量为1~4时,脚手架的第1阶振型呈现出相同的变化规律.

表2为Ⅰ、Ⅱ号立杆方向及Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ号纵向水平杆方向直角扣件失效情况下,6步3跨双排脚手架的第1阶振动频率及下降幅度.随着扣件失效数量的增加,脚手架的第1阶振动频率呈现下降的趋势,尤其在直角扣件失效数量大于2时,第1阶振动频率下降幅度明显.以Ⅰ号立杆为例,在无直角扣件失效时,脚手架整体振动频率为14.635 Hz,在

表2 脚手架在不同直角扣件失效工况下的第1阶振动频率及下降幅度

Table 2 First-order vibration frequency and decline amplitude of six-step three-span scaffold under different failure conditions of right-angle couplers

直角扣件 失效数量	Ⅰ号立杆		Ⅱ号立杆		Ⅱ号纵向水平杆		Ⅳ号纵向水平杆		Ⅵ号纵向水平杆	
	振动频	下降	振动	下降	振动	下降	振动	下降	振动	下降
	率/Hz	幅度/%	频率/Hz	幅度/%	频率/Hz	幅度/%	频率/Hz	幅度/%	频率/Hz	幅度/%
0	14.635	—	14.635	—	14.635	—	14.635	—	14.635	—
1	14.489	0.99	14.473	1.11	14.489	0.99	14.455	1.23	14.395	1.64
2	12.543	14.29	11.435	21.87	7.718	47.26	7.707	47.34	7.666	47.62
3	7.079	51.63	5.997	59.02	4.735	67.64	4.735	67.64	4.735	67.64
4	4.019	72.54	3.705	74.68	4.215	71.20	4.215	71.20	4.215	71.20

在立杆方向和纵向水平杆方向直角扣件失效数量增加时,双排扣件式脚手架的振型由整体横向振动转变为立杆的局部振动,且脚手架的第1阶振动频率发生了不同程度的下降,证明了振动频率的变化能有效的反映双排扣件式脚手架直角扣件的失效情况,可以为双排扣件式脚手架的振动检测提供参考.

### 3 脚手架现场试验验证

为验证振动频率判断双排脚手架直角扣件失效理论的正确性与可行性,以某抽水蓄能电站现场的双排扣件式钢管脚手架为试验对象,在松开不同数量立杆方向和纵向水平杆方向直角扣件使其失效的情况下,利用

1个扣件失效时,脚手架整体振动频率为14.489 Hz,频率下降0.99%,在直角扣件失效数量增加为2~4时,Ⅰ号立杆局部振动频率从12.543 Hz下降到4.019 Hz,频率共下降72.54%.同时,由于Ⅰ、Ⅱ号立杆与剪刀撑连接节点的位置和数量不同,在相同工况下,两立杆的局部刚度变化不一致,造成Ⅱ号立杆方向直角扣件失效时脚手架第1阶振动频率的下降幅度略小于Ⅰ号立杆.而Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ号纵向水平杆在相同工况下的振动频率数值差距较小,甚至在扣件失效数量为3、4时,三者的振动频率数值相同.这是因为纵向水平杆、剪刀撑均与立杆直接连接,所以剪刀撑对纵向水平杆的局部刚度的变化影响小.

RSV-150型激光测振仪,并通过快速傅里叶变换得到各工况下的杆件局部振动频率,分析立杆和纵向水平杆振动频率的变化规律.

#### 3.1 工程概况

在某抽水蓄能电站建设过程中,上水库环库公路某段需采用锚喷支护方式进行边坡支护(见图4).为保证施工作业的顺利开展以及人员的安全,相关人员在该处搭建了双排扣件式脚手架作为施工平台.脚手架由左侧11步9跨和右侧12步26跨两个架体组成.本次试验以左侧架体作为研究对象,对其分别进行立杆方向和纵向水平杆方向直角扣件失效的现场试验研究.

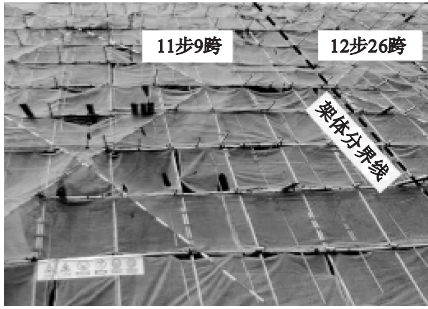


图4 抽水蓄能电站双排扣件式脚手架

Fig. 4 Double-pole fastening scaffold for pumped storage power station

### 3.2 试验方案及结果

试验选择 I、II、III号立杆与 II、IV、VI纵向水平杆作为检测杆件(见图5),同时,立杆的激光测点设置在①号直角扣件的上部,纵向水平杆的激光测点设置在⑤号直角扣件的右侧.具体试验过程:通过敲击检测杆件,在不考虑直角扣件失效的前提下采集3根立杆与3根纵向水平杆的振动信号,并对时域信号和频域信号进行分析,得到杆件的

振动频率;然后松开立杆与纵向水平杆连接的直角扣件,采集立杆和纵向水平杆在分别松开①~④,⑤~⑧号直角扣件时的振动频率;最后用扭力扳手将直角扣件的拧紧力矩恢复到初始状态,检查立杆和纵向水平杆的振动频率是否与初始值相同.

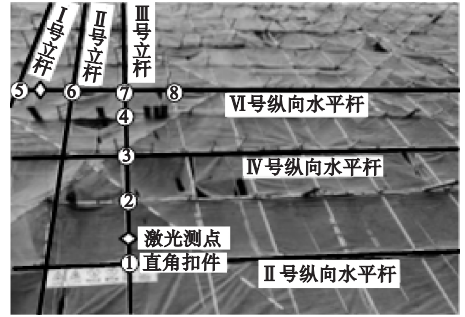


图5 试验杆件及直角扣件松动位置

Fig. 5 Test rod and loose position of right-angle coupler

I、II、III号立杆与 II、IV、VI号纵向水平杆在不同工况下的第1阶振动频率测试结果如表3、表4所示.

表3 抽水蓄能电站脚手架立杆第1阶频率试验结果

Table 3 First-order frequency test results of scaffolding poles for pumped storage power stations

直角扣件 失效数量	I号立杆		II号立杆		III号立杆	
	振动频率/Hz	下降幅度/%	振动频率/Hz	下降幅度/%	振动频率/Hz	下降幅度/%
0	5.914	—	5.891	—	5.846	—
1	5.850	1.08	5.867	0.41	5.781	1.11
2	5.484	7.27	5.813	1.32	5.281	9.66
3	5.047	14.66	5.789	1.73	4.730	19.09
4	4.867	17.70	5.672	3.72	4.477	23.42
0(重新拧紧)	5.909	0.08	5.886	0.08	5.851	0.09

表4 抽水蓄能电站脚手架纵向水平杆第1阶频率试验结果

Table 4 First-order frequency test results of scaffolding longitudinal horizontal rods for pumped storage power stations

直角扣件 失效数量	II号纵向水平杆		IV号纵向水平杆		VI号纵向水平杆	
	振动频率/Hz	下降幅度/%	振动频率/Hz	下降幅度/%	振动频率/Hz	下降幅度/%
0	6.344	—	6.594	—	6.156	—
1	6.313	0.49	6.551	0.65	6.139	0.27
2	6.063	4.42	6.369	3.41	5.938	3.54
3	5.482	13.59	5.807	11.94	5.443	11.58
4	5.319	16.15	5.583	15.33	5.188	15.72
0(重新拧紧)	6.340	0.06	6.597	0.05	6.158	0.03

从表3可看出,在不松开直角扣件时,I号立杆测点处的第1阶振动频率为5.914 Hz.在松开1~4个直角扣件时,振动频率分别下降了1.08%、7.27%、14.66%和17.70%.在相同工况下,Ⅲ号立杆测点处的第1阶振动频率的下降幅度略大于I号立杆,而Ⅱ号立杆测点处的第1阶振动频率的变化幅度明显小于其余两立杆.检查Ⅱ号立杆松开的直角扣件,发现因脚手架搭设尺寸的偏差,直角扣件凹槽的边缘仍对Ⅱ号立杆有较大的紧固作用,而I、Ⅱ号立杆上松开的直角扣件与立杆间的空隙较大,两者不存在力的相互作用,故Ⅱ号立杆与另外两立杆的检测结果显示存在较大差别.当采用扭力扳手将松开直角扣件的拧紧力矩恢复到初始数值时,检测结果显示I、Ⅱ、Ⅲ号立杆的第1阶振动频率基本与初始状态相同(见表4),在松开1~4个直角扣件时,Ⅱ号纵向水平杆的振动频率由6.344 Hz分别减小至6.313 Hz、6.063 Hz、5.482 Hz和5.319 Hz,频率下降幅度为0.49%、4.42%、13.59%和16.15%.而Ⅳ、Ⅵ号纵向水平杆的振动频率及下降幅度与Ⅱ号纵向水平杆的结果差距较小.

试验结果与数值模拟结果呈现出相似的规律,即当立杆方向或纵向水平杆方向直角扣件失效数量增加时,相应杆件的局部振动频率呈现下降的趋势,验证了振动频率理论应用于双排脚手架结构体系以实现其直角扣件失效的可行性.

## 4 结论

(1)在立杆或纵向水平杆方向的直角扣件失效数量增加时,6步3跨双排扣件式脚手架稳定承载力均呈现出不同程度的下降趋势.在相同数量直角扣件失效下,相对于纵向水平杆,立杆方向直角扣件失效对双排扣件式脚手架稳定承载力下降的影响更大.

(2)在立杆或纵向水平杆方向直角扣件失效数量增加时,双排扣件式脚手架的振型

由整体横向振动转变为立杆或纵向水平杆的局部振动,且第1阶振动频率发生了不同程度的下降,由此可说明振动频率的变化能有效反应双排扣件式脚手架直角扣件的失效情况.

(3)从双排扣件式脚手架的稳定承载力方面看,脚手架对外侧立杆和底部纵向水平杆方向直角扣件失效的工况敏感性较高;从双排扣件式排脚手架的振动频率方面看,由于剪刀撑仅与立杆直接连接,所以脚手架在不同立杆方向直角扣件失效时的振动频率下降趋势略有差异,而在不同纵向水平杆方向直角扣件失效时的振动频率下降趋势基本一致.

(4)双排扣件式脚手架试验结果与数值模拟结果趋势一致,即当立杆或纵向水平杆方向角扣件失效数量增加时,相应杆件的局部振动频率呈现下降的趋势,验证了振动频率理论应用于判断双排脚手架结构体系中直角扣件失效的可行性.

## 参考文献

- [1] 何芳东,张潇,张伟,等.模板支撑体系坍塌事故规律[J].土木工程与管理学报,2018,35(4):137-145.  
(HE Fangdong, ZHANG Xiao, ZHANG Wei, et al. Regularities for collapse accidents of formwork support system[J]. Journal of civil engineering and management, 2018, 35(4): 137-145.)
- [2] 黄宏伟,孙宇冲,陈翔.脚手架搭拆风险分析及安全预评价[J].中国安全生产科学技术,2017,13(增刊2):36-41.  
(HUANG Hongwei, SUN Yuchong, CHEN Xiang. Safety pre-evaluation to installation and removal of scaffolding[J]. Journal of safety science and technology, 2017, 13(S2): 36-41.)
- [3] 白凤美,李佳洋.附着式升降脚手架倾覆和坠落事故风险评价模型[J].土木建筑与环境工程,2016,38(增刊2):35-39.  
(BAI Fengmei, LI Jiayang. Risk assessment model for overhead and fall accidents of attachment lifting scaffold[J]. Journal of civil and environmental engineering, 2016, 38(S2): 35-39.)
- [4] 周治华,杨志勇.模板脚手架倒塌事故原因分析[J].施工技术,2010,39(增刊2):394-395.



- (ZHOU Zhihua, YANG Zhiyong. Analysis on causes of formwork scaffold collapse [J]. Construction technology, 2010, 39(S2): 394 - 395.)
- [5] 朱世哲, 卫严, 蔡建深. 某梁板高支模架倒塌事故的分析及处置[J]. 工业建筑, 2009, 39(9): 121 - 123.  
(ZHU Shizhe, WEI Yan, CAI Jianshen. The analysis and disposition of a collapse of the high scaffolding for bracing forms [J]. Industrial construction, 2009, 39(9): 121 - 123.)
- [6] 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.)
- [7] 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.)
- [8] 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 Zhengran, CHEN Zhihua, WANG Xiaodun, 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.)
- [9] 陆征然, 郭超, 温永钦, 等. 偏心荷载作用下扣件式钢管满堂支撑体系承载性能研究[J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(1): 20 - 27.  
(LU Zhengran, GUO Chao, WEN Yongqin, et al. Study of bearing capacity of fastener steel tubular full hall formwork support system under eccentric load [J]. Journal of Dalian university of technology, 2016, 56(1): 20 - 27.)
- [10] 陆征然, 郭超, 杨艳敏, 等. 扣件偏心对钢管模板支架承载性能的影响研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(1): 140 - 146.  
(LU Zhengran, GUO Chao, YANG Yanmin, et al. Study on the effect of coupler eccentricity on bearing behavior of steel tubular formwork support [J]. Industrial construction, 2016, 46(1): 140 - 146.)
- [11] 贾莉, 刘红波, 陈志华, 等. 扣件式钢管满堂脚手架整体稳定试验与有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(6): 114 - 122.  
(JIA Li, LIU Hongbo, CHEN Zhihua, et al. Experimental research and FEA on bearing capacity of full hall steel tube and coupler scaffold support system [J]. Journal of building structures, 2017, 38(6): 114 - 122.)
- [12] LIU H, ZHAO Q, WANG X, 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.
- [13] LIU H, JIA L, WEN S, et al. Experimental and theoretical studies on the stability of steel tube-coupler scaffolds with different connection joints [J]. Engineering structures, 2016, 106: 80 - 95.
- [14] 陆征然, 郭超, 李嗣昌, 等. 超高扣件式钢管满堂脚手架承载性能试验研究[J]. 施工技术, 2016, 45(15): 82 - 85.  
(LU Zhengran, GUO Chao, LI Guochang, et al. Testing research on the bearing capacity of fastener steel tubular full hall formwork scaffold [J]. Construction technology, 2016, 45(15): 82 - 85.)
- [15] 敖鸿斐, 李国强. 双排扣件式钢管脚手架极限承载力分析[J]. 建筑施工, 2003(3): 214 - 217.  
(AO Hongfei, LI Guoqiang. Analysis of ultimate load-bearing capacity for independent tube and coupler scaffold [J]. Building construction, 2003(3): 214 - 217.)
- [16] 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(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(2): 213 - 218.)
- [17] 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(5): 43 - 50.  
(YUAN Xuexia, JIN Weiliang, LU Zheng, et al. A study on the stability bearing capacity of fastener style tubular steel formwork supports [J]. China civil engineering journal, 2006(5): 43 - 50.)
- [18] 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. 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.)
- (责任编辑:徐玉梅 英文审校:唐玉兰)