

基于模态分析的钢管脚手架平面支撑刚度研究

季三荣¹, 王东炜², 赵 骞²

(1. 河南省第五建筑安装工程(集团)有限公司, 河南 郑州 450007; 2. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 通过有限元程序, 对扣件式钢管脚手架在不同连墙件和剪刀撑设置条件下的结构特征参数分析, 讨论了连墙件和剪刀撑的设置状况对脚手架刚度的影响。该方法可直观地反映支撑体系相对刚度问题, 且便于确定支撑体系薄弱部位。

关键词: 扣件式钢管脚手架; 特征参数; 模态分析; 相对刚度

中图分类号: TU731.2; TU311.3

文献标识码: A

0 引言

扣件式钢管脚手架支撑体系是我国建筑施工中最常见支撑体系之一, 使用率占到总量的70%以上。但由于设计选型和施工缺陷等原因导致脚手架坍塌事故频频发生^[1-3]。目前, 国家行业标准JGJ130—2001《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规程》采用极限承载力的方法进行扣件式钢管脚手架的分析计算, 具有计算过程复杂、可操作性不强的缺陷。近年来, 刘家彬等^[2]分析了扣件钢管脚手架搭设和材料的不安全因素, 并对典型的模板支架倒塌事故进行了分析。刘建民等^[3]分析了脚手架的稳定承载力, 并根据脚手架试验结果与模型计算结果之间的关系, 提出了立杆计算长度修正系数的概念。袁雪霞等^[4]通过建立三维有限元分析模型对扣件式钢管支模架稳定性进行了较深入的研究。

自振频率和振型是结构固有的特征参数, 频率向量反映了结构自身绝对刚度和质量的分布情况, 振型顺序反映了结构体系相对刚度和质量的分布情况。与反映结构体系细部受力特征的应力、应变等参数相比, 动力特征参数能更好地从宏观上反映结构质量和刚度特征。作者通过对某扣件式钢管脚手架在不同连墙件和剪刀撑设置条件下的模态分析, 研究了连墙件和剪刀撑设置对结构刚度和稳定性的影响问题。

1 工程概况及有限元模型

某市商业银行综合营业大楼工程总建筑面积33 396.8 m², 地上26层, 地下1层。其中裙楼三层, 层高5.2 m, 总高15.6 m, 功能为营业。主楼层高3.6 m, 屋面总高98.4 m。主楼标准层长37.5 m, 宽27.3 m。按JGJ130—2001进行脚手架设计《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》。

计算模型选取落地双排脚手架14跨10步, 架步距1.8 m, 立杆纵距1.8 m, 纵向长25.2 m, 高18 m, 其中连墙件的布置, 从第一步纵向水平杆处开始设置, 按照3步3跨菱形布置, 脚手架两端必须设连墙件。剪刀撑的布置, 剪刀撑斜杆与地面倾角成45°, 一道剪刀撑跨越立杆数为5根, 剪刀撑宽度为7.2 m, 竖向连续布置。

对钢管脚手架模态分析做下列基本假定:

(1) 忽略空间作用, 把空间体系化为平面体系进行计算;

(2) 立杆和横杆交接处, 扣件连点简化为无滑移、无刚接影响的铰接点;

(3) 立杆底部20 cm处没有设扫地杆, 立杆底部按平面内固定处理。

材料特性: 钢材的弹性模量 $E_s = 3.0 \times 10^4$ MPa, 泊松比 $\nu_s = 0.1667$, 容重 $\rho_s = 26$ kn/m³。边界条件: 脚手架立杆底部采用固定铰支撑连接, 限制此处节点的UX, UY, ROTZ位移; 在脚手架杆件和

收稿日期: 2009-12-29; 修订日期: 2010-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978232); 河南省第五建筑安装工程(集团)有限公司基金联合资助

作者简介: 季三荣(1957-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事建筑工程及市政工程造价技术研究, E-mail: jsr0371@

126.com.

连墙件交接部位采用刚性连接,限制此处的 UX 和 UY 平面内位移;立杆和大横杆及剪刀撑交接处采用耦合连接,协同立杆和大横杆及剪刀撑在

交接处的 UX 和 UY 位移,建模选用平面梁单元,为剪刀撑及连墙件设置对结构刚度的影响,笔者设计建立了 6 种脚手架平面模型,如图 1 所示。

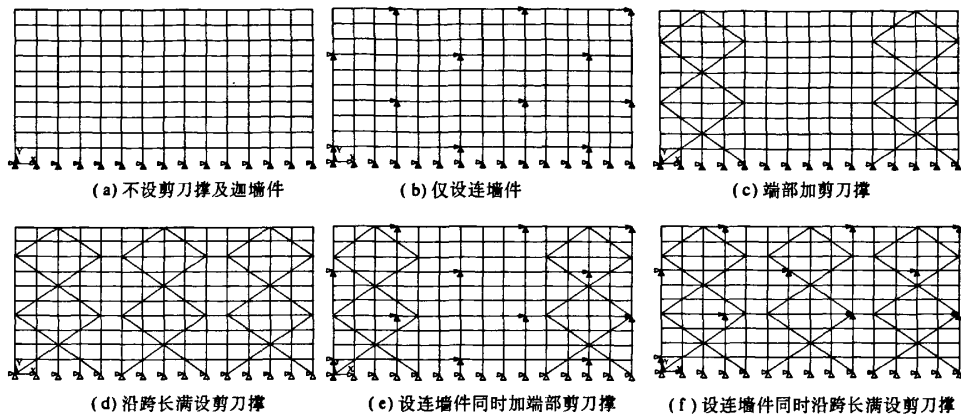


图 1 6 种脚手架平面有限元模型

Fig. 1 Six planar finite element models of the pipe scaffold support system

2 结构模态参数计算与分析

2.1 计算结果

分别对模型 1 至模型 6 进行了有限元模态分析,提取了 6 个模型的自振频率和振型向量;其中,前三节振型图如图 2~图 7. 前 10 节自振频率和振型结果如表 1 所示。

2.2 计算结果分析与比较

2.2.1 频率变化对支撑体系刚度的影响分析

由表 1 可以看出,不设剪刀撑和连墙件脚手架(模型 1)的基频很小,加设连墙件(模型 2)后脚手架的基频增大,约是不加设连墙件脚手架的 56 倍,且整体提高了脚手架的各阶频率。两端设剪刀撑(模型 3)和连续设剪刀撑(模型 4)的脚手架相继增加了脚手架的基频,分别约是不设剪刀撑和连墙件脚手架基频的 84 和 104 倍。设连墙件两端加剪刀撑(模型 5)和连续加剪刀撑(模型 6)脚手架最大程度地提高了脚手架的第一阶频率。

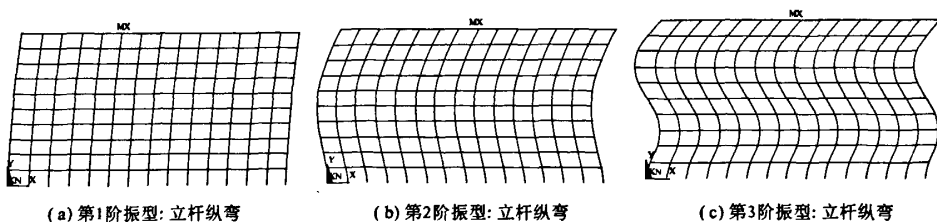


图 2 不设连墙件和剪刀撑的脚手架前三阶振型图

Fig. 2 The first three models of the pipe scaffold without wall fasteners and cross bridgings

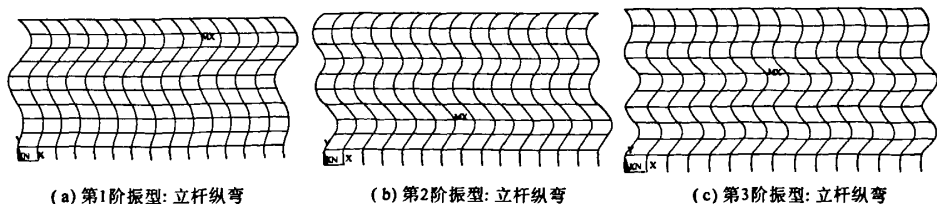


图 3 设连墙件的脚手架前三阶振型图

Fig. 3 The first three models of the pipe scaffold with wall fasteners

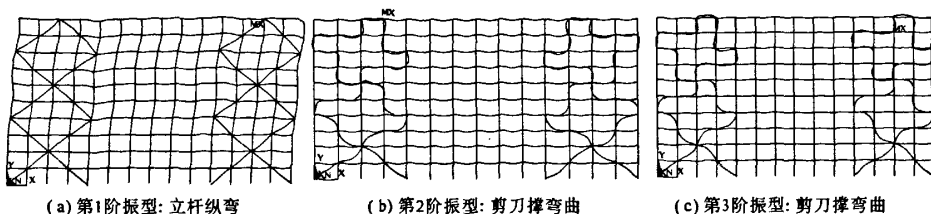


图4 两端设剪刀撑的脚手架前三阶振型图

Fig. 4 The first three models of the pipe scaffold with end cross bridgings

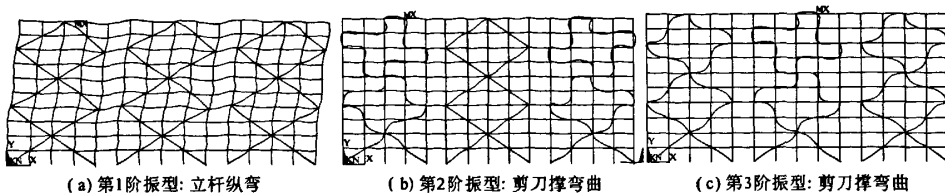


图5 剪刀撑沿跨长满设的脚手架前三阶振型图

Fig. 5 The first three models of the pipe scaffold with full cross bridgings

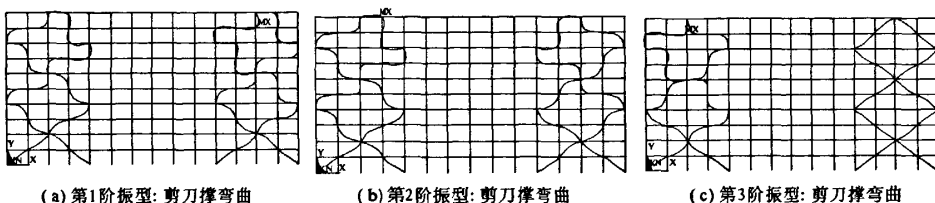


图6 设连墙件两端加剪刀撑脚手架前三阶振型图

Fig. 6 The first three models of the pipe scaffold with wall fasteners and end cross bridgings

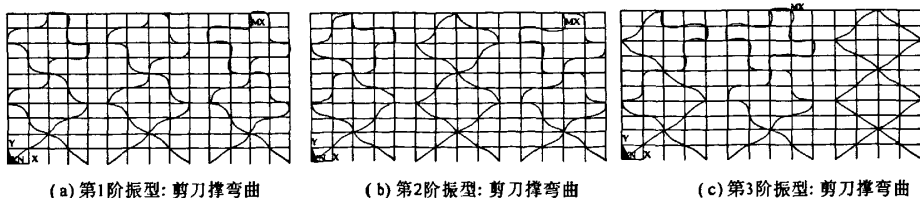


图7 设连墙件沿跨长连续设剪刀撑脚手架前三阶振型图

Fig. 7 The first three models of the pipe scaffold with wall fasteners and full cross bridgings

使脚手架(不设剪刀撑和连墙件)的基频从0.095 93增大到19.778,提高了206倍。相对于设连墙件脚手架而言,两端设剪刀撑和连续设剪刀撑脚手架对结构基频的影响更大,即对与脚手架结构,设置剪刀撑要比设置连墙件能更有效地提高结构整体刚度和稳定性。设连墙件两端加剪刀撑和设连墙件连续设剪刀撑的脚手架基频相等,相对于两端设剪刀撑和连续设剪刀撑脚手架,只是提高了第一阶频率,随后的各阶频率值和两端设剪刀撑和连续设剪刀撑脚手架相近。

从模型1到模型6结构整体刚度不断提高,但在模型5的基础上再增加剪刀撑或连墙件,结

构基频基本不变。而模型5正好是按《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》JGJ130-2001要求布置的剪刀撑和连墙件,因此可认为模型5结构方案较为合理。即方案合理时,基频是趋于稳定的。

2.2.2 振型变化对支撑体系刚度的影响分析

由图2~图7以及表1所列模态分析表可以得到以下结论。

(1)无剪刀撑和连墙件的脚手架:脚手架的第1振型是纵向振动,随后都是立杆的弯曲振动,立杆相对于横杆刚度较低,且结构的整体刚度和稳定性较差。

表 1 6 种模型的振型对比分析表

Tab.1 The comparative analysis table of the six models

模型 1:不设剪刀撑脚手架			模型 2:设连墙件脚手架		模型 3:两端设剪刀撑脚手架	
振型 序号	频率 /Hz	振型描述	频率 /Hz	振型描述	频率 /Hz	振型描述
1	0.0959	立杆纵弯	3.3466	立杆纵弯	8.5034	立杆纵弯
2	0.6006	立杆纵弯	4.6664	立杆纵弯	19.770	剪刀撑弯曲
3	1.6805	立杆纵弯	6.3024	立杆纵弯	19.780	剪刀撑弯曲
4	3.2914	立杆纵弯	12.788	立杆纵弯	19.781	剪刀撑弯曲
5	5.4368	立杆纵弯	14.756	立杆纵弯	19.781	剪刀撑弯曲
6	8.1073	立杆纵弯	16.911	立杆纵弯	20.868	剪刀撑弯曲
7	11.274	立杆纵弯	39.270	横杆弯曲	20.868	剪刀撑弯曲
8	14.850	立杆纵弯	39.273	横杆弯曲	20.869	剪刀撑弯曲
9	18.588	立杆纵弯	39.276	横杆弯曲	20.869	剪刀撑弯曲
10	21.794	立杆纵弯	39.278	横杆弯曲	22.898	剪刀撑弯曲
模型 4:连续设剪刀撑的脚手架			模型 5:设连墙件两端加剪刀撑		模型 6:设连墙件连续设剪刀撑	
振型 序号	频率 /Hz	振型描述	频率 /Hz	振型描述	频率 /Hz	振型描述
1	10.073	立杆纵弯	19.778	剪刀撑弯曲	19.778	剪刀撑弯曲
2	19.770	剪刀撑弯曲	19.779	剪刀撑弯曲	19.779	剪刀撑弯曲
3	19.776	剪刀撑弯曲	19.782	剪刀撑弯曲	19.780	剪刀撑弯曲
4	19.781	剪刀撑弯曲	19.782	剪刀撑弯曲	19.782	剪刀撑弯曲
5	19.781	剪刀撑弯曲	20.871	剪刀撑弯曲	19.782	剪刀撑弯曲
6	19.781	剪刀撑弯曲	20.872	剪刀撑弯曲	19.782	剪刀撑弯曲
7	19.800	剪刀撑弯曲	20.873	剪刀撑弯曲	20.872	剪刀撑弯曲
8	20.868	剪刀撑弯曲	20.874	剪刀撑弯曲	20.872	剪刀撑弯曲
9	20.868	剪刀撑弯曲	22.900	剪刀撑弯曲	20.872	剪刀撑弯曲
10	20.869	剪刀撑弯曲	22.903	剪刀撑弯曲	20.873	剪刀撑弯曲

(2) 设连墙件脚手架:设连墙件脚手架前 6 阶振型为立杆的弯曲振动和横杆的平动,从第 7 振型开始出现了横杆的弯曲振动,仍然表现为立杆的刚度弱于横杆的刚度。

(3) 两端设剪刀撑的脚手架:第一振型是脚手架整体纵向振动伴随立杆和横杆、剪刀撑的微弯振动,随后振型都是剪刀撑的弯曲振动,表明脚手架的纵向刚度和立杆、横杆、剪刀撑的刚度在次工况下最小。

(4) 连续设剪刀撑脚手架:第一振型是脚手架整体纵向振动伴随立杆和横杆、剪刀撑的微弯振动,随后振型都是剪刀撑的弯曲振动,在第 2、第 5 和第 9 振型出现了脚手架两端剪刀撑弯曲振动。

(5) 设连墙件两端加剪刀撑脚手架:第一振型是脚手架剪刀撑的弯曲振动,随后的高阶振动仍是剪刀撑的弯曲振动。

(6) 设连墙件连续设剪刀撑脚手架:第一振型是脚手架剪刀撑的弯曲振动,随后的高阶振动仍是剪刀撑的弯曲振动。

前 4 种结构模型的第一振型都表现为整体纵向振动或伴随立杆的弯曲振动,即结构的横向刚度和稳定性较差,易发生侧向失稳破坏;模型 5、6 按 JGJ 130 - 2001 要求布置了剪刀撑和连墙件后结构的第一振型转化为剪刀撑的弯曲振动且随后的高阶振动仍是剪刀撑的弯曲振动,说明此时结构的整体刚度和稳定性较好,结构的薄弱部位为剪刀撑,结构方案较为合理。

3 结论

通过 14 跨 10 步扣件式钢管脚手架在不同剪刀撑和连墙件设置情况下的模态分析,可得以下结论:

(1) 从结构基频来看,作为整体刚度的加强措施,连墙件和剪刀撑都能直接有效地提高结构整体刚度,提高结构基频,但设置剪刀撑要比设置连墙件更能有效地提高结构整体刚度和稳定性;

(2) 当脚手架按规范要求设置剪刀撑和连墙件后,结构基频趋于稳定;

(3) 从结构振型来看,第一振型为整体纵向

振动或伴随立杆的弯曲振动时,结构的整体刚度和侧向稳定性较差,易发生侧向失稳破坏;

(4)当脚手架结构方案布置合理时,结构的第一振型转化为剪刀撑的弯曲振动,且随后的高阶振动多为剪刀撑的弯曲振动,说明结构的整体刚度和稳定性较好,结构方案较为合理;

(5)连墙件和剪刀撑对提高脚手架的整体刚度和稳定性是至关重要的。

通过扣件式钢管脚手架的分析,笔者发现可以通过结构特征参数对脚手架结构方案的合理性进行初步判断。据此,特征参数识别可作为结构概念设计的一种新思路进行更深入的探讨。

参考文献:

- [1] JGJ 130—2001, 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.
- [2] 刘家彬,郭正兴. 扣件钢管架支模的安全性[J]. 施

工技术,2002,31(3):9-12.

- [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]. 2005,36(11):860-862.
- [4] 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):43-46.
- [5] 杨洋. 大跨高耸脚手架支撑体系研究[D]. 重庆:重庆大学土木工程学院,2004.
- [6] 顾琰. 扣件式钢管脚手架高支模系统的设计与施工[J],建筑施工,2008,30(7):562-567.
- [7] GODLEY M H R, BEALE R G. Analysis of large proprietary access scaffold structures [J]. Proceeding of the Institution of Civil Engineers; Structures and Buildings, 2001, 146(1): 31-39.
- [8] TAYAKORN C, RASMUSSEN K J R. Scaffold cuplock joint tests [J], University of Sydney 2008, 893(3): 1-40.

Stiffness Study of Pipe Scaffold Planar Support System by the Model Analysis

Ji San - rong, WANG Dong - wei, Zhao Qian

(Henan Fifth Construction Group, Zhengzhou 450007, China; College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Through the finite element analysis of the model characteristics of the fastener - pipe scaffold under different conditions of wall fasteners and cross bridgings, it discusses the impact of structural rigidity which is influenced by wall fasteners and cross bridgings, and finds that it is more convenient to reflect the relative rigidity in construction support system, and easier to find out the weak parts of the support system.

Key words: Steel tubular scaffold with couplers; Dynamic characteristics; Model analysis; Relative rigidity