

HIGH FALSEWORK
SECURITY CONTROL

高大模板支架结构体系 安全控制

曾凡奎 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

HIGH FALSEWORK
SECURITY CONTROL

高大模板支架结构体系 安全控制

曾凡奎 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书分概述、高大模板支架稳定承载力足尺试验、广义初始缺陷对高支模稳定承载力的影响、半刚性连接模板支架设计、高支模整体稳定承载力的控制方法、高支模体系的改进与标准构造、高支模的实用设计方法、高支模现场试验、高支模计算智能软件的开发、结论与展望共 10 章。

本书适合建筑工程设计、施工单位人员参考使用，同时也可以作为大中专院校的教材使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

高大模板支架结构体系安全控制/曾凡奎著. —北京: 中国电力出版社, 2015. 1
ISBN 978-7-5123-6376-2

I. ①高… II. ①曾… III. ①建筑工程-模板-结构体系-安全技术 IV. ①TU755.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 194237 号

中国电力出版社出版发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

责任编辑: 梁 瑶 电话: 010-63412605 E-mail: liangyao0521@126.com

责任印制: 郭华清 责任校对: 郝军燕

汇鑫印务有限公司印刷·各地新华书店经售

2015 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

700mm×1000mm 1/16·8.75 印张·164 千字

定价: 38.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话 (010-88386685)

前 言

随着我国城市现代化建设的发展，在土木工程中使用高大模板支撑体系的现象越来越多。但是，由于人们对该体系的认识不足、理论研究不到位，导致近年来我国许多省市不断发生模板支撑架坍塌事件。模板坍塌事故的屡次发生引起国务院安委会办公室的高度重视，并组织住建部、交通部、铁道部等部委，按照国务院召开的 2006 年全国安全生产工作会议精神，制订了《建筑施工安全专项整治工作方案》，其中模板支架的垮塌成为重点整治的项目。为了将研究的最新成果应用到工程实际中，进一步减少和防治我国高大模板支架坍塌等重大工程灾害，推动建筑行业高大混凝土结构的安全施工，促进我国建筑行业的可持续发展，笔者特在本人博士论文的基础上，编写了本书呈献给同行。

本书分概述、高大模板支架稳定承载力足尺试验、广义初始缺陷对高支模稳定承载力的影响、半刚性连接模板支架设计、高支模整体稳定承载力的控制方法、高支模体系的改进与标准构造、高支模的实用设计方法、高支模现场试验、高支模计算智能软件的开发、结论与展望共 10 章。

本书相关内容的研究得到了陕西省教育厅专项科研项目基金（14JK1337），西安工业大学校长基金一般项目（605—01001220）的资助，在本书的出版过程中，得到了西安工业大学专著基金的资助，我国模板支架领域德高望重的杜荣军先生、施炳华先生等一大批老专家、老前辈，上海宝冶建设有限公司建分高顺、沈勤、中建一局陈红和西安建筑科技大学土木工程学院施工教研室的老师们也给予了关心和支持，在此，谨致谢意。由于时间局促，限于作者的水平，书中存在的缺点和错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

西安工业大学建筑工程学院 曾凡奎

目 录

前言

1 概述	1
1.1 国内外研究现状及发展趋势	2
1.1.1 关于高大模板支架的定义	2
1.1.2 高支模计算模式的研究进展	3
1.1.3 荷载及其荷载组合的研究进展	4
1.1.4 节点半刚性对高支模稳定承载力的影响研究	5
1.1.5 初始缺陷对高支模稳定承载力的影响研究	6
1.1.6 高支模足尺试验研究的进展	7
1.1.7 高大模板支架可靠度研究进展	8
1.1.8 扣件式模板支架现场实测	9
1.1.9 高大模板支架软件开发与应用	10
1.2 高支模坍塌典型案例剖析	10
1.2.1 案例简介	11
1.2.2 事故原因分析	11
参考文献	11
2 高大模板支架稳定承载力足尺试验	17
2.1 试验概况	17
2.1.1 试验目的	17
2.1.2 试验仪器及器材	17
2.1.3 足尺试验模型	17
2.1.4 试验测试内容	20
2.1.5 模型加载方案	24
2.2 试验结果与分析	26
2.2.1 试验模型的整架侧移和立杆的变形	26
2.2.2 试验模型稳定承载力的讨论	28
2.2.3 横杆应力测值结果分析	35
2.2.4 剪刀撑受力情况讨论	39
参考文献	43
3 广义初始缺陷对高支模稳定承载力的影响	45
3.1 广义初始缺陷概念的提出	45

3.2	高支模稳定承载力足尺试验失稳模式分析	46
3.3	考虑初始缺陷的模板支架稳定性分析	48
3.3.1	数值分析模型	49
3.3.2	一致缺陷模态法	50
3.3.3	随机缺陷法	51
3.4	足尺试验工况 5 的结果与各考虑缺陷计算方法计算结果对比	52
	参考文献	55
4	半刚性连接模板支架设计	57
4.1	非线性连接弯矩—转角的关系模型	57
4.2	立杆承载力验算要求	58
4.3	立杆的计算长度系数	59
4.4	编程求计算长度系数	62
	参考文献	63
5	高支模整体稳定承载力的控制方法	65
5.1	数值分析模型的建立	65
5.1.1	ANSYS 程序	65
5.1.2	数值分析的基本过程	66
5.2	扫地杆离地面的高度取值研究	66
5.2.1	数值模型的建立情况	67
5.2.2	计算分析	67
5.3	立杆伸出顶层水平杆长度 a 值取值讨论	68
5.3.1	数值模型及分析过程	69
5.3.2	结果分析	70
5.4	架高对架体承载能力影响的讨论	70
5.4.1	数值模型的选取与建立	71
5.4.2	结果分析	71
5.5	剪刀撑（水平和垂直）的设置对高支模稳定承载力的影响研究	73
5.5.1	剪刀撑数值计算模型	73
5.5.2	数值计算及分析	73
5.6	搭设步距的设置对高支模稳定承载力的影响研究	75
5.6.1	数值模型	76
5.6.2	结果分析	76
	参考文献	77
6	高支模体系的改进与标准构造	79
6.1	钢管壁厚测量仪器的研发	79
6.1.1	钢管壁厚测量仪的研发背景	79

6.1.2	壁厚测量仪	79
6.1.3	壁厚测量仪的使用方法和工作原理	80
6.2	一种自由伸缩旋转扣件	80
6.2.1	自由伸缩旋转扣件的研发背景	81
6.2.2	自由伸缩旋转扣件的发明内容	81
6.2.3	使用方法和使用原理	82
6.3	一种建筑工程用扣件式钢管脚手架上使用的立杆	84
6.3.1	研发背景	84
6.3.2	发明内容	85
6.3.3	使用方法和使用原理	86
6.4	高大模板支架的稳定性的控制方法	87
	参考文献	88
7	高支模的实用设计方法	89
7.1	高支模的计算模式	89
7.2	高支模在结构施工期内所受荷载统计分析及其组合	90
7.2.1	高支模体系荷载种类	90
7.2.2	高支模体系荷载调查方法	91
7.2.3	高支模体系恒荷载统计结果与分析	92
7.2.4	施工人员及设备荷载标准值统计结果与分析	94
7.2.5	永久、可变荷载的标准值的建议取值	96
7.2.6	荷载效应组合	96
7.3	立杆计算长度的确定	98
7.3.1	直角扣件抗弯刚度试验	98
7.3.2	立杆计算长度系数的取值	99
7.3.3	立杆计算长度	100
7.4	立杆计算长细比的确定	100
7.5	立杆的稳定计算公式	101
	参考文献	101
8	高支模现场试验	103
8.1	现场调研	103
8.1.1	对施工现场管理的调查	103
8.1.2	构配件的几何参数实测分析	104
8.1.3	立杆步距、 a 值的不确定性分析	104
8.1.4	扣件拧紧力矩的调查	105
8.1.5	扣件单重的调查	105
8.1.6	模板支架偏斜率	105

8.2 模板支架内力实测分析	107
8.2.1 测试工程介绍	107
8.2.2 测试内容与方案	107
8.2.3 试验结果与分析	109
参考文献	115
9 高支模计算智能软件的开发	116
9.1 智能计算软件的功能特色	116
9.2 软件开发的总体说明	117
9.3 用户主界面和基本操作	117
9.3.1 启动程序	117
9.3.2 软件具体操作过程	117
参考文献	121
10 结论与展望	122
10.1 本书的主要研究成果	122
10.2 本书的主要创新点	123
附录 模板支架足尺试验过程照片	125

1 概 述

为了迎接北京 2008 奥运盛会,我国投资建成了很多高度高、跨度大的体育场馆。与此同时,全国各地又有许多重大工程完成、将近完成或正在兴建,如 2009 年济南第十一届全运会工程、2010 年上海世博会工程、2010 年广州亚运会工程、2011 年深圳世界大运会工程等。还有其他一些重大工程,如上海环球金融中心(高 492m)、广州新电视塔(高 610m)、广州新区西塔、广州歌剧院、广州博物馆以及苏通长江大桥和杭州湾大桥等。我国城市现代化建设的发展,使建筑工程中采用超常规高大模板现浇混凝土施工的情况也越来越多。但是,由于人们对该体系的认识不足、理论研究不到位,导致近年来在我国许多省市不断发生模板支撑架坍塌事件,如江门 2004 年“10·7”事故、北京 2005 年“9·5”事故、贵阳 2005 年“10·27”事故、大连 2006 年“5·19”事故、江苏 2006 年“8·24”事故、淄博 2006 年“9·30”事故、广西 2007 年“2·12”事故、湖南 2007 年“8·13”事故、广州 2007 年“6·13”事故、郑州 2007 年“9·6”事故、宝鸡法门寺 2008 年“3·13”事故,长沙 2008 年“4·30”事故等,尤其是 2008 年 4 月 30 日,湖南省长沙上河国际广场商业 B 区工程发生的一起承重支架坍塌事故,经确认共造成 8 人死亡,使人深感震惊和不安,并造成严重的经济损失和社会影响。模板坍塌事故的屡次发生引起国务院安委会办公室的高度重视,并组织建设部、交通部、铁道部等部委,按照国务院召开的 2006 年全国安全生产工作会议精神,制订了《建筑施工安全专项整治工作方案》,其中模板支架的垮塌成为重点整治的项目。

虽然脚手架结构的设计和计算工作在我国已经有 20 多年的发展历史,但基本上还是采用半理论和半试验与经验的方法,需要研究解决的理论和实际问题很多。由于高大模板支架近年来事故频发,使高大模板支架的研究工作迫在眉睫。另外,扣件式模板支架所采用的架种在结构构造、结点连接、设计计算和安全控制等要求上的不同,以及在设置条件、杆件配置、组装质量、使用荷载、内力分布和其他情况下的随机性、可变性和难控性,使其难以完全照搬正规钢结构的设计、计算和施工规定,必须寻求适合脚手架结构情况和安全要求的解决办法。近年来,虽然国内外一些学者对模板支架结构设计计算问题提出了一些新的见解和方法,某些地区和省份(上海、浙江等)也颁布了相应的模板支架规程,但是模板支架的倒塌事故并未因为这些方法和规程的出现而减少,由于缺乏试验验证和在规程中大量借用国外规范,使这些方法和规程很难给实际工程提供安全、可靠、合理的指导。目前,由中建一局(集团)有限公司主编的《建筑施工临时支

撑结构技术规范》(JGJ 300—2013)已经颁布实施,笔者也参与了大量的工作,通过此研究,将为规程的实施奠定基础。

1.1 国内外研究现状及发展趋势

扣件式钢管模板支架主要指建筑施工中用来支撑模板、采用脚手架材料搭设的架子。模板支架体系主要是由扣件式脚手架、碗扣式脚手架、门式脚手架等搭设而成,其组成如图 1-1 所示。

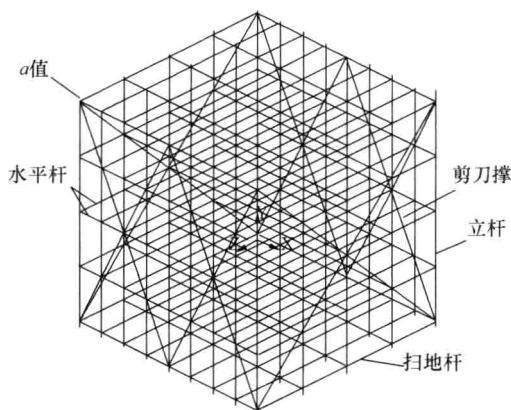


图 1-1 扣件式钢管模板支架各杆件位置

1.1.1 关于高大模板支架的定义

模板支撑体系主要是由扣件式脚手架、碗扣式脚手架、门式脚手架等搭设而成的,可反复装拆使用的临时工程结构。但国家目前对高大模板支架的定义还没有明确的规定。杜荣军指出,可将采用扣件式钢管脚手架材料搭设的、支撑高度 $\geq 4.0\text{m}$ 的梁板楼(屋)盖模板支撑架,称为扣件式钢管梁板模板高支撑架;国家建设部《危险性较大工程安全专项施工方案编制及专家论证审查办法》又规定:高大模板支撑体系(简称高支模)是指搭设高度超过 8m ,或跨度超过 18m ,或施工总荷载大于 10kN/m^2 ,或集中线荷载大于 15kN/m 的模板支撑体系。而《广东省建设工程高支撑模板系统施工安全管理办法》规定:高支模是指支撑高度 $\geq 4.5\text{m}$ 的模板系统,对此定义,文献[1-2]有同样的看法。可以看出,关于高支模的定义,住房和城乡建设部、省级单位和国家相关规范主要起草人之间的意见是不统一的,这种不统一将会直接导致管理及技术人员对相关规范和法规的不信任以及现场管理的混乱。我们可以对国内外模板工程倒塌的工程案例归纳总结,进行倒塌原因分析,特别是倒塌架体的高度、所承受的荷载以及架体搭设情况,建立概率模型,给高支模一个科学、合理的定义。

1.1.2 高支模计算模式的研究进展

在高大模板支架空间结构体系设计计算模式的研究中,已经颁布实施的《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2001)虽编写了一节“模板支架计算”,但存在重大疏漏,其所给出的计算模型的实质是:模板支架在临界荷载作用下发生局部失稳,立杆的计算长度等于立杆步距;当立杆端部有外伸高度时,规定外伸部分按2倍长度计算并加到顶部步距上。对此规定,规范说明中的解释是参考了英国标准的规定,已有很多学者提出质疑,杜荣军指出:英国标准与我国标准的建立基础不同,构造要求相差也较大,这样的搬用是不安全的。对于扣件式钢管作为高支模的支撑架,目前的计算模型主要有两个:多层排架模型和有侧移刚架模型。排架模型是从升板式建筑结构群柱稳定性研究成果引申而来的,认为模板支架是上下两端铰接的多层排架,其稳定性可以简化为一根两端铰接的等代柱的稳定性,等代柱的刚度等于该多层排架单柱刚度的总和,等代柱的计算长度为多层排架柱的高度;框架模型:引入框架结构计算理论,杜荣军提出用钢结构理论中的有侧移框架模型对双排脚手架进行稳定性分析,并应用于模板支撑架的计算,而对于非刚接的框架,柱的计算长度系数不能套用我国《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)中表D-1和表D-2给的计算公式和有关数值。而赵滇生于2007年提出运用有多个弹簧支座的多节间连续压杆的理论模型综合考虑水平杆及剪刀撑对稳定承载力的影响,以控制模板支架的整体稳定,该模型以能量法求解得到了支架单杆的线弹性屈曲计算公式。但模板支架因为存在材料、几何非线性以及其他缺陷,而且模板支架作为一种空间结构受到体型、边界条件等一系列问题的影响,该文仅以平面单杆模型简化分析,结论只可为高支撑架的设计和稳定计算提供参考,无法真正控制高大模板支架的整体稳定。Lightfoot和oliveto分别采用弹性屈曲分析和塑性分析方法计算模板支撑体系的稳定承载力。Huang提出了一个2-D模型和一个更为简化的闭合求解法来得到模板支架的极限承载力。熊耀莹指出,从我国进入21世纪以来,模架事故并没有因为国标《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2001)的颁布而减少,每年都有几起事故,伤亡人数均有数十人,有时一次就伤亡十多人。虽然每次事故都有这样或那样的具体问题,但问题比较集中,这是值得我们深思的:对于发生事故的省市不仅在落后地区,发生事故的企业也不仅是小企业。为此,我们不得不检查控制我国模架安全的理论与方法的“轨道”有无问题,或者说问题的根源在哪里。文献[1-10]采用精确的模板支架空间模型,对模板支架进行设计,并与实际中常用的脚手架内力简化分析方法进行计算对比,结果表明,简化分析方法存在一定的安全隐患,并对此提出了改进意见和建议。文献[1-11]以脚手架及模架整体结构构成为基点,对架体的结构简图进行几何构成分析并计算,提出了满堂红脚手架和双排架的结构要求及计算方法,并将该方法应用于实

际工程。文献 [1-12] 分析了横向支撑刚度对轴心受压钢管稳定的影响,认为当前这种支撑体系的竖向立杆均以单个步长作为杆的计算长度,将横向钢管的弹性支撑作用基本简化为固定铰约束作用,这与扣件式钢管的工作特性有较大出入,建议用稳定理论分析横向支撑作用对立杆稳定的影响。文献 [1-13] 运用 SAP2000 软件对模板支架的计算详细化,提出了一种整体计算的半刚性有限元模型,并在上海旗忠森林体育城网球中心满堂支撑架的设计上得到了实际应用。文献 [1-14] 认为,模板支撑是一个空间受力体系,支撑中的轴力和楼板内力是不断变化的,针对多层模板支撑体系的受力机理,提出了同时考虑楼板抗裂与支撑稳定性双重因素的设计模型。文献 [1-15] 通过分析双管立杆脚手架的常见构造做法,归纳总结出了不同构造做法的受力特点,提出双管立杆脚手架构造改进的具体措施,并且以一个具体工程的扣件式钢管脚手架设计为依托,列出了双管立杆扣件式钢管脚手架标准化设计的大体框架,包括设计计算的内容、计算方法和步骤等。通过前期的调研和试验研究认为,上述计算模型都是建立在小变形假定的基础上,而模板支架在正常使用状态下的初始缺陷和失稳前后的变形较大,加上节点的半刚性程度随机性也较大,凸显了小变形假定在该结构计算时的不适应性。同时,鉴于设计计算模型直接关系到模板支架的安全,故而加强对此问题的研究显得十分迫切。

1.1.3 荷载及其荷载组合的研究进展

对作用于高大模板支架空间结构体系上荷载的研究是高大模板支架空间结构体系设计的基础,高大模板支架空间结构体系是否稳定在很大程度上取决于所承受的荷载。杜荣军探讨了各类模板所受的荷载及其组合计算问题,给出了工程模板及其支架计算的常用荷载及计算项目的荷载组合,考虑了风载对模板的作用,对水平板模板及其支架的计算也考虑了振捣混凝土荷载。还有学者将英国规范中“偏心诱发荷载”的概念引用过来,建议在进行模板支架设计时考虑此荷载:支撑体系在立杆有偏心、倾斜时,以及在风荷载、输送混凝土泵管的水平力、混凝土振捣器的振动力、倾倒混凝土的作用力作用下,会产生水平向的作用力,该作用力对模板支架的稳定性会有不利影响,应该将这些作用力作为一种作用于模板支架顶部的水平荷载考虑。很明显,这与目前国内对支架诱发水平荷载的理解有所差异。F. Yue 等通过风洞试验检测了脚手架的体型系数和风荷载对架体的震动效应,并通过震动方程求解了风震系数。Jamshid Mohammadi 等介绍了在临时结构中考虑地震和风荷载的前提,并应用改进的贝叶斯定理进行了计算分析。张传敏等在文献 [1-20] 中提出,在钢筋混凝土结构工程的施工过程中,施工活荷载中的堆积荷载是主要的,但由于现场调查的数据有限,况且影响施工活荷载的因素很多,也很复杂,要得出普遍的结论,需要进一步做大量现场调查与统计分析。由于建造过程的时变性、过程性,应对作用于高大模板支架空间结构体系

的荷载进行调查、检测和分析,建立钢筋混凝土结构施工期荷载设计分析方法,提出最不利荷载组合,这将对施工中的模架体系的安全性研究产生深远的影响,但到目前为止这方面的研究却很少。模板工程设计所必需的荷载规定在目前的规范中尚没有明确说明。在模板支架承受的水平荷载计算方面,《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2001)仅考虑了水平风荷载的计算,有些地方规程参考了国外的规范,在荷载组合时考虑了水平荷载的作用,现行的英国脚手架规范规定:作用于脚手架上的荷载除了考虑已有的竖向荷载之外,还应考虑附加水平荷载,作用点在脚手架的顶层,取以下两个的较大值。

(1) 非竖直向的混凝土压力、风荷载、水压力、竖向偏心荷载(大小为1%竖向荷载)、波浪荷载、动力和冲击荷载等荷载之和。

(2) 该考虑阶段,作用在脚手架上的2.5%竖向荷载。

1.1.4 节点半刚性对高支模稳定承载力的影响研究

采用扣件式钢管、碗扣式钢管或者插销式钢管搭设的模板支架,应属于钢结构范畴,但是模架构件的连接和钢结构之间的连接形式不同。有关研究表明,扣件和碗扣等连接性能达不到刚接要求,应属半刚性连接,而节点的弯矩转角 $M-\theta$ 非线性关系又非常复杂。从20世纪30年代至今,许多学者对半刚性连接进行了研究,Rathbum (1936),Monforton 以及 Lightfoot 和 Lemessurier (1974)提出了单刚度的线性模型,Tarpy 和 Cardinal (1981),Lui 和 Chen (1983)提出了双线性模型,但对于模板支架节点的非线性特性以上方法显然是不适用的。Fyre 和 Morris 提出用多项式来表示 $M-\theta$ 关系曲线,但是这种模型可能在数值计算中会遇到出现负刚度的问题。Jones 等(1982)用B样条函数法对连接试验数据进行曲线拟合,这种方法能够解决负刚度问题而且和试验数据比较接近,不足之处在于拟合过程需要大量的原始数据。Colson 和 Louvean (1983)借鉴三参数弹塑性应力—应变模型提出了三参数的半刚性连接数值模型,丁洁民和沈祖炎(1992)为了使计算模型在结构计算中用起来方便,对半刚性节点的影响进行了定性和定量分析,提出了强化双线性节点模型。以上模型虽然对节点半刚性进行了拟合,但由于缺乏试验数据或需要大量试验数据支撑,使得以上模型都未得到广泛合理的使用。部分国家(美国、欧洲等)的钢结构规范也涉及了半刚性的问题,并在设计上提出了具体的要求和设计方法。我国钢结构规范虽然也提到了半刚性连接的概念,但对进一步如何实现半刚性连接的设计、理论、要求、标准和实施步骤均未作出说明,因而事实上也无法具体执行。由于各种连接的 $M-\theta$ 关系呈现高度的非线性,因此很难从理论上得出 $M-\theta$ 关系的一般表达式。目前,国内外关于连接性能的研究方法主要有以下几种:试验测定法、曲线拟合法、塑性分析法、解析法和有限单元法。试验测定法是研究连接性能最基本、最重要的方法。而有限元分析虽然不能完全与实际相吻合,但有限元

分析作为试验的补充,可以选择不同的单元对各种类型和不同尺寸的节点进行模拟分析,全面考虑各种因素的影响和各种非线性问题,对于节点性能的研究在计算理论和计算方法上都是一个重大的发展。节点半刚性作为模板支架的一种重要特性和研究模板支架的重要突破口,直接关系到模板支架的安全性、可靠性和经济性。我国在这方面研究的薄弱,使得模板支架的研究进展一直比较缓慢。而国内一些学者将半刚性架体简化为刚性架体进行内力计算,这种简化由于不能准确反映结构的受力状态,将导致低估了架体的侧移量而减弱了 $P-\Delta$ 效应的影响,高估了杆件连接的刚度,立杆稳定极限承载力理论值偏高而偏于不安全,有必要通过进一步的试验研究,找出节点的弯矩转角 $M-\theta$ 的关系。文献 [1-24] 考虑节点的半刚性特性,对模板支撑架结构的受力特性进行了研究,得到扣件节点的半刚性对于模板支撑架的整体水平位移和节点的内力(弯矩和剪力)具有重大的影响。在考虑节点半刚性后,节点的初始刚度大小对于模板支撑架的整体水平位移和节点的内力(弯矩和剪力)有很大的影响。

1.1.5 初始缺陷对高支模稳定承载力的影响研究

模板支架作为一种临时结构,由于其在施工过程中的随意性、易变性、欠严格性以及材料的各种缺陷,使得初始缺陷成为模板支架计算和安全控制过程中不可忽视的内容。我国现行《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)规定:在结构进行二阶弹性内力计算时,可通过在每层柱顶施加假想水平力来考虑结构整体初始几何缺陷、构件初始几何缺陷和残余应力的影响。欧洲规范 EC3 利用假想水平力来考虑结构整体初始几何缺陷的影响,水平力作用于框架每层的楼层处和屋顶处。香港地区的《钢结构设计标准》(简称 HKC)规定,框架结构的整体初始几何缺陷 $\Delta_0 = L_c/200$,在结构整体分析时在每层楼顶处作用假想水平力 $H = 0.005P$ 考虑其影响,与 GB 50017 和 EC3 不同的是,当有其他水平力(如风载或地震荷载作用)时,HKC 不考虑假想水平力的影响,只与竖向荷载组合。文献 [1-25] 通过建立平面子结构理论模型,引入了结构整体初始几何缺陷和构件初始几何缺陷,结果证明,对于弱支撑钢框架柱,结构整体初始几何缺陷和构件初始几何缺陷对弯矩的影响均可以等效为作用于楼层处的假想水平力,假想水平力为作用于该楼层竖向荷载的函数。但是,模板支架的初始缺陷与正规钢结构又有很大不同,如节点连接、材料以及组装质量等,使其难以完全照搬钢结构规范的设计方法。谢楠等对模板支架立杆初始弯曲率和壁厚进行了实测,分析了其对极限承载力的影响,发现初始缺陷对极限承载力的影响十分明显。王勇对超高扣件式钢管模板支架的安全性进行了研究,提出了受压立杆极限承载力的计算公式,并给出了不同初弯曲率时的钢管稳定系数和钢管壁厚影响系数的计算方法和取值表格。通过对模板支架的受力和构造特性的研究,进而提出一种半刚性有限元模型。袁雪霞采用线性屈曲和非线性屈曲分析方法计算支模架的稳定承载力,

结果表明线性屈曲所得的稳定承载力要大于非线性稳定计算结果,在有初始缺陷时由非线性屈曲所得的稳定承载力是合理的。对稳定承载力的影响因素进行了分析,指出支模架的初始缺陷、扣件半刚性对支模架稳定承载力的影响比较显著,扣件式钢管模板支架受载时结构位移较大,非线性(几何非线性、材料非线性)的影响十分明显,典型的破坏形式为失稳破坏。目前,关于影响模板支架结构稳定性的力学缺陷的研究较多,而关于几何缺陷的研究则较少。在对高大模板支撑体系充分调研、试验和理论研究的基础上,提出把立杆和水平杆连接节点的半刚性与体系的初始缺陷作为架体的广义初始缺陷,来研究广义初始缺陷对高大模板支撑体系稳定承载力的影响,从而建立高支模空间结构体系的安全控制理论。研究证明这种方法是切实可行的。

1.1.6 高支模足尺试验研究的进展

在试验研究方面,以沈阳建筑大学为主编制的《建筑模板工程安全技术规范》自1988年开始立项,由于缺乏试验数据的支持,直到2008年底才颁布实施;天津大学做了大量关于此方面的试验研究,《建筑模板工程安全技术规范》也参考了其部分成果。本课题组和上海宝冶建设有限公司联合对扣件式模板支撑体系开展了一系列6m高的足尺试验研究,得到特定工况下的极限承载力和失稳模式,发现模板支架在没有水平荷载作用时仍然承受一定的水平力。在研究过程中提出了用假想水平力模拟模板支架广义缺陷(初始缺陷、节点半刚性等)对支架稳定承载力的影响,分析发现水平力对架体产生的影响(变形、内力等)与考虑缺陷分析时具有较好的一致性。东南大学郭正兴教授在试验室搭设不同规模的模板支架,分级对架体顶点施加水平荷载,分析了不同的架体搭设参数下节点的半刚性程度;而现在作为《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2001)设计依据的试验还是做于1989年的双排扣件式钢管脚手架试验,由于未做满堂支架试验,有些规定并不适合支架或适应现在的情况,并且还存在着一些重要的疏漏、含混和明显失当的问题。肖焱等研究了扣件式钢管支架在大跨度空间结构中的应用,对扣件式钢管格构支架临界荷载的计算理论、设计方法和试验研究及工程应用进行了深刻的阐述。姜旭等对插盘式脚手架进行了真架的极限承载力试验,并在试验过程中考虑了二阶效应,增加了水平力,但架体高度仅为3.3m,而且未进行满堂支架的试验。北京交通大学谢楠等对一个高度大约8m的扣件式钢管模板支架进行了施工期跟踪检测,测试中检测到了可观的水平力,并认为浇筑期的混凝土荷载应视为带有一定冲击效应的可变荷载。该测试结论给出了架体稳定性验算公式,但因为该测试不能检测到模板支架的极限荷载,因此其给出的稳定性计算方法也有待商榷。

近年来,我国的港台地区和国外对门式模板支撑体系开展了大量的研究。Homes和Hindson对模板支撑架的竖向和水平向极限承载力进行了足尺寸试验

研究和理论分析。Brand 将弹性稳定理论计算的稳定承载力与模型试验结果进行对比,结果表明模板承载体系的稳定承载力应取计算长度为步距的弹性屈曲理论解。Yu 通过理论和试验分析,得出边界条件对门式模板支撑体系的稳定承载力具有显著的影响。Weesner 和 Jones 对 4 种不同形式的 5m 高模板支撑体系进行了足尺寸极限承载力试验研究,并将利用有限元软件 ANSYS 得到的支架的特征值屈曲与几何非线性分析结果加以分析对比,表明几何非线性分析计算结果更加贴近试验结果。Jui-Lin Peng 等对门式混合承重支架做了室外试验,该试验 3 步、高 5m 左右采用沙袋加载,对架体的体形(L 形、U 形等)和荷载(均布、梯形、三角形等)进行了模拟分析研究,而且在后期又做了室内单樑门架和单杆加载试验,建立了一种近似二阶分析方法。但该试验采用的门式承重架及架体构造与我国有很大不同,而且高度不足。因此,开展高大模板支架的试验研究,为现浇混凝土结构高大模板支架计算理论提供有力的数据支持,显得越来越重要。

1.1.7 高大模板支架可靠度研究进展

作为临时结构的模板支撑体系,其中存在着大量的不确定因素,总的来讲,这些不定性因素大致可分为三类:随机性、模糊性和不完善性。近年来,国内外在施工期建筑结构可靠性方面进行了研究,并取得了大量研究成果。但与施工期混凝土结构可靠性研究相比,对建筑结构中临时结构的可靠性的研究则较少。在可靠性分析方面,Lew 分析了模板设计中需考虑的各种施工荷载,提出用极限状态方法进行模板设计。孙作功通过一个典型的扣件式满堂脚手架的设计和工程统计资料,对原设计方案进行了可靠性分析,说明了基于可靠性的脚手架设计与常规脚手架设计相比,可靠性设计更具有其合理性和科学性,深度分析了构件截面抗力的统计特征,提出了材料性能的不定性、结构几何参数的不定性和计算模式的不定性是影响脚手架结构抗力的主要因素。顾样林等通过实测,统计获得了模板支撑负担面积、支撑偏斜率随机变量的统计参数,并对结构施工活荷载进行了统计分析,为施工期结构可靠度分析提供了必要基础。金伟良研究了如何评价建筑施工现场钢管支模架的安全性,在征求若干安全工程专家和支模架设计与施工技术人员的意见后,采用层次分析法设计了一套钢管支模架的现场施工安全评价系统。通过对某地 10 个建筑工程的现场考察,以调查问卷的形式向有关技术人员和施工人员收集意见,通过分析确定系统各个评价要素的权重,结合模糊综合评价方法,建立钢管支模架建筑施工安全性评价方法及其评价标准,由此获得钢管支模架建筑施工安全性的评价结果。袁雪霞提出了基于可靠度分析和模糊集理论的扣件式钢管模板支撑方案的风险分析模型,利用施工现场调研统计资料,给出了扣件式钢管模板支撑架几何参数的概率模型,但是其中涉及人为影响的因素并没有考虑,而在实际工程中人为的风险因素不可避免。因此还需要开展大量的数据调查、统计分析研究,为结构的可靠性理论提供依据。徐军平基于使用功

能对模板支架进行可靠度分析,认为模板支架可靠度对施工荷载的变化、钢管直径的变化、搭设的步距非常敏感,对搭设的横距的变化是不敏感的。

1.1.8 扣件式模板支架现场实测

对于施工期混凝土模板支撑体系的实测研究,国内外学者做了大量的试验研究。1988年,潘鼎对两栋高层结构做了现浇混凝土楼板和模板支撑荷载传递的测试分析,但测试的内容仅限于在浇筑过程中现浇混凝土楼板的弹性模量和抗压强度、模板受力情况以及楼板的挠度。模板支撑体系的力学特性并不是其测试的重点。2005年,林璋璋等对多层模板支撑体系进行了实测研究,得出模板支架设计时,立杆不但承受直接支撑楼板的荷载,还要承受上一层结构传递的荷载,模板支架的拆除时间要密切重视等结论。2006年,舒文超等对某一轨道交通高架桥箱梁的模板支撑体系进行了实测研究,探索该模板支撑系统的传力路径,为安全施工提供依据,但其仅仅是量测和分析了立杆轴力的变化规律。同年,杨俊杰等也进行了同类的测试研究,其测试范围从模板搭设、钢筋绑扎、混凝土浇筑直到养护结束,虽然持续的时间较连贯,但是测点太少,不足以把握模板支撑体系在施工期的物理特性。在国外,1994年D. V. Rosowsky针对钢筋混凝土模板支撑体系,进行了一系列调查和试验室及现场测试,探讨了获得支撑荷载和混凝土楼板养护期间有关数据的方法。1997年,D. V. Rosowsky对一个正在施工的多层混凝土结构的支撑体系进行了现场测试,发现支撑荷载在养护期间呈逐步减少的趋势,但未作进一步分析。文献[1-59]认为,在混凝土浇筑过程中,浇筑的混凝土是带有一定冲击性的可变荷载,荷载的动力效应在杆件中衰减很快,模板下立杆上部的内力比下部的大,立杆轴力最大值的出现发生在混凝土浇筑过程中,并非都在混凝土浇筑完成时。这也是大多数工程在混凝土浇筑期倒塌的原因之一。文献[1-60]对现浇钢筋混凝土结构扣件式钢管模板高支撑体系在现场施工的不同的施工阶段和施工工艺时的各立杆受力特性和各根杆件振动变形情况进行了现场实测,在对实测结果深入分析的基础上,又对模板高支撑体系进行了整体支架的有限元数值分析,得到施工中的动态荷载,如混凝土浇筑过程中混凝土泵管的水平周期性冲击作用及混凝土下落的垂直冲击作用和混凝土振捣时混凝土振动棒的振动作用对支撑架中的立杆的轴力增长规律和立杆的横向振动幅度及水平杆的竖向振动幅度都有显著的影响。振动棒振动不论是对支撑架中水平杆件的竖向振动还是支撑架中立杆的横向振动都是有影响的,一般的影响范围为6m,对水平杆件的竖向振动的影响大于同一截面处立杆的横向振动,且梁底的水平杆振动幅度最大。文献[1-61]对某公共建筑进行了现场实测,得到水平杆和剪刀撑对立杆的轴力分布具有调节作用,支撑架底部轴力与顶部轴力的大小与支撑架高度有关,支撑架高度越高,底部与顶部的轴力差异越大,水平杆与剪刀撑的调节作用越明显。当支撑立杆低于5m后,这种立杆轴力的差别变得不太明显。