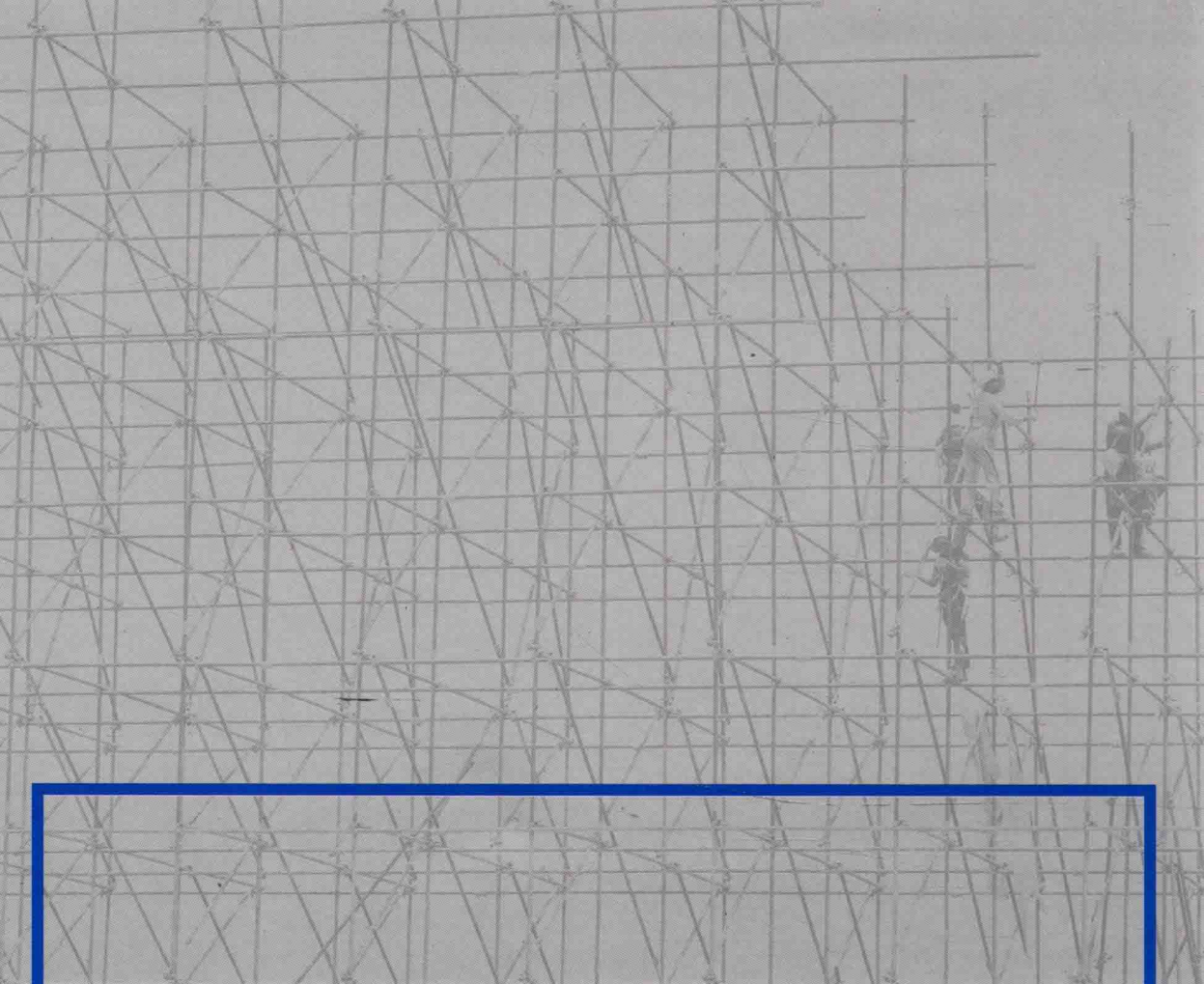




GAODA MOBAN ZHIJIA DE CHENGZAI NENGLI
JI ANQUAN YINGYONG XINGNENG YANJIU

高大模板支架的承载能力 及安全应用性能研究

胡长明 郭 艳 著

中国建筑工业出版社

陕西省教育厅专项科研计划项目 (12JK0898); 陕西省社会发展科技攻关项目 (2015SF290)
联合赞助

高大模板支架的承载能力 及安全应用性能研究

胡长明 郭 艳 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高大模板支架的承载能力及安全应用性能研究/胡长明, 郭艳著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 3
ISBN 978-7-112-20479-3

I. ①高… II. ①胡… ②郭… III. ①模板-承载能力-研究 IV. ①TU755.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 037077 号

本书对造成高大模板支撑体系坍塌的原因进行了简单的总结, 对各种形式满堂架及悬挑架的计算模型及方法研究现状、荷载研究现状、模板与支架协同工作研究现状、整架有限元分析和试验研究现状等方面进行了概述, 并在此基础上提出了本书的主要研究内容和技术思路, 展望了高大模板支撑体系的发展方向。研究了不同构造因素对高大模板支撑体系稳定承载力的影响, 基于有限元数值模拟分析, 从扫地杆搭设高度、立杆伸出顶层水平杆长度、架体搭设高度、剪刀撑搭设情况、纵横间距大小、步距大小、搭设跨数 7 个不同的构造方面出发, 分析了各构造因素对高大模板支撑体系稳定承载力的影响, 并给出了高大模板支撑体系搭设过程中各构造因素的建议做法。

本书重点突出、图文并茂, 既可作为广大模板从业人员用书, 亦可作为模板支架研究者参考用书。

责任编辑: 王华月 岳建光

责任设计: 李志立

责任校对: 焦 乐 张 颖

高大模板支架的承载能力及安全应用性能研究

胡长明 郭 艳 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

廊坊市海涛印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14½ 字数: 359 千字

2017 年 1 月第一版 2017 年 1 月第一次印刷

定价: 49.00 元

ISBN 978-7-112-20479-3

(29976)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

建筑业作为我国国民经济的支柱产业，推动着国民经济的增长和社会全面发展，城市人口的增多使得高层建筑以及大跨度多功能建筑物受到更多的青睐。模板支撑体系作为建筑施工期的临时支撑结构，在安全生产中起到重要的作用，但由于材料、管理、技术以及施工人员素质等与建筑发展不同步，模板支撑体系安全性参差不齐，导致坍塌事故频繁发生，对经济和社会发展造成了不利影响。因此，对各种形式模板支撑架的受力机理及安全应用性能进行研究具有重要的意义，本课题组成员一直致力于模板支撑架的研究工作，希望能为建筑业的健康、安全、快速发展贡献力量。

本书的研究得到了陕西省教育厅专项科研项目“插口式脚手架节点特性及单元承载能力的研究”（编号 12JK0898）和陕西省社会发展科技攻关项目“高大模板支架预警监测及其安全控制技术研究”（编号 2015SF290）的资助。在“高大模板支架空间结构体系失稳机理及其安全性控制理论研究”项目的基础上继续深入研究高大模板支撑体系。以整架试验为研究对象，通过对其竖向承载力进行破坏性试验，研究了不同构造因素对架体承载力的影响；通过大型有限元计算软件 ANSYS 对上述试验进行数值模拟验算；对直角扣件进行节点试验，采用对数非线性模型进行回归分析，确定了拧紧力矩与节点初始抗扭刚度之间的关系；结合实际施工情况，采用静态应变测试系统对施工过程中的高大模板支撑体系内部杆件的应力应变进行了现场监测，掌握其内在变化规律，进而对模板支撑体系的安全施工进行有效控制。

本书对造成高大模板支撑体系坍塌的原因进行了简单的总结，对各种形式满堂架及悬挑架的计算模型及方法研究现状、荷载研究现状、模板与支架协同工作研究现状、整架有限元分析和试验研究现状等方面进行了概述，并在此基础上提出了本书的主要研究内容和技术思路，展望了高大模板支撑体系的发展方向。

研究了不同构造因素对高大模板支撑体系稳定承载力的影响，基于有限元数值模拟分析，从扫地杆搭设高度、立杆伸出顶层水平杆长度、架体搭设高度、剪刀撑搭设情况、纵横间距大小、步距大小、搭设跨数 7 个不同的构造方面出发，分析了各构造因素对高大模板支撑体系稳定承载力的影响，并给出了高大模板支撑体系搭设过程中各构造因素的建议做法。

破坏性试验中，在架体加载至破坏且卸载的整个过程中测量了架体内部杆件（立杆、水平杆、剪刀撑）的应变大小及应变变化趋势，记录架体杆件的变形情况，分析了其失稳模态。对试验架体进行了数值分析，且将数值分析结果与试验结果进行了对比，更为直观地反映出高大模板支撑体系中不同杆件及不同构造措施对架体整体稳定承载力的影响程度。

现场应用研究中，对不同工况下满堂架及悬挑支架的应用性能进行了监测，以 95% 的保证率对施工期间施工荷载标准值进行反演，确定了对施工荷载进行选取时，施工期人

员及设备荷载标准值取 1.0kN/m^2 ，混凝土浇筑时产生的冲击及振捣荷载标准值建议取 2.0kN/m^2 。通过施工期预警监测，掌握了整个施工期模板支架内部构件的力学响应，增强了施工从业人员的安全预警意识，为工程的顺利施工提供了技术保障。

本书内容是胡长明教授、郭艳、付燎原、汪杰等人学位论文；陕西省教育厅专项科研项目“插口式脚手架节点特性及单元承载能力的研究”（编号 12JK0898）科技报告以及陕西省社会发展科技攻关项目“高大模板支架预警监测及其安全控制技术研究”（编号 2015SF290）科技报告的系统总结。

本书作者感谢其研究生对本书所述内容做出的重要贡献，如参与本课题的研究成员郭艳、付燎原、汪杰、赵云波等。本书由胡长明教授执笔撰写，现场实测部分由付燎原、汪杰、郭艳共同完成，郭艳、赵云波、宋乾坤参与了本书资料的整理工作，在此表示衷心的感谢！

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 当前国内外模板支撑体系应用概况	3
1.2 扣件式模板支撑体系	4
1.3 碗扣式模板支撑体系应用现状	5
1.4 插口式模板支撑体系应用现状	6
1.5 悬挑脚手架应用现状	6
1.5.1 悬挑脚手架定义	6
1.5.2 悬挑支撑体系高度和悬挑跨度的研究现状	7
1.5.3 悬挑模板支撑系统规范现状	7
1.6 近年来模板支撑体系安全事故及分析	8
1.6.1 近年来国内重大模板坍塌事故	8
1.6.2 事故原因分析	9
1.7 模板支撑体系的发展趋势	10
第 2 章 高大模板支撑体系稳定承载力计算理论	11
2.1 压杆稳定理论	11
2.2 轴心压杆极限承载力欧拉公式	12
2.3 压杆端部固定条件与计算长度理论	14
2.4 初始几何缺陷对轴心受压构件的影响	15
2.4.1 初弯矩对轴心受压构件的影响	15
2.4.2 初偏心对轴心受压构件的影响	17
2.5 基于有侧移框架柱理论的计算长度系数修正法	19
2.5.1 基本假定	19
2.5.2 计算长度系数的确定	19
2.5.3 考虑节点半刚性的计算长度系数修正法	21
2.5.4 程序编制及计算长度系数 μ 的确定	22
2.6 高大模板支撑体系假想水平力的设计法	24
2.6.1 钢结构三种设计分析方法	25
2.6.2 高大模板支撑体系假想水平力的取值	26
2.6.3 高大模板支撑体系立杆的稳定计算	28
2.6.4 稳定系数 φ 的研究分析	29
2.7 作用于高支模体系上的荷载及其荷载组合研究	32

2.7.1 荷载分类	33
2.7.2 荷载效应组合	33
2.8 本章小结	34
第3章 构造因素对高大模板支撑体系稳定承载力的影响	35
3.1 数值模拟基本过程	35
3.2 扫地杆的设置对高支模稳定承载力的影响	36
3.2.1 模型的选取与建立	36
3.2.2 计算分析	36
3.2.3 小结	36
3.3 立杆伸出顶层水平杆长度对高支模稳定承载力的影响	38
3.3.1 模型的选取与建立	38
3.3.2 计算分析	38
3.3.3 小结	38
3.4 搭设高度对高支模稳定承载力的影响	39
3.4.1 模型的选取与建立	39
3.4.2 计算分析	39
3.4.3 小结	40
3.5 剪刀撑的设置对高支模稳定承载力的影响	40
3.5.1 水平剪刀撑的设置对高支模稳定承载力的影响	41
3.5.2 竖直剪刀撑的设置对高支模稳定承载力的影响	42
3.6 纵横间距对高支模稳定承载力的影响	43
3.6.1 模型的选取与建立	43
3.6.2 计算分析	44
3.6.3 小结	45
3.7 搭设步距对高支模稳定承载力的影响	45
3.7.1 模型的选取与建立	45
3.7.2 计算分析	45
3.7.3 小结	46
3.8 搭设跨数对高支模稳定承载力的影响	46
3.8.1 模型的选取与建立	46
3.8.2 计算分析	47
3.8.3 小结	48
3.9 本章小结	48
第4章 扣件节点半刚性对高大模板支撑体系稳定承载力的影响	49
4.1 扣件节点半刚性特点	49
4.2 扣件连接处节点性能分析	50
4.2.1 节点试验方案设计	50

4.2.2 M 与 θ 关系	51
4.2.3 框架柱半刚接计算长度系数与直角扣件螺栓拧紧力矩关系公式	53
4.2.4 刚度修正系数	54
4.3 半刚性连接数值模型	59
4.4 结构单元刚度的推导	61
4.4.1 杆端弯矩与节点位移的关系	61
4.4.2 杆端扭矩与节点位移的关系	61
4.4.3 杆端轴向力与节点位移的关系	62
4.4.4 局部坐标系下的单元刚度矩阵	62
4.4.5 半刚性连接杆件的非节点荷载处理	63
4.5 节点半刚性对高大模板支撑体系稳定性的影响	64
4.5.1 基本假设	64
4.5.2 模型建立与计算	64
4.5.3 节点半刚性及架体二阶效应对稳定承载力的影响	64
4.6 本章小结	66
第5章 模板支架承载能力研究	67
5.1 扣件式模板支架整架试验	67
5.1.1 整架试验设计	67
5.1.2 试验现象及结果分析	76
5.1.3 数值分析与试验结果对比	100
5.2 插口式模板支架基本受力单元架试验	103
5.2.1 单元架试验设计	104
5.2.2 试验现象及结果分析	106
5.2.3 数值分析与试验结果对比	134
5.3 本章小结	137
第6章 满堂模板支架应用性能研究	139
6.1 双向受力模板支架现场应用实测	139
6.1.1 工程概况及测试内容	139
6.1.2 测试结果分析	147
6.1.3 数值模拟结果分析	163
6.1.4 测试小结	167
6.2 插口-扣件式混合模板支撑架现场应用实测	168
6.2.1 工程概况及测试内容	168
6.2.2 测试结果分析	170
6.2.3 数值模拟结果分析	179
6.2.4 测试小结	180
6.3 连续多层模板支架现场应用实测	181

6.3.1	工程概况及测试内容	181
6.3.2	测试结果分析	183
6.3.3	数值模拟结果分析	190
6.3.4	测试小结	195
6.4	本章小结	195
第7章	悬挑式模板支架应用性能研究	197
7.1	悬挑支架计算理论	197
7.1.1	支撑系统立杆的稳定性计算	197
7.1.2	悬挑脚手架立杆稳定性计算公式的提出	198
7.1.3	抗倾覆力矩验算	200
7.2	二次悬挑支架现场应用实测	201
7.2.1	工程概况及测试内容	201
7.2.2	测试方案	202
7.2.3	混凝土浇筑期测试结果分析	203
7.2.4	整个监测过程中各杆件应力影响的分析	209
7.2.5	数值模拟结果分析	213
7.2.6	测试小结	217
7.3	本章小结	217
参考文献		219

第 1 章 绪 论

随着我国经济的快速发展,建筑业作为我国国民经济的支柱产业,为推动国民经济的增长和社会全面发展发挥了重要的作用。经济蓬勃发展,城市人口越来越多,高层建筑以及大跨度多功能建筑物越来越受青睐。模板支撑体系作为建筑业施工中的重要环节,显得越来越重要。但由于管理、技术以及施工人员素质与建筑业发展的不平衡,模板支撑系统质量参差不齐,导致模板支撑系统坍塌事故频繁发生。因模板支撑系统坍塌造成的工程安全事故已成为近年来建筑业的一大顽疾。我国施工行业伤亡事故统计分析表明,模板支撑体系坍塌事故占到工程事故的 16%。在建筑业中,只要涉及安全事故检查,模板工程施工安全肯定位列其中。因此,做好模板支撑系统的安全管理,确保施工安全,对提高工程安全水平、预防重大事故发生具有十分重要的意义。每一次事故的发生,每一个生命的不幸,都警示我们建筑行业的研究人员,要找出原因,解决问题,为建筑业的健康、安全、快速发展贡献力量。

在实际工程建设过程中,作为临时承重结构的模板支撑体系起着非常重要的作用,搭设质量合格的模板支撑体系不仅能够使工程能顺利完工,而且还对工程质量起着至关重要的作用,但施工过程中,由于模板支撑体系是临时承重结构,使得很多施工人员在对其进行搭设过程中出现少搭、漏搭、采用磨损较为严重的材料(如已经严重锈蚀的钢管)进行搭设,或者由其他工种工人进行搭设等现象,从而造成了模板支撑体系搭设的不合格,这种不合格的模板支撑体系所支撑的混凝土结构在施工时是非常危险的。

《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》中并没有明确地对高大模板支撑体系进行定义,但对比 2001 版和 2011 版的《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》可发现部分对高大模板支撑体系的描述有所不同。在 2001 版的规范 6.8.2 中规定:高于 4m 的模板支架,其两边与中间每隔四排立杆从顶层开始向下每隔 2 步设置一道水平剪刀撑;在 2011 版的规范,则对脚手架及支撑架进行了区分,并就满堂搭设的支撑架在 6.9.3 条中做出了规定:在竖向剪刀撑顶部交点平面应设置连续的水平剪刀撑。当支撑高度超过 8m,或施工总荷载大于 15kN/m^2 ,或集中线荷载大于 20kN/m 的支撑架,扫地杆的设置层应设置水平剪刀撑。水平剪刀撑至架体底平面距离与水平剪刀撑间距不宜超过 8m。如果以《建设工程高大模板支撑系统施工安全监督管理导则》中对高大模板支撑体系的定义来看,2011 版的《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》实质上是认可导则中对高大模板支撑体系的定义的,也正因如此才会通过增加水平剪刀撑的搭设来加强对构造的要求。

《危险性较大的分部分项工程安全管理办法》建质[2009]87 号中危险性较大的分部分项工程范围中则指出混凝土模板支撑工程搭设高度 5m 及以上;搭设跨度 10m 及以上;施工总荷载 10kN/m^2 及以上;集中线荷载 15kN/m 及以上;高度大于支撑水平投影宽度且相对独立无联系构件的混凝土模板支撑工程。且在超过一定规模的危险性较大的分部分项工程范围中指出混凝土模板支撑工程搭设高度 8m 及以上;搭设跨度 18m 及以上;施工

总荷载 15kN/m² 及以上；集中线荷载 20kN/m 及以上。可见，虽然没有明确的规范定义高大模板工程，但对其危险性的认识及预判在不断进步。

近年来模板支撑体系安全事故仍居高不下，住房和城乡建设部通报的 2015 年全国共发生房屋市政工程生产安全事故 442 起、死亡 554 人，比 2014 年同期事故起数减少 80 起、死亡人数减少 94 人，同比分别下降 15.33%和 14.51%。2015 年，全国共发生房屋市政工程生产安全较大事故 22 起、死亡 85 人，比去年同期事故起数减少 7 起、死亡人数减少 20 人，同比分别下降 24.14%和 19.05%，未发生重大及以上事故，具体数据见表 1-1。

2014 年及 2015 年房屋市政工程安全事故汇总 表 1-1

	1 月	1~ 2 月	1~ 3 月	1~ 4 月	1~ 5 月	1~ 6 月	1~ 7 月	1~ 8 月	1~ 9 月	1~ 10 月	1~ 11 月	1~ 12 月
14 年事故起数	25	36	91	138	193	243	295	355	407	452	490	522
15 年事故起数	26	30	67	111	172	206	248	292	344	384	424	442
14 年事故死亡人数	31	44	102	160	231	287	347	422	481	538	588	648
15 年事故死亡人数	28	39	85	144	215	258	318	371	431	478	532	554
14 年较大事故起数	1	2	2	4	8	9	12	16	16	18	22	29
15 年较大事故起数	0	1	3	7	7	10	13	16	16	17	21	22
14 年较大事故死亡人数	5	8	8	14	29	32	41	53	53	62	74	105
15 年较大事故死亡人数	0	8	14	29	29	40	55	65	65	69	82	85

2015 年，房屋市政工程生产安全事故按照类型划分，高处坠落事故 235 起，占总数的 53.17%；物体打击事故 66 起，占总数的 14.93%；坍塌事故 59 起，占总数的 13.35%；起重伤害事故 32 起，占总数的 7.24%；机械伤害、触电、车辆伤害、中毒和窒息等其他事故 50 起，占总数的 11.31%（图 1-1）。

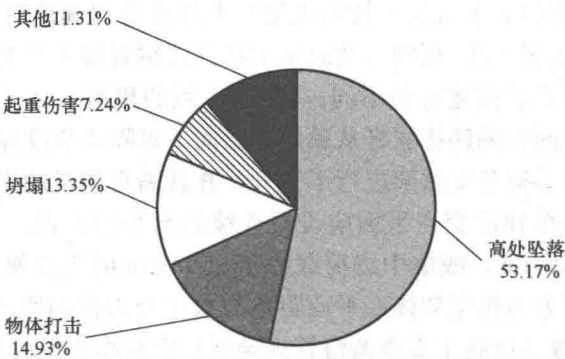


图 1-1 2015 年事故类型情况

2015 年，共发生 22 起较大事故，其中土方坍塌事故 8 起，死亡 25 人，分别占较大事故总数的 36.36%和 29.41%；模板支撑体系坍塌事故 6 起，死亡 32 人，分别占较大事故总数的 27.27%和 37.65%；起重机械伤害事故 4 起，死亡 15 人，分别占较大事故总数的 18.18%和 17.65%；钢结构坍塌事故 1 起，死亡 4 人，分别占较大事故总数的 4.55%和 4.71%；外脚手架坍塌事故 1 起，死亡 3 人，分别占较大事故总数的 4.55%和 3.53%；

气体中毒事故1起,死亡3人,分别占较大事故总数的4.55%和3.53%;吊篮坠落事故1起,死亡3人,分别占较大事故总数的4.55%和3.53%(图1-2)。

通过对2014年和2015年建筑施工安全生产事故的统计分析不难看出:虽然我国建筑业技术水平有了整体提升,但是由于模板支撑体系倒塌所造成的工程事故率依然很高。

为减少在施工过程中因模板支撑体系坍塌而造成的损失,越来越多的工地在进行较为重要的结构施工时不再单一地只考虑使用扣件式钢管模板支撑架,转而采用其他形式的新型模板支撑体系,如插销式模板支撑架、插口式模板支撑架、安德固脚手架等。由于现阶段对于承插式、插口式钢管模板支撑架的

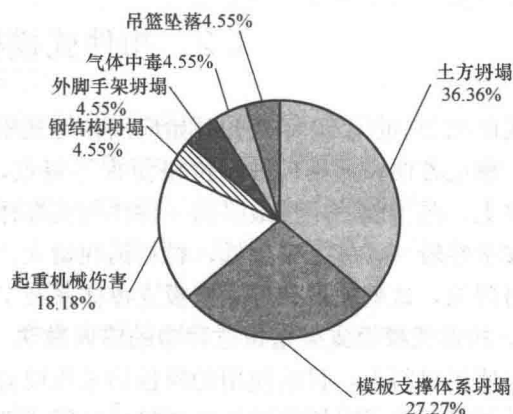


图1-2 2015年较大事故类型情况

研究并不深入,对其空间工作机理的研究也较少,而实际工程中却已开始应用,因此为保证插口式模板支撑架在施工过程中的安全性,对其进行相关性能的研究就变得非常重要。

1.1 当前国内外模板支撑体系应用概况

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。就系统构成而言,高支模工程和一般模板工程一样,主要有面板、木檩条、支架三部分。就力学分析而言,各种模板面板、木檩条的受力及变形特征相差不大;而支架部分由于构造的差异,力学特征差异则比较明显。在国内,目前建筑业所使用的高支模支架体系主要由以下几种:

(1) 扣件式钢管模板支架:主要是利用 $\phi 48\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 钢管和与之配套的扣件组合而成,具有构造灵活、方便使用等优点,在我国建筑业中占有绝对的比重。

(2) 门式钢管支架:日本、新加坡、美国等太平洋沿岸国家普遍使用;我国台湾、香港等地区也普遍使用;近年来在内地也有使用,尤其是在装饰工程中。

(3) 碗扣式钢管架:由于其连接简单可靠,是“建筑业十项新技术”中推广的一种新型支架体系;但由于使用成本、构造灵活性等因素,在一般房屋建设中使用不太广泛。

在上述三种模板支架中,目前和今后相当长一段时间内,扣件式钢管模板支架仍将是建筑业混凝土结构施工的最主要支架形式,近年来国内所发生的结构工程安全事故及质量事故也都出在这种模板支架上。因此本书主要针对扣件式模板支撑体系进行分析。

近年来,高大模板支撑体系稳定性能的研究取得了长足的进步,且在研究的过程中,其定义也发生着相应的变化。20世纪90年代《广东省建筑工程高大支撑模板规定》中指出高支撑模板系统(即“高支模”)是指高度大于或等于4.5m的模板及其支撑系统,而后在《建设工程高大模板支撑系统施工安全监督管理导则》中则对高大模板支撑体系做出了新的诠释。导则中指出高大模板支撑体系是指建设工程施工现场混凝土构件模板支撑高

度超过 8m, 或搭设跨度超过 18m, 或施工总荷载大于 15kN/m^2 , 或集中线荷载大于 20kN/m 的模板支撑系统。

1.2 扣件式模板支撑体系

我国在 20 世纪 60 年代初开始应用扣件式模板支撑体系, 由于这种支撑体系具有装拆灵活、搬运方便、通用性强、价格便宜等特点, 所以在我国应用十分广泛, 其使用量在 70% 以上, 是当前使用量最多的一种模板支撑体系。但是, 扣件式模板支撑体系的最大弱点是安全性较差, 施工工效低, 材料消耗量大。且目前全国范围内生产的钢管及扣件存在不合格现象, 这就使得扣件式模板支撑体系在工程应用中存在安全隐患。

1. 扣件式模板支架搭设过程中的错误做法

在使用材料上, 目前使用的模板均采用胶合板, 支架形式为扣件式钢管支架, 材料进场时, 很多忽视了对钢管和扣件的材质进行详细的验收。

在架体搭设的过程上, 立杆接头大部分在同一个水平面上, 立杆间距很大程度上不符合规范要求, 个别立杆接长存在拉接现象, 立杆顶端支托未设置水平拉杆, 且可调拉杆普遍超长, 从而造成支撑架承载力不足; 对扫地杆的重要性缺乏正确的认识, 认为只要立杆根部不移动就可以了; 水平杆的连接多为一个方向水平杆扣接在立杆上, 另一个方向的水平杆则扣接在先搭设的水平杆上, 简单地将纵横向水平杆搭设起来, 不能形成有效的承载力框架体系, 没有考虑直角扣件拧紧力矩对于架体承载力的影响, 且施工过程中扣件拧紧程度普遍不够, 有约 50% 的扣件扭矩未达到规范规定的最低值; 对于超高部分的模板支架, 甚至有未设置水平、竖向剪刀撑的现象。

在施工顺序上, 混凝土的浇筑一般为先浇墙柱等竖向构件, 再浇梁板等水平构件, 浇筑水平构件 (梁板等) 时, 墙柱混凝土已达到一定的强度, 但支撑体系并没有与竖向构件进行有效的拉接。

在管理制度及程序上, 只重视对模板的平整度、轴线及截面尺寸的管理, 而对支架搭设的管理及验收上明显不够重视。

2. 《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2011) 对于扣件式支撑架的搭设构造要求

(1) 立杆构造要求

- 1) 每根立杆底部宜设置底座或垫板。
- 2) 支撑架底部必须设置纵横向扫地杆, 纵向扫地杆应采用直角扣件固定在距立杆底端不大于 200mm 处。横向扫地杆应采用直角扣件固定在紧靠纵向扫地杆下方的立杆上。
- 3) 支撑架立杆基础不在同一高度上时, 必须将高处的纵向扫地杆向低处延长两跨与立杆固定, 高低差不应大于 1m。靠边坡上方的立杆轴线到边坡的距离不应小于 500mm。
- 4) 满堂支撑架立杆接长除顶层顶步外, 其余各层各步接头必须采用对接扣件连接。
- 5) 立杆伸出顶层水平杆中心线至支撑点的长度不应超过 0.5m, 且满堂支撑架的搭设高度不得高于 30m。
- 6) 支撑架立杆的对接、搭接应符合下列规定:

- ① 当立杆采用对接接长时, 立杆的对接扣件应交错布置, 两根相邻立杆的接头不应

设置在同步内,同步内两个相隔的立杆接头在高度方向错开的距离不宜小于 500mm;各接头中心到主节点的距离不宜大于步距的 1/3。

② 当立杆采用搭接接长时,搭接长度不应小于 1m,并应采用不少于 2 个旋转扣件固定。端部扣件盖板边缘至杆端的距离不应小于 100mm。

(2) 纵横向水平杆的构造应符合下列规定:

1) 纵向水平杆应设置在立杆内侧,单根杆长度不应小于 3 跨。

2) 纵向水平杆接长应采用对接扣件连接或搭接,并应符合下列规定:

① 两根相邻纵向水平杆的接头不应设置在同步或同跨内;不同步或不同跨两个相邻接头在水平方向错开的距离不应小于 500mm;各接头中心至最近主节点的距离不应大于纵距的 1/3。

② 搭接长度不应小于 1m,应等间距设置 3 个旋转扣件固定;端部扣件盖板边缘至搭接纵向水平杆杆端的距离不应小于 100mm。

3) 当使用冲压钢脚手板、木脚手板、竹串片脚手板时,纵向水平杆应作为横向水平杆的支座,用直角扣件固定在立杆上;当使用竹笆脚手板时,纵向水平杆应采用直角扣件固定在横向水平杆上,并应等间距设置,间距不应大于 400mm。

4) 作业层上非主节点处的横向水平杆,宜根据支撑脚手板的需要等间距设置,最大间距不应大于纵距的 1/2。

1.3 碗扣式模板支撑体系应用现状

碗扣式脚手架系统是一种世界上使用最广泛、最成功的标准脚手架。碗扣式脚手架因其独特的自锁定功能让它在施工中更快速、安全、经济,同时也成为业界安全脚手架的典范。目前我国大量使用的是 WDJ 碗扣型多功能脚手架,该脚手架独创了带齿碗扣接头,不仅拼拆迅速,而且结构简单,受力稳定可靠,完全避免了螺栓作业,不易丢失零散扣件,并配备较完善的系列配件,功能多、使用安全、方便和经济。

其适用范围:

(1) 碗扣式脚手架目前在公路、铁路施工部门有一定使用量,通过推广,在房屋和市政施工部门逐渐替换 30%左右的扣件式钢管脚手架,改变以往采用单一扣件式钢管脚手架的局面;

(2) 适用于直接搭设的高度为 50m 以下的外脚手架,也适用于分段悬挑以及爬升脚手架的搭设的基本架体,兼作里脚手架;

(3) 适用于房屋建筑、市政、桥梁混凝土水平构架的模板承重支架;

(4) 适用于钢结构施工现场拼装的承重胎架。

随着时代的发展和社会的进步,碗扣式脚手架已成为当今我国建筑工程施工领域应用最为广泛的一种脚手架,以其大量的优点获得了非常广泛的使用量。目前,碗扣式脚手架正迅速地得到推广,在建筑工程施工中发挥着越来越重要的作用。

性能研究方面,TayakornChandransu^[1]对四个施工现场的碗扣式模板支撑架的构件垂直度、荷载偏心率及节点刚度等进行了测量与试验,指出上述因素在工程应用中大致符合对数正态分布,最后提出在理论分析中可以用三折线模型模拟碗扣式节点的弯矩-转角

关系。

1.4 插口式模板支撑体系应用现状

插口式钢管模板支撑架是一种新型模板支撑体系,该种类型钢管支架规格固定,立杆纵、横间距为横杆的长度,步距为立杆上固定插盘之间距离的整数倍,其力学性能与传统使用的模板支撑架形式相近,具有施工速度快、安装拆卸方便等优点,在近年来得到越来越广泛的应用,但如今建筑呈现超高、大跨且结构形式复杂多样之势,在工程实践中由于其应用时间较短,以及施工现场条件的限制,当上部需要承受较大荷载、工期紧且对支撑架稳定性以及承载力要求较高的混凝土工程施工时,插口式钢管支架有时不能够满足实际工程的需要,并且国内外对其力学性能的研究较少,使用中可借鉴目前国内外对扣件式、碗扣式及插销式钢管模板支撑架的研究成果,但应具体应用具体分析,不可直接套用。为保证施工过程中模板支撑体系的安全性,国内外研究人员针对常用施工期模板支撑体系的稳定性、施工期荷载、模板支撑体系杆件的力学性能及安全性能评估等方面进行了研究。

姜旭^[2-3]等介绍了一种新型插盘式模板支撑架,该模板支撑架实现了立横杆轴心传力、连接性能好、承载力高、适用性能强等优点。通过数值分析及试验研究结果表明立横杆半刚性连接弹簧刚度对结构承载力和刚度影响较小,可将立横杆连接节点视为铰接;对该种新型插盘式模板支撑架进行了改进,解决了模板支撑架拆卸速度慢、对搭设精度要求高的缺点,使得支架系统搭设简单快捷安全性高,并对其承载性能进行了详尽的分析。

黄强^[4]通过对插销式模板支撑架的实际应用及插销、焊耳、焊缝及节点半刚性连接等进行了研究,结果表明插销在模板支撑架正常工作中会自锁,因而不会自动向上滑出,插销不会因模板支撑架受水平侧向力作用而向上滑出,其连接性能较好;插销式模板支撑架在正常工作状态下 V 形耳及 U 形耳焊接处应力集中区的预缺陷是稳定的不会发生扩展,极少发生焊缝拉裂破坏现象;提出节点的连接刚度 K 可以取较低值,通过分析认为取 $K=20\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ 是安全合理的。

黄浩^[5]进行了两种规格插销式平面架在四种楔紧度工况下的水平力加载试验及两组基本受力单元体受力性能试验,对节点特性及单元架受力性能进行研究。他指出插销式模板支撑架在正常使用中,杆件以受轴力为主,弯矩很小,一般情况下不超过 $0.2\text{kN}\cdot\text{m}$,所以对结构性能产生影响的节点半刚性连接刚度是节点的初始连接刚度,但是节点初始切线刚度都很小,不到 $10\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$,因此在用于理论分析时将这类节点偏于安全的视为理想铰接节点;试验所得单杆极限承载力低于钢结构规范计算值 20% 以上,认为承载力降低主要是由于节点半刚性以及初始缺陷引起的。

1.5 悬挑脚手架应用现状

1.5.1 悬挑脚手架定义

悬挑模板支撑体系是在型钢悬挑脚手架和高大模板支撑体系的基础上发展起来的。型钢悬挑脚手架是指依据建筑施工需要从建筑结构上向外搭设悬挑的型钢,并在型钢上搭设

承受荷载的扣件和钢管等组成的脚手架；高大模板支撑体系是指施工现场混凝土构件模板支撑高度超过 8m，或搭设跨度超过 18m，或施工总荷载大于 15kN/m^2 ，或集中线荷载大于 20kN/m^2 的模板支撑系统；悬挑支撑体系是在悬挑型钢上搭设的高大模板支撑体系。对于型钢悬挑脚手架的稳定性计算以及满堂支撑架的稳定性计算，在《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2011) 中进行了详细的说明与规范，但对于悬挑模板支撑体系，尚未有相关规范，而工程中对于悬挑模板支撑体系的应用比较普遍，因此对于悬挑模板支撑体系的研究迫在眉睫。

悬挑模板支撑体系有两种搭设方式，一种是在型钢梁上直接搭设悬挑支撑体系，另一种是本研究创新性提出的在原有型钢悬挑脚手架的基础上，将钢管进行斜拉以增大悬挑长度的悬挑支撑体系。相对来说，第二种方法既减少了工作量，又节省了材料和工期。笔者对于此种新型架体构造方法进行了现场实测并进行了有限元模拟，验证了此种架体的可行性。同时对于悬挑模板支撑体系，本身型钢悬挑脚手架涉及的型钢悬挑梁不均匀沉降问题，高大模板支撑体系的研究涉及的稳定性问题都很复杂，在同一模型中研究这两种体系的组合就更加复杂，因此悬挑模板支撑体系的稳定性的问题是一个值得研究的课题。本书对一些工程中悬挑支撑体系的应用进行了分析讨论，为悬挑模板支撑体系的研究奠定了实践基础。

1.5.2 悬挑支撑体系高度和悬挑跨度的研究现状

规范对悬挑支撑体系的高度并未进行明确规定，但《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2011) 第 6.10.1 条指出一次悬挑脚手架高度不宜超过 20m。陈培润^[6]等对于悬挑脚手架一次悬挑高度进行了探讨，指出建筑结构外悬挑脚手架一次悬挑高度不但要考虑自身的刚度、强度和稳定性要求，还要考虑悬挑钢梁的支承结构强度和刚度条件。其通过一个具体案例，依据正常使用条件下的安全计算方法，证明了悬挑脚手架一次悬挑高度主要受外框架梁刚度和强度限制。

规范对悬挑支撑体系的跨度也未作明确规定，但工程实际中常涉及较大跨度悬挑支撑体系的应用。董璿等^[7]介绍了在工程中进行悬挑的最大跨度为 12m，其采用的方案是逐层悬挑，以达到所需要的悬挑跨度。最后他指出，大跨度悬挑脚手架不能凭经验搭设，要根据具体工程的特点和条件，建立力学模型准确求解，选用合适的结构构件，进行设计，同时还要保证体系各个节点的牢固性，做到万无一失。

1.5.3 悬挑模板支撑系统规范现状

《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2011) 中介绍了有关型钢悬挑脚手架的内容，给出了当采用型钢悬挑梁作为脚手架的支承结构时，应进行的设计计算有：1) 型钢悬挑梁的抗弯强度、整体稳定性和挠度；2) 型钢悬挑梁锚固件及其锚固连接的强度；3) 型钢悬挑梁下建筑结构的承载能力验算等。

《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ 162—2008) 对模板及其支架的设计规定：1) 连接扣件和钢管立杆底座应符合现行国家标准《钢管脚手架扣件》(GB 15831—2006) 的规定；2) 承重的支架柱，其荷载应直接作用于立杆的轴线上，严禁承受偏心荷载，并应按单立杆轴心受压计算；钢管的初始弯曲率不得大于 $1/1000$ ，其壁厚应按实际检查结果计

算；3）当露天支架立柱为群柱架时，高宽比不应大于5；当高宽比大于5时，必须加设抛撑或缆风绳，保证宽度方向的稳定。

《建筑施工临时支撑结构技术规范》（JGJ 300—2013）规定：1）悬挑支撑结构的悬挑长度不宜超过4.8m；2）悬挑支撑结构的杆件布置应满足 $B \geq B_t$ ， $L \geq 2B_t$ ，其中B为结构内架体长度； B_t 为悬挑部分长度；L为悬挑支撑结构的宽度；3）落地部分架体应满足框架式或桁架式支撑结构的构造要求；4）平衡段除应满足框架式或桁架式支撑结构的构造要求外，还应增设剪刀撑或斜杆，使沿悬挑方向的每排杆件形成桁架。平衡段的顶层与底层应设置水平剪刀撑或满布水平斜杆；5）悬挑部分架体应沿悬挑方向的每排杆件形成桁架。悬挑部分顶层应设置水平剪刀撑或满布水平斜杆；6）水平桁架的立腹杆应使下部支撑结构的杆连续；7）单层水平桁架的高度应保证其斜腹杆倾角宜为 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ；8）水平桁架的斜腹杆布置宜使下面支撑结构立杆受力均匀一致；9）悬挑支撑结构禁止使用扣件传力。

以上相关规范，只有《建筑施工临时支撑结构技术规范》（JGJ 300—2013）对悬挑支撑结构给予了相对详细的规定，但是对于工程中很多情况，例如悬挑长度不宜超过4.8m这一要求，无法满足，同时未提及钢丝绳的重要作用。因此本文进行了相关架体的有限元数值模拟分析。

杜荣军^[8-13]着眼于脚手架的特点和安全，分别从规范脚手架结构的安全保障要求、构配件和节点的性能、架体的传载措施、荷载计算、安全承载能力验算和基本构架试验等6个方面，详细阐述了合理规范脚手架设计的必要性，因此悬挑模板支撑体系也需要科学规范的设计。

1.6 近年来模板支撑体系安全事故及分析

1.6.1 近年来国内重大模板坍塌事故

近年来国内重大模板坍塌事故见表1-2。

近年来我国重大模板坍塌事故汇总

表 1-2

事故时间	项 目 名 称	事 故 原 因	死亡人数	受伤人数
2005 年 9 月 5 日	北京“西工工程”	模板支撑体系整体坍塌	8	21
2007 年 2 月 12 日	广西医科大学在建图书馆	屋面模板支撑坍塌	7	7
2008 年 3 月 13 日	法门寺山门工程	模板中间坍塌,无剪刀撑	4	5
2009 年 5 月 12 日	河南省某工程二期核心工业区	脚手架拆除过程不当	21	9
2009 年 8 月 18 日	重庆铜梁在建水泥厂	脚手架坍塌	7	7
2010 年 1 月 3 日	云南新机场引桥路工程	脚手架整体倒塌	7	34
2010 年 1 月 12 日	安徽芜湖产业园	混凝土浇筑过程中出现坍塌	8	7
2010 年 3 月 14 日	贵阳国际会展中心	模板支撑体系局部垮塌	7	19
2011 年 7 月 31 日	黑龙江鹤岗	脚手架倒塌	1	12
2011 年 9 月 10 日	陕西西安大厦	未挂电动葫芦,脚手架坍塌	10	2