

超高大跨重荷 模板支撑体系 研究与应用

蔡雪峰 庄金平 周继忠 郑永乾 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

超高大跨重荷模板支撑体系研究与应用/蔡雪峰等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2012. 7

ISBN 978-7-112-14536-2

I. ①超… II. ①蔡… III. ①大跨度结构—模板—建筑工程—工程施工—研究 IV. ①TU755.2②TU399

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 170839 号

本书系统地论述了作者近几年来在超高大跨重荷结构模板支撑体系方面取得阶段性理论和试验研究成果, 主要包括: 模板高支撑体系事故及原因分析结果; 直角扣件和旋转扣件的节点抗扭、抗滑性能试验, 回归各种情况的本构关系研究结果; 超高大跨重荷模板支撑体系现场实测, 整体内力分析研究结果; 超高大跨重荷模板支撑体系整体性能有限元分析研究结果; 超高大跨重荷模板支撑体系的计算方法、构造要求的建议。

本书体系完整, 理论性与实用性兼顾, 可供土建类专业的工程技术人员、高等院校土建类专业教师、研究生、高年级的本科生以及相关科技人员参考。

* * *

责任编辑: 郇锁林

责任设计: 赵明霞

责任校对: 肖 剑 关 健

超高大跨重荷模板支撑体系研究与应用

蔡雪峰 庄金平 周继忠 郑永乾 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京天成排版公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 8 字数: 192 千字

2012 年 8 月第一版 2012 年 8 月第一次印刷

定价: 24.00 元

ISBN 978-7-112-14536-2

(22616)

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

随着国家经济的发展,对建筑的功能要求越来越高,超高、大跨、超重结构在工程建设中越来越多,如大型体育馆、跨海大桥、超高建筑中的转换层结构等。因此,对超高、大跨、超重结构相应的施工技术的可行性、安全性、经济性的要求也越来越高,尤其超高、大跨、超重结构模板支撑体系的设计是保证其工程质量及施工安全的关键技术。

近年来,超高、大跨结构模板支撑体系倒塌事故时有发生,其原因较复杂:模板支撑体系设计不合理、施工误差大、控制不严格,材料缺陷等原因。虽然,国家相关部门针对超高、大跨模板支撑体系制定了一些相应的控制措施,主要是通过增加一些构造措施来确保施工质量,但对设计方法、荷载取值等仍采用普通模板支撑体系的设计方法。而超高、大跨结构模板支撑体系的受力特性与普通模板支撑体系的受力特性确有较显著的区别,如弯矩二阶效应更加显著、扣件对接节点更多薄弱处。因此,对超高、大跨模板支撑体系进行系统的研究,提出更完整、可靠的设计方法和控制措施已势在必行。

目前,国内外对超高、大跨、超重结构的模板支撑体系的研究尚未深入、系统。撰写本书的目的,拟通过对超高、大跨、超重结构的模板支撑体系搭设因素建立模糊综合评价数学模型,得到各因素对承载力的影响程度,并对影响大的因素,进行施工误差分析,主要包括材料质量、扣件拧紧扭矩、立杆垂直度、立杆外伸长度、扫地杆布置、剪刀撑布置等大量的抽测,根据各因素影响程度和施工误差的概率大小,确定施工中重点控制部位和危险源;同时进行堆载试验和施工现场的实测,分析各因素对超高、大跨模板支撑内力及变形的分布规律,包括模板面板刚度、平整度、混凝土浇筑方式、支撑高度、楼(屋)面形式等。然后,在试验研究结果的基础上,采用有限元软件,分析其工作机理,并提出可供工程实践参考和运用的超高、大跨、超重结构的模板支撑体系设计方法。

超高、大跨结构模板支撑体系稳定承载力的研究,是一个复杂问题,而且其施工过程中各因素相互影响,错综复杂,诱发失稳的原因也因施工过程的随机性各工程并不相同,书中的一些论点仅代表作者对这些问题的认识,对书中存在的不足乃至错误之处,谨请读者批评指正。

本书的研究工作主要得到了福建省科技重点项目(项目编号:2007H0001)和福建省自然科学基金(项目编号:E0710001)的资助,此外还先后获得福建省发改委项目(闽发改[2007] 877号)、福建省海西重点项目(GY-HX09007)、福建省质量安全监督总站等科研项目的资助,特此致谢!

本书作者感谢他们的研究生对本书所述内容作出的重要贡献,如吴建亮、庾明贝等完成了大量的试验和计算工作,特向他们表示由衷的感谢!

本书作者感谢林增忠、林华强、戴益华、吴建雄、吴平春、林官宝等工程界的合作者们,为作者提供过工程项目实测工地,并在研究过程中给予大力支持与合作。

本书的研究工作得到福建工程学院施工教研室全体教师、福建省质量安全监督总站、福建省建工集团、中建七局三公司、福建一建建设集团的大力支持,在此表示衷心的感谢!

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 脚手架与模板支撑技术的发展概况	1
1.2 模板支撑体系的研究现状	2
1.2.1 国内扣件式脚手架与模板支撑体系的研究现状	2
1.2.2 国外研究现状	4
1.3 超高大跨重荷模板支撑体系的特点	5
1.3.1 超高大跨重荷模板支撑体系的概念	5
1.3.2 超高大跨重荷模板支撑体系的特点	7
1.4 模板高支撑体系事故及原因分析	8
1.5 本书的研究目的、内容、方法	10
第 2 章 模板高支撑构造影响因素分析	11
2.1 模板高支撑体系稳定性模糊综合评价	11
2.1.1 模糊综合评价数学模型	11
2.1.2 模板高支撑体系稳定影响因素分析	14
2.2 影响因素施工误差调查	27
2.2.1 材料	27
2.2.2 扣件拧紧扭矩	29
2.2.3 立杆	34
2.2.4 立杆外伸长度	40
2.2.5 扫地杆布置	42
2.2.6 剪刀撑布置	43
2.3 构造因素综合分析	44
2.3.1 构造因素施工误差汇总	44
2.3.2 构造因素综合分析	45
2.4 本章小结	46
2.4.1 各构造因素对模板支撑稳定性的影响	46
2.4.2 施工中各因素的误差程度	47
2.4.3 危险源确定	47
第 3 章 钢管扣件节点性能试验研究	48
3.1 扣件节点试验总体概况	48
3.2 直角扣件抗扭性能试验	49
3.2.1 试验方案	49

3.2.2	试验方法	50
3.2.3	试验现象与结果分析	51
3.2.4	直角扣件抗扭本构关系拟合	55
3.3	直角扣件抗滑性能试验	59
3.3.1	试验方案	59
3.3.2	试验方法	60
3.3.3	试验现象与结果分析	61
3.3.4	直角扣件抗滑本构关系拟合	66
3.4	旋转扣件抗滑性能试验	70
3.4.1	试验方案	70
3.4.2	试验现象与结果分析	71
3.4.3	旋转扣件抗滑本构关系拟合	75
3.5	本章小结	79
第4章	模板支撑整体性能试验	80
4.1	整体单元试验	80
4.1.1	试验方法	80
4.1.2	试验结果	81
4.2	高大模板施工现场实测	86
4.2.1	超高大跨梁底模板支撑立杆内力实测	86
4.2.2	超高大跨梁板支撑体系立杆内力实测	91
4.3	本章小结	100
第5章	高大模板扣件式钢管支撑体系整体受力性能有限元分析	101
5.1	概述	101
5.2	有限元分析模型	101
5.2.1	材料参数	101
5.2.2	分析模型	102
5.2.3	分析结果	103
5.3	算例分析	105
5.3.1	丹宁顿小镇别墅	105
5.3.2	家天下二期小学工程	105
5.3.3	福建工程学院新校区南区系部E组团工程	107
5.4	承载力影响因素分析	109
5.4.1	拧紧扭力矩 T	109
5.4.2	支撑高度 H	110
5.4.3	横杆步距 h	111
5.4.4	立杆纵距 l_a	113
5.4.5	立杆横距 l_b	113
5.4.6	初始缺陷	114

5.4.7 连墙件布置	115
5.5 实用计算方法	115
5.6 计算算例	116
5.7 结论	117
参考文献	118

第 1 章 绪 论

1.1 脚手架与模板支撑技术的发展概况

脚手架与模板支撑体系是伴随着建筑工程施工的需求而产生的，同时也是随着模板工程技术的进步而相应得到发展的。

由于工程建设的需要，许多国家都形成了各自常用的不同形式的模板支撑体系。我国目前最为常用的模板支撑体系为扣件式钢管模板支撑体系，如图 1-1 所示。它具有承载力较大、装拆方便、搭设灵活、加工简便、搬运方便、通用性强等特点。但同时也存在着扣件容易丢失、节点偏心、人为操作因素影响较大等缺点。

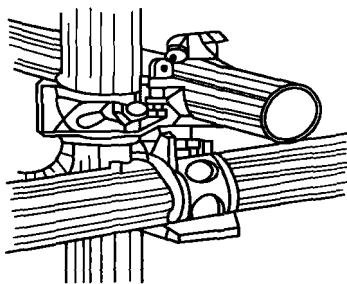


图 1-1 扣件式钢管支撑

对于模板支撑架体系的发展，要追溯到 20 世纪 50 年代，门式支架在美国首次被成功研制，如图 1-2 所示。此后在施工现场中得到迅速使用和发展，它具有承载能力好、安全可靠等相关优点。德国、法国等国家研制和应用了与门式支撑相似的梯形、四边形和三角形等模板支撑体系。在欧洲、日本等国家，目前门式支撑架是使用量最大的支撑体系，占各类支撑体系约一半左右。随后进入 20 世纪 60 年代以来，碗扣式钢管脚手架及支撑体系得到大量开发和应用，特别在欧洲各国应用较为广泛，如图 1-3 所示。目前我国对碗扣式钢管支撑架的使用量也呈增长趋势，这种支撑结构形式和扣件式钢管支撑基本相似，但比扣件式钢管支撑架体系的稳定性要高，而不足之处在于使用上，其搭设尺寸远不如扣件式钢管支撑架体系灵活方便。

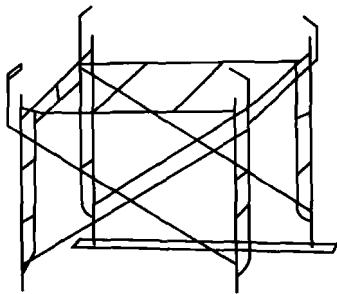


图 1-2 门式支撑

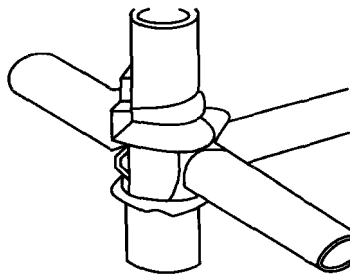


图 1-3 碗扣式钢管支撑

虽然扣件式钢管模板支撑架有着各种不足之处，且一些新型的支撑架体系也处在不断地研究并尝试实践使用中。但迄今为止，扣件式钢管支撑架在我国仍是使用量最大、应用

最普遍的支架体系，约占使用总量的 70% 以上，在今后较长时间内，这种形式的支撑架在施工中仍将占主导地位。

脚手架与模板支撑技术一直以来在国家建设中发挥了举足轻重的作用。该技术的产生和发展历史基本可以分为三个阶段：

第一阶段从 20 世纪 50 年代到 60 年代，这一阶段可称其为自然发展阶段，这也是缘于它继承了中国文化传统，以“师傅带徒弟”的形式传授搭架子工艺技术，建筑施工的需要是其发展的推动力。这个阶段正值我国的第一和第二个五年计划期间，中国大规模地进行工业化建设，由于当时的技术条件有限，基本上都是以多层民用建筑、单层工业厂房、少量的多层工业厂房和高耸结构为主。虽然受到经济条件和技术水平的限制，只有杉篙及竹木作为脚手架的主体材料，但是我国脚手架工人积极发挥传统技艺，依然较好地完成了当时各项工程建设任务，基本上保证了脚手架的施工需求^[1]。

但是，随着建筑规模的不断扩大，搭设脚手架及模板支撑架的竹木材料越来越紧缺，于是就带来了一场“以钢代木”的建筑施工领域的技术革新运动。

第二阶段从 20 世纪 70 年代末到 90 年代，以钢管脚手架为主体，我国从日本、美国、英国等国家先后引进门式钢管架等新型脚手架，此时正值改革开放，国家大兴土木，我国迎来了建设高潮，出现了“装配式大板体系”、“大模板体系”等新型钢筋混凝土结构，高层住宅和公共建筑也开始出现，由于这些新型建筑体系的出现，单纯地使用多立杆脚手架已不能再满足工程建设的需要。于是我们的脚手架与模板支撑体系研发工作者，研究开发了以钢管架为构配件的桥式架、插口架、挂架、吊篮架等一系列专用脚手架，以此来适应建筑施工的需要^[2]。

第三阶段从 20 世纪 90 年代末一直延续到现在，随着城市化进程的迅猛发展以及国家对基础设施的大力投资，特别是随着高层建筑技术的不断成熟和现代结构技术的发展，各种新型模板脚手架及应用技术不断涌现，并朝着系列化、多样化、工具化和商品化的方向迈进^[3]。在门式架、碗扣架、方塔架、插卡架等支撑形式的基础上，工程师们还研制开发出了适用于高层和超高层建筑工程的附着式升降架——爬架，形式多样，效益显著，不仅结束了高层建筑外脚手架必须“拔地而起”的落后局面，也使我国的外脚手架技术迈上了一个新台阶。

1.2 模板支撑体系的研究现状

1.2.1 国内扣件式脚手架与模板支撑体系的研究现状

1989 年，哈尔滨建筑工程学院徐崇宝教授等人^[4]对双排扣件式钢管脚手架工作性能进行了理论分析和试验研究，采用有限元方法对理想刚性节点的手脚架进行一阶弹性稳定分析，得到脚手架整架稳定的临界荷载值及失稳模态；进行脚手架整体加载试验，得到脚手架整体失稳的临界失稳状态时的荷载-位移曲线；作者得出结论：把双排扣件式钢管脚手架视为节点半刚性连接的多层多跨空间框架是正确的；脚手架是沿它的横向整体失稳破坏的；当扣件拧紧扭力矩不足时，将大大降低脚手架的稳定承载能力。

1990 年，青岛建筑工程学院袁欣平等人^[5,6]通过对水平杆的水平偏差值和立杆垂直度

偏差值的实测数据进行数理统计分析,提出了纵横杆水平度和立杆垂直度的合理偏差限值。

1991年,哈尔滨建筑工程学院黄宝魁等人^[7]在徐崇宝教授试验的基础上又更为详细地分析了影响脚手架稳定的各种因素:步距、连墙点间距、扣件紧固扭矩、横向支撑、立杆横距、纵向支撑、连墙点花排与并排、立杆纵距及水平支撑、偏心荷载等。

1994年,吉林建筑工程学院尹德生^[8,9]提出直角扣件节点抗扭刚度的试验方法及理论依据,建立更加符合实际的扣件架计算模型以及钢管截面弯矩和轴力的电测方法。

1998年,华北矿业高等专科学校张曼莉、刘晓薇^[10]采用电测法实测了扣件式钢管支撑架的立杆内力,通过对支架承载力分析得出结论:①扣件式钢管模板支撑架是经济可行的,其设计计算理论还需要得到进一步深入研究;②扣件式钢管模板支撑架的稳定承载力估算公式为 $N_k = \frac{k_0 \cdot P_{ocr}}{k \cdot k_1}$;③确保工程安全应设置剪刀撑以保证支撑体系的侧向稳定。

2000年,同济大学敖鸿斐^[11]应用有限元方法对双排落地式扣件钢管支架进行二阶弹塑性稳定分析,试验获得扣件的扭转刚度,提出脚手架的节点是半刚性连接。其试验值与理论结果吻合较好,说明二阶弹塑性理论分析更符合实际情况。

2003年,东南大学李维滨等人^[12]对7种梁底扣件式钢管支撑进行了足尺试验,试验分析的结论:①模板支架的承载力由扣件的抗滑承载力控制;②单扣件抗滑承载力设计值取8kN,双扣件抗滑承载力设计值取12kN;③扫地杆和剪刀撑可以提高模板支撑架的整体稳定性;④梁下立杆应互相拉结形成整体,增强杆底支撑的稳定性。

2004年,浙江工业大学杨俊杰、章雪峰等人^[13]通过现场实测试验,研究了不同高度支撑架内力随混凝土浇筑过程的变化规律。通过研究发现高支撑立杆不同高度轴力分布的不均匀性以及基本变化规律,发现了水平杆、剪刀撑对立杆稳定的影响规律以及混凝土浇筑路径对支撑体系内力的影响特点。

2006年,浙江大学袁雪霞、金伟良^[14]对直角扣件的抗扭刚度进行了试验研究,考虑扣件连接的半刚性特点,建立扣件式钢管支模架三维有限元模型进行稳定承载力分析,采用线性屈曲和非线性屈曲分析方法深刻地探讨了影响支模架稳定承载力的各种因素,指出扣件拧紧扭力矩为40N·m是经济合理的。

2008年,东南大学肖焱等人^[15]通过对直角扣件施加不同的扭紧力矩,对新旧扣件进行试验研究,得出扣件螺栓扭紧力矩与抗滑移的关系,并提出抗滑移系数的概念;同时指出扣件式钢管支架安装时扣件扭紧力矩必须 $\geq 40\text{N} \cdot \text{m}$ 。

2008年,姜旭等人^[16]对三跨两步脚手架体系进行试验研究,实测得到脚手架的极限承载力、破坏模态及荷载-位移曲线。采用通用有限元分析软件SAP和ANSYS对试验架体建立有限元计算模型,考虑材料非线性及结构几何非线性进行非线性极限承载力分析,并分别用弹簧单元模拟梁柱节点的转动刚度和抗滑移刚度,对弹簧单元刚度大小对整个结构进行参数分析。

2008年,胡长明等人^[17]进行扣件半刚性节点试验,得到扣件螺栓拧紧扭力矩与节点抗扭刚度关系。采用SAP 2000建立支架有限元计算模型,通过在每个节点上施加承载力0.1%的水平力模拟模板支架的初始缺陷精确计算模板支架的稳定承载力。当扣件节点螺栓拧紧扭力矩小于30N·m时模板支架的稳定承载力明显下降。

2009 年,葛召深、胡长明等人^[18]在长安大学结构与抗震实验室对 5 种工况的 6 个整架模型进行了极限承载力破坏性试验,采用手动加载和电测相结合的方法,跟踪记录了扣件式钢管模板支架整架模型结构失稳的全过程以及各构造因素的应力变化情况。研究发现:支架水平杆的应力值随剪刀撑设置的加强而减小,并显著低于剪刀撑应力,剪刀撑可以有效降低支架立杆内力分布的不均匀性。

1997 年,北京住宅开发建设集团总公司余宗明^[19]提出把钢管支模架视为杆件结构体系,采用节点铰接进行计算,先进行结构体系的几何组成分析,确定结构超静定次数,忽略多余约束进行静定计算,其结果偏于安全。

2001 年,北京中建建筑科学技术研究院杜荣军^[20]通过分析脚手架和模板支撑架事故发生的原因,得出影响脚手架和模板支撑架稳定承载力的主要因素:构架尺寸、加强整体刚度的剪刀撑的设置、节点刚度、连墙件的设置数量和刚度、杆件截面是否一致、立杆的垂直度、纵横杆的水平度、支撑面的沉降变形量。

2001 年,哈尔滨工业大学刘宗仁^[21]提出了扣件式钢管脚手架临界力下限算法,认为当扣件节点螺栓拧紧扭矩不足时,扣件式钢管脚手架更接近排架结构;按排架模型计算扣件式钢管脚手架的临界力比较安全,指出脚手架的扣件节点属于半刚性连接,扣件节点的拧紧扭矩大小对脚手架的稳定承载力影响很大。

2002 年,北京中建建筑科学技术研究院杜荣军^[22]在全面阐述了《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2001)对模板支撑架计算规定的不足,提出了“几何不可变杆系结构”和“非几何不可变杆系结构”两种扣件式钢管模板支撑架的计算模型。

2004 年,同济大学敖鸿斐、李国强^[23]对双排扣件式钢管脚手架的极限承载力研究中,提出平面节点实测刚度系数直接耦合于有限元计算模型,从而精确地模拟模板支撑架的半刚性特点。

2005 年,浙江工业大学章雪峰^[24]提出了多节间连续压杆弹性屈曲分析方法,将立杆简化为有多个弹性支座的多节间连续压杆的力学计算模型,把水平杆对立杆的约束作用用弹簧模拟。其中利用等节间等轴力的多节间连续压杆模型可以直接估算立杆的屈曲荷载。

2006 年,西安建筑科技大学刘建民、李慧民^[25]提出了扣件式钢管脚手架理想框架模型计算长度修正系数法。该方法首先对哈尔滨建筑工程学院徐崇宝等人的脚手架整架稳定承载力试验结果通过进行三维有限元计算分析,分别由临界荷载实测值通过规范的稳定系数表换算成立杆等效计算长度 l_0 ,再根据理想刚架模型通过有限元模拟计算得到的临界荷载值由欧拉公式换算成立杆的计算长度 l_1 ,将两者的比值 $\mu=l_0/l_1$ 作为立杆计算长度的修正系数。

2000 年,台湾朝阳大学 Huang^[26,27]提出 2-D 模型和简化闭合求解法来计算模板支撑架的极限承载力。

1.2.2 国外研究现状

1952 年,瑞典学者 Nielsen^[28]首次提出精确分析模型,指出承担荷载传递的模板支撑系统是连续均匀分布的弹性支撑,支撑楼板是弹性板,该模型可同时求得模板支撑体系的支撑杆轴力和楼板的内力。

1984年,北美研究者 Ayyub^[29]提出,由于施工设计准则与施工过程不当引起事故占施工总事故的50%。引起倒塌的原因主要是:支撑设置不够,早龄期混凝土养护时间不够,施工荷载估计不当等。

1986年, Hadipriono 和 Wang^[30,31]对近23年来在美国发生的85起脚手架倒塌事故原因进行分析,并将原因归纳为内部和外部两种因素。其中内部因素是指引起结构事故发生的设计计算和施工缺陷,而外部因素是指诱发结构事故发生的外因如材料设备堆积过于集中和撞击力等。

1993年,美国学者 D. V. Rosowsky^[32]等提出由于早拆模时混凝土还未达到28d龄期,一旦拆去支撑后,混凝土板自身的刚度和承载力还不足以抵抗板上的荷载引起的作用,而造成楼板本身的一系列事故问题。

1994年, D. V. Rosowsky, D. Hoston 等^[33]研究了施工活荷载的测试方法,可以分析混凝土浇筑时引起的动态冲击荷载等较为复杂的施工活荷载,真实记录施工活荷载随时间的变化规律。

1994年, D. V. Rosowsky 和 W. F. Chen 等人^[34]在考虑施工期现浇多层混凝土板柱受弯破坏失效、受冲切破坏失效和过度变形失效三种形式的情况下,用蒙特卡罗数值模拟方法对多层混凝土板柱进行施工期可靠性分析,并应用分项系数思想建立施工期结构构件安全检查的表达式,充分考虑施工周期和施工方法的影响。

1995年, S. L. Chan, Z. H. Zhou, J. L. Peng^[35]通过杆件的有效长度考虑了节点刚度的影响,从而建立了基于弹性屈曲的结构稳定分析方法。

1996年,美国研究者 J. L. Peng 等人^[36]通过数值模拟得到各种荷载形式下模板支撑架的承载力,并通过调查得出施工荷载形式的多样性对模板支撑架内力以及板的弯曲影响是最主要的。

2001年, S. L. Chan、A. D. Pan 和 W. F. Chen^[37]建立了杆件近似分析方法,通过理论推导得出杆件的荷载位移关系方程,并评定这一方法在钢管脚手架设计和分析应用中的适用性问题。

英国 Godley 等人^[38]分别比较了脚手架二维和三维计算模型的不同,指出在脚手架动力特性研究时要注重考虑节点的半刚性。同时, Godley 等人^[39]提出考虑节点非线性对脚手架体系进行二阶几何非线性分析。

美国 Weesner 和 Jones^[40]对高度5m的不同形式的脚手架进行足尺极限承载力试验研究,并用 ANSYS 对脚手架进行特征值屈曲和几何非线性分析,结果认为几何非线性分析的手脚手架极限承载力值低于特征值屈曲分析,但与试验承载力相近。

1.3 超高大跨重荷模板支撑体系的特点

1.3.1 超高大跨重荷模板支撑体系的概念

超高大跨重荷模板支撑体系,系指建设工程施工现场混凝土构件模板支撑高度超过5m,或搭设跨度超过18m,或施工总荷载大于 10kN/m^2 ,或集中线荷载大于 15kN/m 的模板支撑系统^[41]。

随着城市建设的日益发展，为了满足建筑的多功能性和造型美观的要求，各种超常规的混凝土结构日益增多。

北京鸟巢是世界上跨度最大的钢结构建筑，最大跨度 343m。建筑功能也多样化，赛时功能：田径、足球的比赛场地；赛后功能：国际国内体育比赛和文化、娱乐活动。坐席数：永久坐席 80000 个，临时性坐席 11000 个。图 1-4 为北京鸟巢图片。

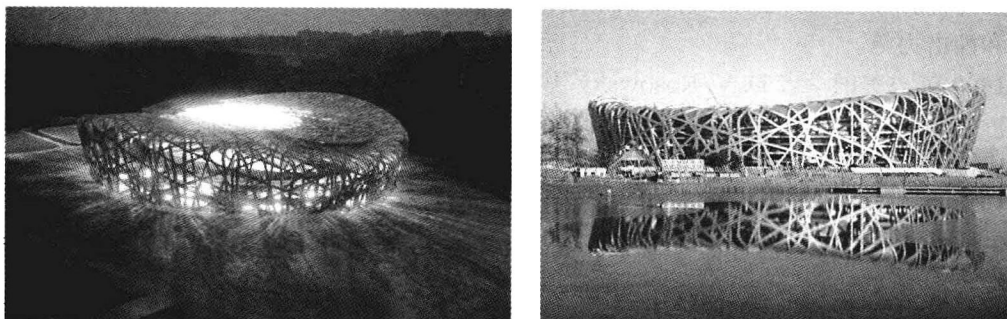


图 1-4 北京鸟巢图片

图 1-5 为上海环球金融中心，高 492m。地上 101 层，地下 3 层，2008 年建成。结构形式为钢筋混凝土核心筒，外框为型钢混凝土柱及钢柱。

图 1-6 为迪拜塔，世界第一高楼，高度超过 800m，耗材大约 33 万 m^3 混凝土和大约 3.14 万 t 钢材。楼高 160 层，49 层为办公场所，楼内设 57 部电梯，包括最高时速 64km 的世界最快电梯。



图 1-5 上海环球金融中心



图 1-6 迪拜塔

这些特殊的混凝土结构通常占地面积、空间跨度和自重都很大，使得施工中搭设的模板支撑架跨度大、高度高，而且当上部混凝土结构自身强度尚未形成时，支撑架同时还要承担混凝土结构施工时的各种荷载。因此，对超高大跨重荷模板支撑体系的设计和施工提出了更高的要求。

1.3.2 超高跨重荷模板支撑体系的特点

超高跨结构通常面积大、空间跨度大、自重大。因此，在施工中作为模板支撑的脚手架具有搭设跨度大、搭设高度高的特点。扣件式钢管脚手架支撑体系是目前建筑工程施工现场应用最广泛的支撑形式。其优点主要有：杆件配件少，杆件的长度任意，接头容易错开，构架尺寸可以任意选定和调整，斜杆和剪刀撑的角度也可以任意调节，价格较低。其缺点主要有：节点处的杆件为偏心连接，对结构有不利影响，靠抗滑力传递荷载和内力，其承载能力较低，节点处的连接力受螺丝拧紧程度的影响。但《建筑施工模板安全技术规范》(JGJ 162—2008)^[42]对超高的扣件式钢管脚手架支撑体系在立杆稳定性设计方面并没有规定，仅在构造措施上规定“当支架立柱高度超过 5m 时，应在立柱周围外侧和中间有结构柱的部位，按水平间距 6~9m、竖向间距 2~3m 与建筑结构设置一个固结点”。实际上，超高模板支撑体系与普通模板支撑体系在受力上存在一些差别，在设计中必须给予分别对待。

1. 荷载偏心影响的差别

《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2011)^[43]第 5.1.4 条规定“当纵向或横向水平杆的轴线对立杆轴线的偏心距不大于 55mm 时，立杆稳定性计算可不考虑此偏心距的影响”。因此，模板支撑系统立杆通常按轴心受压杆件进行设计。但对于超高结构中，这种偏心对立杆稳定性的影响不容忽视。但实际施工中，模板支撑系统存在很多小偏心荷载，对于超高支撑这些偏心对压杆产生的二阶效应的影响比普通模板支撑体系显著。因此对于超高模板支撑体系，水平钢管通过扣件与立杆连接产生的偏心弯矩是不可忽视的因素，而在普通模板支撑系统设计中忽视这一因素。

2. 立杆对接影响的差别

对于超高模板支撑体系，钢管对接的数量通常比普通模板多。目前规范规定计算立杆内力时不考虑此连接点的特殊情况，实际上该连接点是立杆中的薄弱环节，只要立杆稍有偏心，导致该点处变形很大。如果发生较大侧向变形时，该节点处产生弯曲变形，按照规范计算得出的临界承载力就可能比实际的临界承载力要大，产生了不安全因素。因此，在超高跨模板支撑体系中，随着对接扣件数量的增加，该因素的影响将比普通的模板支撑体系来得大。

3. 水平荷载影响的差别

泵送混凝土是目前混凝土施工的主要形式之一。其产生的水平荷载，对超高模板支撑体系产生的影响也明显大于普通模板支撑体系。

规范的设计表达式是以单杆承载力的形式出现的，但是实际控制的是结构整体失稳破坏，因为计算长度系数 μ 是由试验得到整架的极限承载力后反算出来的。单杆铰接计算理论简便可行，很容易为工程师所接受，对于按照常规要求搭设的钢管脚手架是安全可靠的。但是其引入了过多的假定：节点理想铰接，纵横杆不受力和实际情况都不符合，同时已经完成的试验研究也仅仅限于常用的搭设形式，对于超高模板支撑体系，若按现行规范的计算公式，则不能体现支撑高度的影响。比如对于支撑高度为 3m 和 10m 的模板支撑体系，如果步距均为 1.5m，立杆外伸长度也均为 0.3m，那么按现行规范算法，两种支撑的稳定承载力相同，这显然和压杆稳定理论相违背。目前，现行规范主要是通过增加构造措

施的方法来考虑高支撑的影响，在承载计算方面仍然按普通支撑的算法，但这种考虑方法，对高支撑稳定承载性存在安全隐患。

1.4 模板高支撑体系事故及原因分析

随着城市功能需求的多元化和国家市政基础设施建设的规模化，由于扣件式钢管支撑架搭设方便、快捷等特点，其在工程实践中越来越广泛地得到了应用。但是，国内建筑施工安全事故 25% 与模板支撑架有关，模板支撑和脚手架是建筑工地的重大危险源。尽管国家相继编制并颁布了九项有关脚手架的安全技术规范，占建筑施工安全技术规范总数的 42.86%，但安全事件仍频有发生。鉴于扣件式钢管脚手架及模板支撑架事故的频发，扣件式钢管脚手架及模板支撑架的安全性和经济性越来越引起人们的重视。

由于脚手架和模板支撑架是临时结构，长期以来，关于脚手架和模板支撑架的研究并没有得到学术界的高度重视，有关脚手架和模板支撑架的计算模型和设计理论的研究资料较少。一般情况下，脚手架和模板支撑架由施工单位进行设计，而施工单位往往根据工程经验进行简单设计或不设计。同时施工单位搭设脚手架也未严格地按照设计图纸，而且大部分没有设计图纸或者设计图是套用以前的模板。在搭设过程中，架子工缺乏足够的认识且未严格要求；架子工单凭个人经验和主观想法等而改变架体参数，随意改变杆件间距；减少剪刀撑和连墙件的数量；立杆底部垫块缺失和立杆垂直度偏斜过大等情况比较普遍存在。这些不足都将导致脚手架和模板支撑架的设计计算与施工现场的实际情况不相符。若在超高大跨重荷载的结构中，则一旦扣件式钢管脚手架和模板支撑架的某几个构件失稳，都将会导致整个架体结构的倒塌，产生极其严重的后果。

扣件式钢管模板支撑体系是我国建筑施工中最常见模板支撑体系之一，但是在其施工使用过程中，由于在对其结构设计计算中存在着不确定、不安全因素，并且在安全技术和传统习惯做法中也存在着不足，导致了模板高支撑架垮塌事故频发，不仅造成人身财产损失，而且对工程本身的质量造成不可低估的直接或间接影响。

2003 年 2 月 18 日，杭州市滨江区 UT 斯达康研发中心工程在浇筑门厅屋顶混凝土时，支模架发生坍塌，造成 13 人死亡，17 人受伤的重大安全事故。

2004 年 12 月 14 日，广清高速公路连接线主线工程在浇筑桥面混凝土时，支撑架发生倒塌，造成 2 人死亡，7 人受伤。

2005 年 9 月 5 日，北京西单西西工程四号地综合楼在浇筑 20 多米高楼板时，支撑架失稳，发生重大倒塌事故，坍塌面积约 400m²，造成 8 人死亡，16 人受伤。

2005 年 9 月 25 日，位于京福国道主干线福建三明际口至福州兰圃公路三明连接线的 SLA5 每列互通 A 匝道桥模板支撑架在加载预压时发生垮塌，事故造成 6 人死亡，20 人受伤的重大事故。

2006 年 5 月 19 日，位于金石滩的沈阳音乐学院大连校区的在建工地发生模板坍塌事故，造成 6 人死亡，18 人受伤。

2006 年 8 月 29 日，厦门市同安湾大桥工地发生一起高支模坍塌事故，事故造成 17 人受伤，其中 2 人伤势严重。

2007 年 2 月 4 日，厦门市福隆体育公园运动馆工程在浇筑屋面板和预应力梁混凝土

时发生整体垮塌，垮塌面积达 1150m²，29 个正在屋面施工作业的人员随之坠落，造成 4 名工人受伤，其中一人重伤。

2007 年 2 月 12 日，广西医科大学图书馆二期工程工地，发生一起在混凝土浇筑过程中屋面模板支撑体系坍塌事故。支撑体系坍塌高度约 24m，坍塌面积约 450m²，混凝土作业人员班组人员从作业面坠落并被埋。事故造成 7 人死亡，7 人受伤。

2011 年 5 月 1 日，乌审旗新建的第二实验小学建筑工地的报告厅支撑模板发生坍塌。事故造成 6 人死亡，5 人受伤。

2011 年 9 月 10 日，西安凯旋大厦脚手架发生坍塌坠落事故，造成 10 人死亡。

2011 年 9 月 26 日，湖南衡阳市中心汽车站单层机修车间发生坍塌事故。事故造成 1 死多伤。

总结以上事故实例，导致事故发生的原因主要有以下几个方面：

1. 模板高支撑的设计计算方面

模板支撑架荷载计算错误或考虑不周。设计计算正确与否，将直接影响模板支架的安全。一些施工企业编制的专项施工方案荷载计算有误；对泵送混凝土产生的动力荷载在设计计算中估计不足等，造成模板支架的安全度大幅降低；模板支架的结构恒载和施工活荷载分布情况的变化较大，因此支撑架坍塌事故的比率比其他事故高。模板支撑架有它的特殊性，如支撑工具的反复使用性和缺少相关的制约标准和规范。其原因有以下几个方面^[24]：

(1) 设计计算方法滞后。长期沿用传统的设计计算方法，半经验和半理论。《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2011)^[43]中关于普通模板支撑架和脚手架的设计计算方法，对于模板高支撑体系来讲，显得不足。由于无法准确了解扣件式钢管节点的刚度，那么高支撑体系中各立杆稳定承载力便无法计算。

(2) 不重视设计计算。设计过程中，由于设计计算不周全可能导致的高支撑架坍塌事故。主要有：无设计计算书，凭经验办事；设计计算书较粗糙，不够合理。尤其是对荷载的分析认识不清。

(3) 简化荷载的方法不够合理。一般支撑体系的计算，为了简便，通常简化以均布荷载的形式进行考虑。但真实情况荷载的分布不是均匀的，所以为了计算准确性，选择合理的计算荷载方式关键在于要如何考虑实际荷载的分布。

(4) 荷载组合考虑不够合理。在设计计算中必须考虑最大荷载处支撑架的受力情况，即荷载最不利组合，但在实际工程中，往往考虑忽略这一点。

2. 模板高支撑体系的搭设

除了考虑设计计算合理、安全、可靠等因素外，还需保证模板支撑架体系的搭设质量要求。支撑架很可能因为以下几个方面的搭设质量问题导致模板高支撑体系的垮塌：一是搭设过程中未按照设计尺寸：纵横向的排数、立杆的纵横向间距、水平杆的步距太大等，导致支撑架的整体或局部承载力不够，造成支撑架体系失去平衡、垂直垮塌。二是搭设过程中未满足支撑架的搭设构造要求：例如未按规定设置剪刀撑，未按规定高度设置斜撑；拉结点和连墙件的质量和数量不满足规范要求等。三是支撑架的搭设不符合规范、规程的基本要求，如支撑架的垂直度、立杆的接头未错开，甚至立杆的接头采取搭接、扣件松紧不一等。四是支撑架的基础不平整，局部不密实。

3. 模板高支撑架的施工现场管理不到位

一些施工企业不按规定编制模板工程安全专项施工方案，或专项施工方案无针对性和构造详图，或不按专项施工方案搭设模板支撑体系；监理单位对方案编制的审核和模板支架的验收把关不严；现场安全检查不力，对检查中发现的安全隐患问题未督促整改到位。

4. 钢管和扣件的质量问题

目前由于钢管、扣件生产及流通领域存在诸多问题，很多扣件、钢管厂家为抢占市场，低价竞争，生产的钢管支撑架质量低劣，钢管的壁厚仅有 3.0~3.2mm，而且在施工应用中，钢管随锈蚀程度的加大而进一步壁厚减薄。不仅如此，在施工现场调查时发现，钢管的平直度也较差，一些钢管已明显弯曲，致使模板支撑承载力明显降低。而在计算中按标准钢管壁厚 3.5mm 的理论值计算，这样一来，惯性矩损失将达到 10% 左右。在施工现场调查发现钢管扣件的合格率也很低。而且模板支撑架材料是周期使用工具，在反复搭设、使用、拆除、运输和存取过程中，会使其杆、配件产生一定程度的损伤，如锈蚀、弯曲、变形、连接件裂纹、螺栓滑丝(或拧不紧)等，这些都造成支撑体系中存在安全隐患。

5. 施工人员素质问题

高大模板支撑体系的搭设队伍和搭设人员资格不符合要求。目前，施工现场中，高大模板支撑架的搭设均由普通模板班组完成，而班组搭设人员未能系统良好地掌握扣件式钢管脚手架的搭设要求，较多是无证上岗，不能很好地执行《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》(JGJ 130—2011)^[43]等相关标准规范要求，给高大模板支撑体系的稳定和安全埋下重大的隐患。

1.5 本书的研究目的、内容、方法

为确保超高、大跨、超重模板支撑体系的在设计上的可靠性，同时避免施工中潜在危险源，减少超高、大跨、超重模板支撑体系倒塌事故的发生，本书通过对超高大跨结构模板支撑现场施工误差调查统计分析，确定施工中重点控制部分；通过室内单元堆载试验和施工现场实测，分析超高大跨结构模板支撑体系的内力和变形分布规律；利用大型有限元软件进行分析，并与试验结果进行对比；在试验结果、有限元分析的基础上，提出超高大跨结构模板支撑体系承载力简化计算方法和构造要求。

第2章 模板高支撑构造影响因素分析

现场施工中,模板高支撑专项方案设计编写一般由施工单位完成,然而施工单位往往基于工程经验进行简单的设计。施工班组在搭设过程中没有严格地按照设计计算图纸进行搭设,另一方面大多数支撑架的搭设在施工过程中设计图纸不是很详细。在搭设过程中,施工班组对支撑架的搭设要求认识不足或要求不严,或是架设材料供应不足;搭设工人凭借个人经验和主观想法等任意改变支架搭设参数。比如整架或局部改变构架搭设尺寸;减少杆件和连墙件的设置;基础和立杆支垫处理不好和立杆偏斜过大的情况较为普遍。这些情况的存在,都将导致模板支撑的设计计算依据与施工的实际情况不符,甚至差别显著。扣件式钢管模板支撑若在搭设高度高、承受荷载大的情况下,一旦几个构件失稳,将导致整个结构倒塌,产生的后果极其严重。

课题组调研考察采取现场踏勘、现场测量测试、查阅资料和召集相关人员座谈等方式,内容涉及施工企业管理、工程项目管理、材料、搭设状况、搭设班组、监理单位监理以及监管的方式方法等方面,结合企业自检、社会监督、政府监督中发现的问题以及几起超高大跨模板支撑坍塌事故情况,探讨高大模板支撑架的坍塌原因和防范措施。

2.1 模板高支撑体系稳定性模糊综合评价

由于客观事物本身的复杂性,信息传播途径和媒介中存在的偶然因素的干扰以及接收系统能力的限制,人们只能掌握事物的部分信息,而不知全部信息,从而使得问题呈现出不确定性。

不确定性问题又可分为客观不确定性问题、主观不确定性问题和混合不确定性问题三类。客观不确定性问题表现为客观事物的随机性和模糊性,主观不确定性表现为人们知识水平、技术水平、决策能力等所限而导致纯主观上、认识上的不确定性,即未确定性。混合不确定性则表现既有主观因素又有客观因素而产生的不确定性——灰色性^[45]。

2.1.1 模糊综合评价数学模型

灰色系统理论是由中国学者邓聚龙教授于20世纪80年代创立的研究方法^[46]。这种理论主要用于研究少数据、贫信息、不确定性等问题,且灰色系统理论对实验观测数据没有什么特殊的要求和限制^[47]。

在综合考虑各影响高支撑稳定影响因素的基础上,确定了模板高支撑方案稳定安全评价指标体系,利用层次分析法计算确定各评价指标的权重大小。

高支撑稳定性评价指标体系的确定:高支撑稳定性评价是一个系统工程,建立评估指标体系是进行模板高支撑评估的首要基础工作,其科学合理性直接影响着评估结果的准确