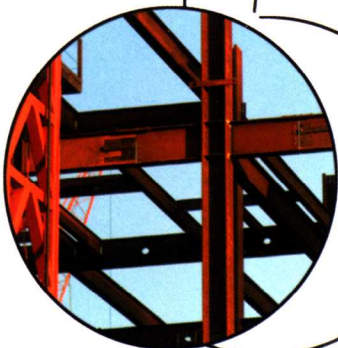


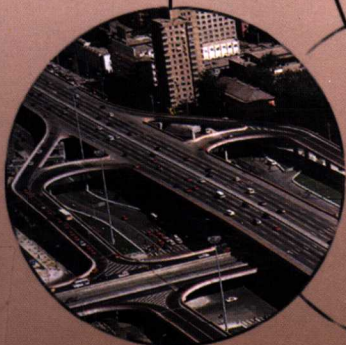


混凝土建筑结构 施工设计

HUNNINGTUJIANZHUJIEGOU SHIGONG SHEJI



赵挺生 蔡明桥 编著
李树逊 方向明



中国建筑工业出版社

混凝土建筑结构施工设计

赵挺生 蔡明桥 李树逊 方向明 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土建筑结构施工设计/赵挺生等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2004
ISBN 7-112-06416-3

I. 混... II. 赵... III. 混凝土结构—混凝土施工
N. TU755

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 027839 号

本书针对钢筋混凝土建筑施工短暂状况, 阐述早龄期混凝土结构与模板支撑体系共同作用机理、早龄期混凝土结构施工设计验算方法以及临时结构设计方法, 对控制钢筋混凝土结构施工倒塌事故、施工质量和安全性具有参考价值。

本书可作为建筑施工企业施工组织设计、钢筋混凝土结构施工短暂状况设计验算科学研究以及规范制定人员参考。

* * *

责任编辑: 郇锁林
责任设计: 彭路路
责任校对: 张虹

混凝土建筑结构施工设计

赵挺生 蔡明桥 李树逊 方向明 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市铁成印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/16 印张: 11 字数: 303 千字

2004 年 6 月第一版 2004 年 6 月第一次印刷

印数: 1—3500 册 定价: 22.00 元

ISBN 7-112-06416-3

TU · 5665(12430)

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)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

近年来,我国建筑工程质量事故呈现上升趋势,不断发生房屋倒塌、公路塌陷、桥梁跨塌等恶性工程事故,引起全社会关注。党中央国务院多次指示,要求加强建设项目管理,确保建设工程质量。2003年11月24日,国务院颁布了《建设工程安全生产管理条例》(国务院令第393号),并于2004年2月1日实施。

目前,建筑结构设计理论,是针对既定的结构对象,混凝土达到28d设计强度设计的结构物,承受设计规定的使用荷载;而施工阶段,新浇筑的混凝土重量及施工荷载,是由模板支撑和已浇好但处于养护期的混凝土梁和板所组成的临时承载系统承担,这个承载体系是一个时变结构体系,其材料性能、结构体系的形式和受力状态,都随时间而变化。施工阶段,现浇混凝土强度仍处于低于28d强度的发展期,所承受的施工荷载有时会超过正常使用的设计荷载,结构失效模式会发生改变。按适筋梁设计的钢筋混凝土构件,在施工阶段可能表现为超筋梁,由此造成施工期支模与混凝土时变结构可靠指标严重偏低。

施工阶段,现浇混凝土结构的高事故率,既反映了工程系统失效的客观规律—制造和老化阶段失效概率高,正常使用阶段失效概率低,也表明现行设计理论和方法对施工阶段现浇混凝土结构安全性分析,尚缺足够重视或者说现行设计理论还不够完善。

钢筋混凝土结构施工阶段设计是一个全新的领域,是混凝土结构设计与施工技术相融合的一门交叉学科。它是以结构力学、钢筋混凝土结构设计理论、施工技术、模板工程等学科为理论基础,以钢筋混凝土结构施工阶段现场实测、实验室试验、工程事故分析为技术支持。

本书依据作者多年的研究成果,结合钢筋混凝土结构施工实践编撰而成。第一章~第七章、附录B,由赵挺生、蔡明桥编著;第八章由赵挺生、李树逊编著;第九章~第十一章、附录A由李树逊、方向明、高升伟、丁竞炜、万龙安编著,全书由赵挺生、蔡明桥主编。字里行间凝聚着作者的博士生导师张誉教授、顾祥林教授和博士后合作导师方东平教授的心血,在此表示感谢。

上海市浦东新区建设(集团)有限公司对本书中施工阶段现场实测试验及本书的出版给予了全力支持,上海市浦东新区建设主管部门和相关施工单位也给予了支持和关心,在此一并表示感谢。

感谢中国博士后科学研究基金的资助。

限于我们的水平,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

前 言

第一章 建筑工程质量事故概述	1
第一节 概述	1
第二节 典型钢筋混凝土结构模板工程事故案例	3
第三节 钢筋混凝土建筑结构施工期的特性与设计研究范畴	6
第四节 钢筋混凝土结构施工阶段设计验算有关标准	9
第二章 施工时变结构安全分析现状	11
第一节 时变结构体系分析模型	11
第二节 施工活荷载调查与时变结构内力分布实测	13
第三节 早龄期混凝土性能	16
第四节 时变结构可靠度分析与优化设计	16
第三章 钢筋混凝土结构施工短暂状况分析	18
第一节 时变结构分析方法	18
第二节 时变结构承载机理	19
第三节 弹性支撑连续梁模型 (CBSS)	19
第四节 简化分析模型	29
第五节 梁板柱简化分析方法	34
第四章 钢筋混凝土结构楼板承担施工荷载规律	38
第一节 钢筋混凝土结构施工短暂状况的基本参数	38
第二节 施工时变结构体系的弹性特征值的影响	38
第三节 基础刚度影响	39
第四节 模板支撑薄弱层的影响	40
第五节 施工周期与拆模时间影响	41
第六节 基于施工时变结构特性的施工方案优选	42
第五章 钢筋混凝土建筑结构施工实测研究	45
第一节 测试方案	45
第二节 模板支架的内力时程	49
第三节 楼板承担的最大施工荷载	54
第四节 施工活荷载的实测统计分析	59
第五节 层间相对变形	63
第六节 测试结果总结	65

第六章 混凝土材料时变特性	67
第一节 混凝土材料强度、弹性模量的时变规律	67
第二节 早期荷载对混凝土强度的影响	71
第七章 模板支架系统性能试验研究	78
第一节 模板支架施工偏差	78
第二节 模板支架系统应力应变性能	80
第三节 小结	84
第八章 钢筋混凝土结构施工短暂状况设计验算	85
第一节 基本原则	85
第二节 荷载与荷载组合	85
第三节 钢筋混凝土结构施工设计验算基本要求	87
第四节 钢筋混凝土结构施工设计验算示例	90
第九章 基坑围护工程	101
第一节 基坑围护类型及适用条件	101
第二节 基坑设计验算	105
第十章 悬挑脚手架工程	120
第一节 概述	120
第二节 悬挑架的设计验算要点	121
第三节 荷载计算、荷载组合及基本设计规定	126
第四节 计算实例	128
第五节 脚手架安全技术措施	135
第十一章 悬挑式钢平台（受料台）	137
第一节 概述	137
第二节 设计要点	137
第三节 计算实例	146
第四节 安全技术措施	148
附录 A 某高层建筑设计施工背景资料	150
附录 B 《施工期结构设计荷载》(SEI/ASCE 37—02)	152
参考文献	164

第一章 建筑工程质量事故概述

第一节 概 述

建筑物从开始施工建造到投入使用，再到使用若干年后进入老化维修阶段的整个生命周期过程中，施工阶段因结构的不完整性、所受荷载的复杂性，以及结构抗力的不成熟性，导致结构的平均风险率最高，失效概率最大，如图 1-1 所示。

现浇混凝土结构施工，通常采用一层或多层模板支撑、二次支撑，承担新浇筑的楼层混凝土结构的重力荷载和施工活荷载。模板支撑和二次支撑，将荷载传给先前浇筑好的数层楼板上。由于施工周期短，这些承担施工荷载的楼板混凝土仍处于养护期，混凝土还不成熟。而这些承载楼层的施工荷载，有时会达到甚至超过成熟混凝土结构正常使用状态所承担的设计荷载。由此造成现浇混凝土结构质量事故增加，严重的会使模板支撑临时结构以及现浇混凝土结构垮塌。如 2000 年 10 月 25 日，南京电视台演播中心，施工期间模板支撑整体倒塌，造成 6 人死亡，11 人重伤；1981 年 3 月 27 日，美国 Harbour Cay 五层板柱建筑，在进行屋面混凝土浇筑时发生整体倒塌。

工程质量事故统计分析表明，施工阶段建筑工程失效事故，明显高于正常使用阶段。在美国，大约 57% 的工程破坏事故发生在施工阶段。俄罗斯这个比例为 70%，我国更加突出。据不完全统计，1958~1987 年间国内 285 起建筑结构倒塌事故分析表明，施工期间发生的事故占 83%，如表 1-1 所示。全国建筑工程因发生倒塌事故而死亡 3 人以上的，1991 年 13 起，1992 年 31 起，1993

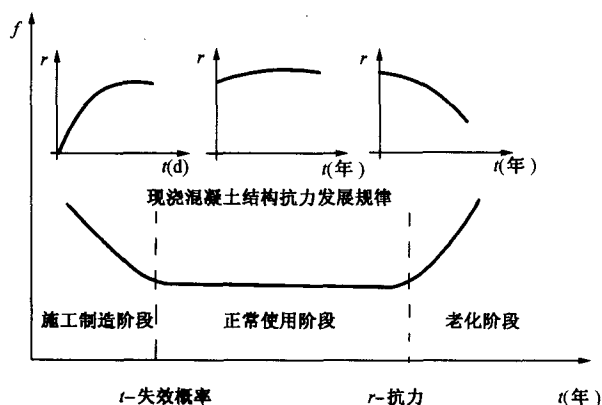


图 1-1 系统失效规律与混凝土结构抗力发展规律

1958~1987 年国内 285 起倒塌事故统计分析

表 1-1

房屋类别	倒塌起数	施工期间倒塌		使用期间倒塌	
		起 数	百分比	起 数	百分比
民用建筑	102	85	35.9	17	35.4
工业建筑	106	96	40.5	10	20.8
仓库、车库	38	33	13.9	5	10.4
构筑物	15	1	0.4	14	29.2
房屋悬挑构件	24	22	9.3	2	4.2
总 计	285	237	100	48	100

年 47 起，1995 年上半年仅上海就发生事故 25 起，死亡 30 人。据对全国近 10 年 357 起倒塌事故统计分析表明，有 78% 的事故发生在施工阶段。

Hadipriono, Wang 对美国过去 23 年 85 起施工期间发生的工程事故分析表明，有 49% 的工程事故发生于混凝土浇筑期，如图 1-2 所示。事故原因可归为触发事件、临时结构架设不当、施工程序不当三类，表 1-2 为在这 85 起工程事故中各种事故原因的统计分析结果。

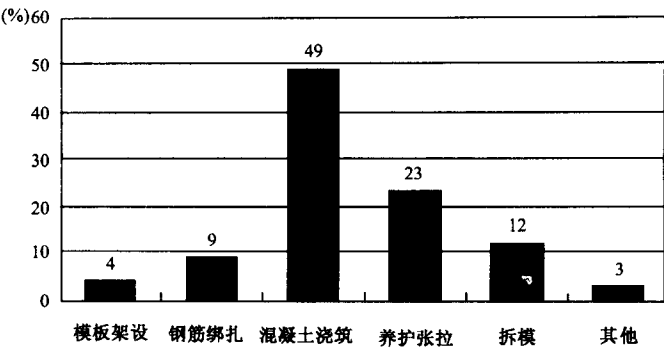


图 1-2 事故发生阶段统计

美国过去 23 年来施工阶段发生的建筑工程事故原因统计 表 1-2

事故分类		事 故 原 因	发生次数统计	
序号	原因		次 数	所占比率(%)
1	外界 触发 事件	下雨引起地基基础滑动、河水冲刷	4	4.76
		大 风	1	1.19
		火 灾	4	4.76
		操作模板设备故障	5	5.95
		模板连接故障	4	4.76
		预应力施加不当	1	1.19
		施工堆载、施加的其他荷载	4	4.76
		混凝土浇筑及施工垃圾冲击荷载	27	32.14
		施工设备产生冲击荷载	3	3.57
		附近作业产生的振动	5	5.95
		拆模不当	6	7.14
		其他未知原因	20	23.81
合 计		84	100	
2	临时 结构 架设 不当	横向支撑不足	17	16.50
		支撑配置、连接不当	23	22.33
		基础不稳	7	6.80
		设计不合理	8	7.77
		支撑数量不足	4	3.88
		二次支撑设置不合理	1	0.97
		移动设施故障	4	3.88
		施工设施安装、维护不当	2	1.94
		永久结构构件失效	1	0.97
		地基不好	4	3.88
		永久结构施工、设计不当	2	1.94
		其他未知原因	30	29.13
合 计		103	100	

续表

事故分类		事 故 原 因	发生次数统计	
序号	原因		次 数	所占比率(%)
3	施工程序不当	对临时设施的设计施工重视不够	23	24.21
		浇筑期间未对临时设施检查	22	23.16
		为拆模进行的混凝土试验不真实	2	2.11
		工人缺乏工作经验	4	4.21
		各个工作团体间联络不当	1	1.05
		施工期间临时设施设计方法改变	5	5.26
		其他未知原因	38	40.00
合 计			95	100

第二节 典型钢筋混凝土结构模板工程事故案例

建筑工程事故主要有两类,即施工过程中的质量事故、倒塌事故和建筑投入使用后的坍塌事故。建筑使用期间发生倒塌事故的主要原因是使用不当,设计、施工缺陷等;钢筋混凝土建筑施工过程中的质量事故和倒塌事故近年来时有发生,这些事故主要与模板工程密切相关,如表 1-3 所示。表面上看,这些工程事故是由模板支撑失稳引起,其实质是对模板支撑承担的荷载估计不足,对钢筋混凝土结构施工短暂状况性能把握不准。下面介绍国内外发生的几起典型模板工程倒塌与钢筋混凝土结构质量事故案例。

近年来发生的模板工程事故统计

表 1-3

时 间	地 点 项 目	原 因	伤 亡 人 数
1993.3.3	福建德化县水泥厂成品库	屋面模板支撑失稳倒塌	2人死亡,3人重伤
1993.3.4	广东揭阳市府门楼	模板支撑失稳	4人死亡
1993.4.24	重庆某学院军体棚	36m 屋面梁模板支撑失稳	2人死亡,2人重伤
1993.5.14	株洲某文体活动楼	支撑系统失稳	1人死亡,2人重伤
1993.5.21	大连市某储运仓库	模板支撑失稳	3人死亡,2人重伤
1993.8.31	福建武夷山加油站	支撑失稳、模板倒塌	7人死亡,1人重伤
1998.4.7	云南永善 35m 跨石拱桥	拱模支撑失稳	10人死亡,22人重伤
1998.3.31	青海省铝厂 33 号住宅楼	横杆滑脱	2人死亡,1人重伤
1998.3	江苏丹阳热电厂冷却库	脚手架整体倒塌	伤 6 人
2000.10.25	南京电视台演播中心	模板支撑整体倒塌	6人死亡,11人重伤
2003.10.7	广东江门新会益华商业广场	浇筑中庭 7 层屋面时模板支架整体倒塌	16人死亡,5人重伤

案例 1 Harbour Cay 多层板柱建筑

Harbour Cay 为一栋五层板柱混凝土建筑,标准层结构平面如图 1-3 所示,内柱尺寸为 250mm×460mm, A 列和 K 列边柱为 250mm×300mm,板厚度为 200mm,层高 2.6m。

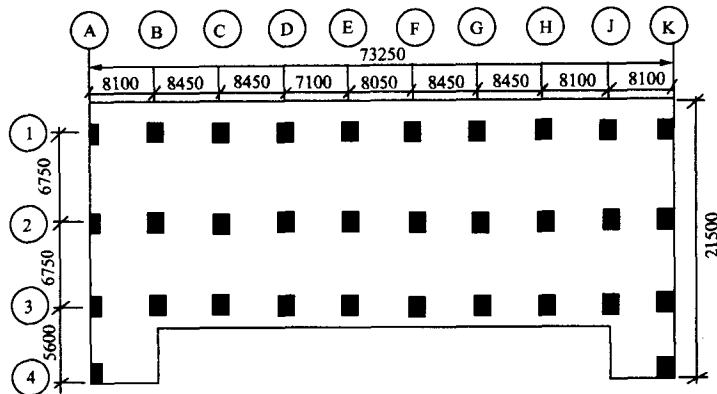


图 1-3 Harbourside 板柱建筑平面示意

采用飞模模板支撑，设三层木支柱。于 1981 年 3 月 27 日浇筑顶层混凝土时发生整体倒塌事故。如图 1-4 所示。

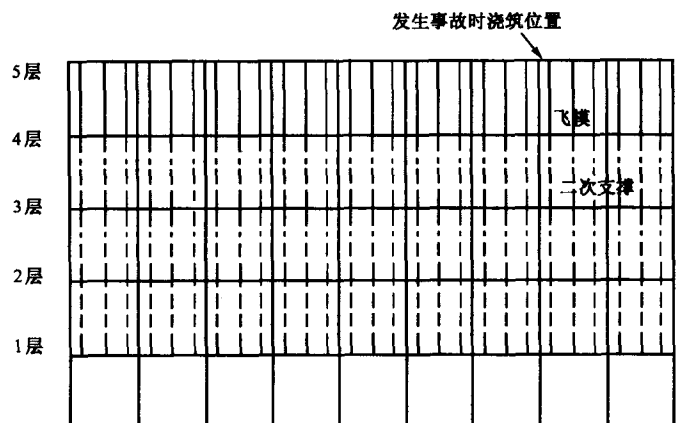


图 1-4 Harbourside 板柱建筑倒塌时的状态

事故调查研究表明，板柱连接处的抗冲切能力不足，是导致事故发生的主要原因。

案例 2 某市标准件五厂综合楼现浇板倒塌事故

某市标准件五厂综合楼，在浇筑 9m 跨度的第二层肋形楼板时，因支撑系统失稳，于 1987 年 5 月 29 日凌晨零时 45 分，突然全部倒塌，倒塌面积约 324m²，造成 1 人重伤，12 人轻伤的重大工程质量事故，经济损失约 2.5 万元。

(1) 工程概况

该工程由某三级集体施工企业施工，企业建筑设计室设计。于 1987 年 2 月 15 日开工，地基为梁式钢筋混凝土板基础。建筑面积 2900m²，两跨 5 层框架结构，跨度为 9m 和 5m，总长 42.3m，宽 14.4m，高 24.65m，柱距 4m，一层层高 8.5m，其余楼层层高 4m。

(2) 倒塌原因分析

造成这起倒塌事故的主要原因是模板支撑失稳。

该工程现浇第二层肋形楼板的底层从自然地面起支撑净高达 9m，框架支模没有按规范要求的“支架的立柱或桁架必须用撑拉构件固定，确保其稳定”制作。从现场调查看，整个支架没有一道

剪刀支撑，水平支撑不足，用两节支模的下节几乎没有水平支撑（4.0m 高），故引起上部受力后大梁移位，引起支撑移位，从而造成综合性失稳倒塌。

施工方法全凭工人的操作经验办事。这样高的现浇框架事先没有施工方案设计，没有技术交底，仅靠木工使用一般楼层 4m 高左右的支撑两节连接成 9m，两节支撑间只垫了一块通长木板，没有其他可靠的紧固连接措施，如图 1-5 及图 1-6 所示。当在施工中已出现大梁移位时，没有采取可

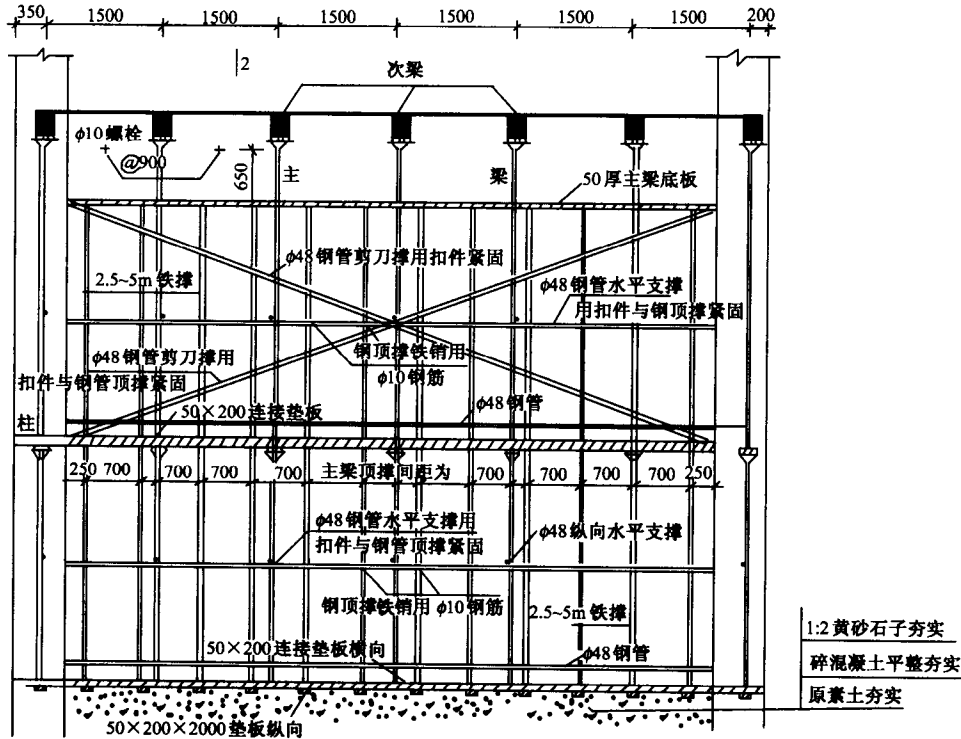


图 1-5 某工程模板工程架立状态（主梁方向）

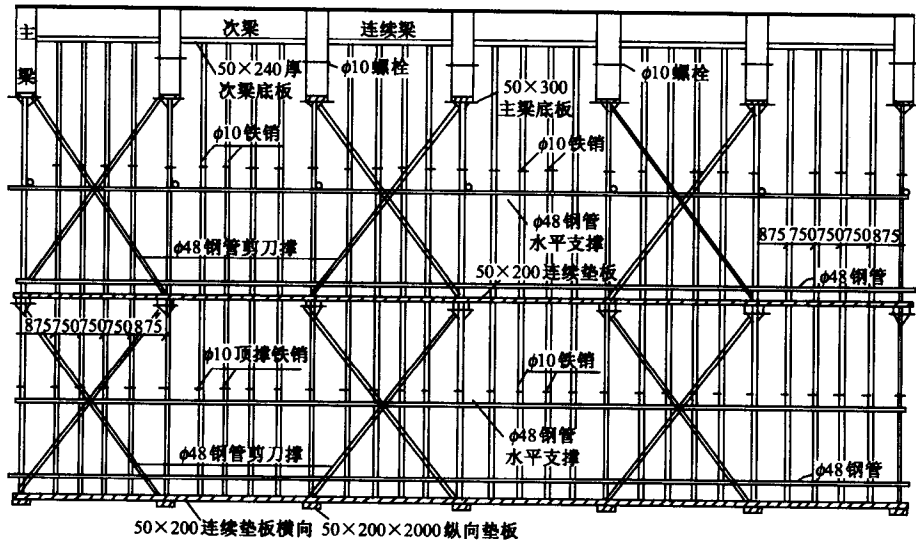


图 1-6 某工程模板工程架立状态（次梁方向）

靠有效的措施,只就事论事处理一下,导致大梁不断移位带动支架移位,加上泵送混凝土作业,冲击振动较大,施工人员过于集中,模板支架抵抗振动扭力不足,支撑立杆失稳,引起结构整体倒塌。

案例3 某桥梁厂文体楼屋面模板坍塌事故

某桥梁厂文体楼为多功能比赛厅,建筑面积800多 m^2 。主楼四角各有一个五边形钢筋混凝土薄壁井筒支撑屋盖系统。屋盖系统平面尺寸为 $40\text{m}\times 40\text{m}$,板厚80mm,结构布置采取周边4根大梁(跨度29.3m)支撑纵横方向各8根井字形次梁,整个屋盖为无粘结预应力钢筋混凝土结构。1993年5月14日晚,某工程公司正在浇筑屋面混凝土时,建筑物四周部分脚手架、井架向里倾斜,导致屋面坍塌。造成2人重伤,1人死亡,直接经济损失33.8万元。

屋盖模板支撑系统失去稳定是发生这起事故的直接原因。导致支撑系统失稳的原因是地面没有清理平整、夯实;支撑系统缺少斜撑和剪刀撑;大量底部支撑布置不合理,密度不够;扣件和架管锈蚀。

施工企业管理混乱,施工方案不规范,且未经过审批是发生事故的间接原因。

案例4 某商厦建筑施工质量事故

某商厦建筑,位于上海市九江路上,占地 2600m^2 ,建筑面积约 26000m^2 。地下2层,地上22层。为现浇钢筋混凝土框架—筒体结构体系,集商业、办公、文化娱乐于一体的综合楼。

该商厦由某设计公司设计,江苏省某建筑安装工程公司施工。土建工程于1995年8月开始施工,1997年10月结构封顶。之后因工程款纠纷而停工,2000年4月3日业主以工程质量问题,起诉工程总承包商。

该建筑楼层楼板普遍存在开裂质量问题,裂缝形态有板面的网状裂缝、板角区的斜裂缝(多为贯穿楼板的通缝)、板中央以及板边的直裂缝(部分裂缝为贯穿楼板的通缝)。

为判断裂缝的性质与产生时间,同济大学在全面勘察楼板裂缝形态的基础上,对该建筑施工过程,考虑早期钢筋混凝土结构与模板支撑共同工作采用三维有限元进行了仿真分析(详见第八章)。分析表明房屋标准层中楼板的裂缝系因为施工过程中作用在楼板上的荷载引起的弯矩大于楼板所能承受的弯矩,以及楼板的厚度偏薄所引起的。施工过程中未能很好地控制板中负钢筋的保护层厚度,既使得板面支座处的裂缝宽度较大,又影响了楼板抵抗负弯矩的能力。

第三节 钢筋混凝土建筑结构施工期的特性与设计研究范畴

一、时变结构与时变结构体系

钢筋混凝土建筑结构施工通常包括以下四道工序:①为浇筑上一层楼板而安装支架和模板;②进行钢筋绑扎;③混凝土浇筑;④拆除底层模板支撑。这四道工序构成一个施工循环,每一次施工循环,结构就增加一层,这样周而复始地施工,建筑就“生长”起来了。施工中的建筑,是随时间也即随施工工序而不断变化的,这种自身随时间变化的结构称为时变结构,它的形状、材料性能、空间位置均随时间变化,随工序的进行构件不断更替,作用在时变结构上的外荷载也在不断变化。

钢筋混凝土建筑施工中,新浇筑的混凝土重力荷载以及施工活荷载,必须通过模板支撑以及二次支撑传递到下面先前已浇好的一层或多层楼板,在每一阶段,施工荷载都由混凝土时变结构和支撑系统组成临时承载系统承担,这一临时承载系统的形状和混凝土材料性能与支模层数、施工周期密切相关,其承担施工荷载随施工工序不断变化。本文称由混凝土时变结构和支撑系统组

成的临时承载系统为时变结构体系。

二、时变结构体系荷载的时变性

模板是为浇筑混凝土而设置的挡板,包括竖向柱模板和水平向的梁模板,本文中模板指直接承担新浇筑混凝土梁板重力荷载的水平构件。由支柱、梁、连接件及斜撑等部件组成的,支撑梁、板、柱等构件的新浇筑混凝土所用的临时设施,统称模板支撑。本文中提及的模板支撑仅指其中的支柱。二次支撑是指模板支撑拆模后,重新设置的支柱。模板支撑、二次支撑的作用是将模板承担的荷载传递到下面先前浇筑好的一层或多层楼板上。直接承担模板支撑传递下来的荷载的楼层,称为支撑楼层(或支撑楼板)。

堆积在新浇筑好楼面上的材料、设备重力荷载以及施工人员、施工作业荷载、新浇筑的混凝土的静水侧向压力为施工活荷载。新浇筑的混凝土结构重力荷载以及其下的模板支撑自重为施工静荷载,施工静荷载和施工活荷载统称施工荷载。

本层混凝土浇筑完成至下层混凝土建筑完成所需的时间即为施工周期,本层模板支撑架设到本层模板支撑拆除,即为一个施工循环,一个施工循环所需时间为施工周期的倍数,直接与模板支撑层数有关。在一个施工周期内包括在新楼层进行混凝土浇筑、混凝土养护、底层支撑拆除、新浇筑楼层上架设模板支撑、钢筋绑扎各施工工序。由于作业性质不同,各工序所需施工设施、材料、施工人员数量差异较大,导致作用于时变结构体系的荷载随施工工序(即随时间)不断变化。

三、时变结构体系材料性能的时变性

钢筋混凝土建筑结构施工时变结构体系材料性能的时变性,来自于早龄期混凝土中水泥水化反应还未完成,混凝土未经充分养护,早龄期混凝土强度和弹性模量处于发展阶段,随时间逐渐增长,钢筋混凝土结构构件的受力性能,也随时间变化。影响混凝土强度以及弹性模量时变性的主要因素,有水泥性能、添加剂、混凝土拌制温度、混凝土配合比、养护温湿度、养护时间以及施工荷载作用等。过大的施工荷载直接引起早龄期混凝土损伤,影响混凝土的强度以及弹性模量,这也是钢筋混凝土建筑结构施工不可避免的,本书将在第六章作简要介绍。

四、钢筋混凝土结构施工设计研究内容

钢筋混凝土建筑结构施工期间,施工荷载由模板支撑、二次支撑和由支撑相互连接的一层或多层楼板组成的时变结构体系承担,其结构形状、材料性能、空间位置和环境作用以及构件也在随时间和施工工序不断变化。

任何结构体系都是为承担荷载设计的,合理地确定作用于施工时变结构体系上的荷载,是保证结构体系安全的基本前提。施工时变结构体系,是由早龄期混凝土结构和模板支撑组成的临时承载体系,早龄期混凝土结构是建筑设计对象的早期形态,必须进行施工阶段的安全检验。施工荷载的统计,应面向模板支撑设计,面向早龄期混凝土结构安全检验为目标。模板、支撑的跨度 L_s 远小于混凝土结构跨度 L_c ($L_s \approx 1/5 \sim 1/3 L_c$),施工活荷载的统计分析,应兼顾模板支撑小跨度临时结构的设计和大跨度早龄期混凝土结构的安全检验的需要。

目前建筑设计理论,是针对给定的、已知的、不变的结构。结构所受的荷载是已知的,静荷载不随时间改变,动荷载随时间按已知的规律(包括随机)改变。钢筋混凝土建筑结构施工时变结构体系,作为材料性能和结构形状随时间改变的结构,超出了传统建筑设计理论研究范畴。钢筋混凝土建筑结构时变体系工作性能的现场实测研究,就成为认识施工时变结构体系中模板支撑与早龄期混凝土结构共同作用规律的重要手段,是研究钢筋混凝土建筑结构施工时变结构体系分析模型的基础。

钢筋混凝土建筑结构施工安全性分析的目的是为安全、经济、高效地施工提出技术保障。早期混凝土结构作为建筑结构设计产品的早期形态，不可能因施工而临时更改，高层建筑施工安全控制的途径是通过设计合理支模层数、施工周期，来保证承担施工荷载的每层楼板、模板支撑不会超载。

由此构成钢筋混凝土建筑结构施工时变结构体系的研究范畴，如图 1-7 所示。本书着重就施工时变结构体系中模板支撑与早期混凝土结构相互作用性能进行阐述，同时介绍其施工设计验算和临时结构设计。

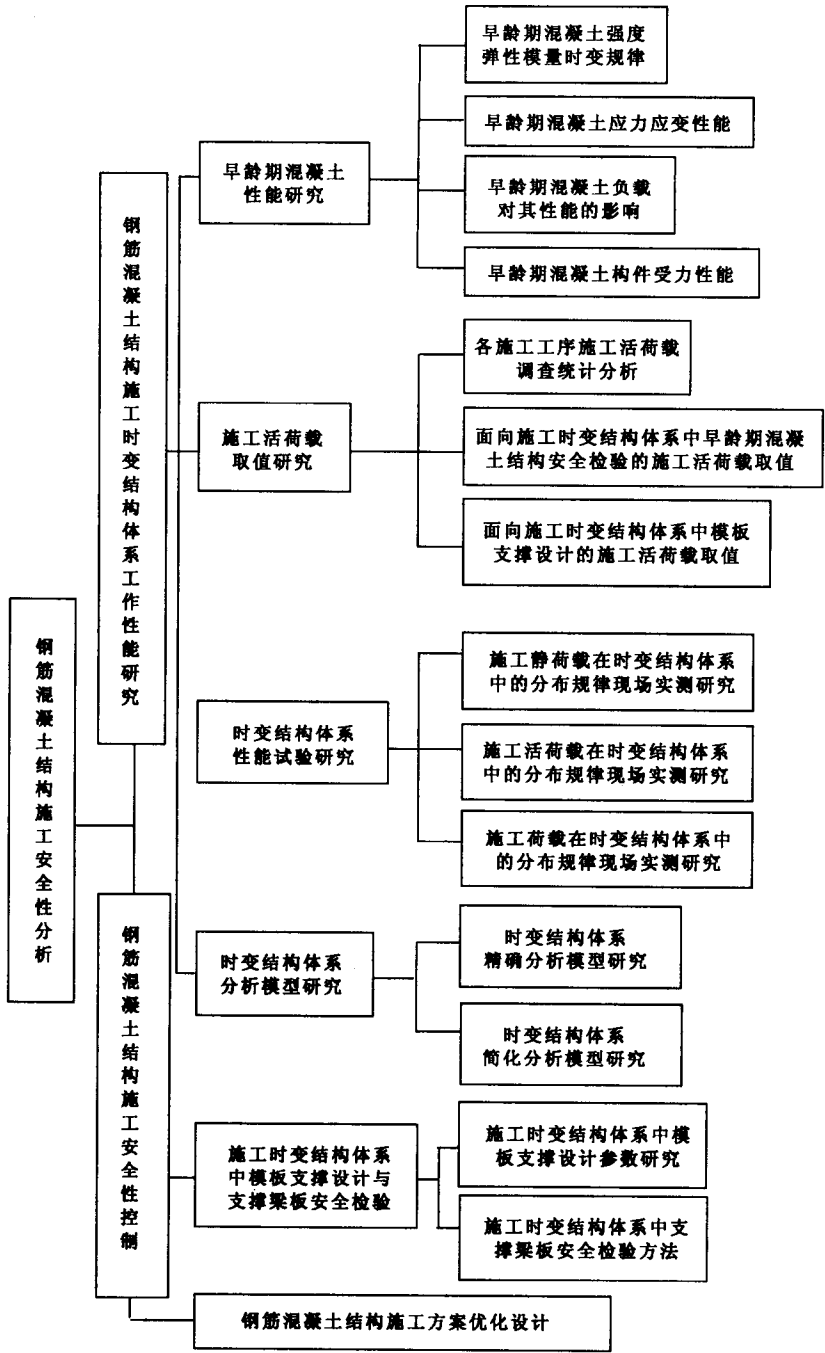


图 1-7 钢筋混凝土结构施工阶段设计分析内容

第四节 钢筋混凝土结构施工阶段设计验算有关标准

《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)作为建筑结构设计的一部母法,对钢筋混凝土建筑结构施工阶段设计验算作出了明确规定。其中第3.0.3条规定“建筑结构设计时,应根据结构在施工和使用中的环境条件和影响,区分下列三种设计状况:

1. 持久状况。在结构使用过程中一定出现,其持续期很长的状况。持续期一般与设计使用年限为同一数量级;
2. 短暂状况。在结构施工和使用过程中出现概率较大,而与设计使用年限相比,持续期限很短的状况,如施工和维修等。
3. 偶然状况。在结构使用过程中出现概率很小,且持续时间很短的状况,如火灾、爆炸、撞击等。

对不同的设计状况,可采用相应的结构体系、可靠度水准和基本变量等。”首次明确建筑施工过程是“短暂状况”,是建筑结构设计对象。并在第3.0.4条给出了建筑施工短暂状况进行承载能力极限状态设计与正常使用极限状态验算的规定。

“3.0.4 建筑结构的三种设计状况应分别进行下列极限状态设计:

1. 对三种设计状况,均应进行承载能力极限状态设计;
2. 对持久状况,尚应进行正常使用极限状态设计;
3. 对短暂状况,可根据需要进行正常使用极限状态设计。”

由于钢筋混凝土建筑结构施工期间,新浇筑混凝土不具有承载能力,其自重荷载和施工活荷载通常用模板支撑体系支撑,并将其传给先前已浇好的一层或多层楼板。这一临时承载体系中的混凝土材料仍处于养护期、强度逐渐增长,混凝土构件的承载能力也在逐渐增长,同时随施工的进展,这一临时承载体系的结构形状、空间位置随时间变化,其组成的构件也在不断更替,作用在其上的外荷载也在不断变化,是时变结构体系。尽管《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)对建筑结构施工短暂状况规定应进行承载能力极限状态设计和正常使用极限状态验算,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)并未对仍处于养护期的施工期混凝土构件设计验算作出规定。《建筑工程施工质量验收统一标准》(GB 50300—2001),对建筑工程施工质量验收作出统一规定,不涉及建筑结构施工短暂状况设计验算内容;《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204—2002)第4.1.1条规定“模板及其支架应根据工程结构形式、荷载大小、地基土类别、施工设备和材料供应等条件进行设计。模板及其支架应具有足够的承载能力、刚度和稳定性,能可靠地承受浇筑混凝土的重量、侧压力以及施工荷载。”第4.3.1条规定“底模及其支架拆除时的混凝土强度应符合设计要求;当设计无具体要求时,混凝土强度应符合表4.3.1的规定”,见表1-4。

底模拆除时的混凝土强度要求

表 1-4

构件类型	构件跨度 (m)	达到设计的混凝土立方体抗压强度标准值的百分率 (%)
板	≤ 2	≥ 50
	$> 2, \leq 8$	≥ 75
	> 8	≥ 100
梁、拱、壳	≤ 8	≥ 75
	> 8	≥ 100
悬臂构件	—	≥ 100

这两条有关混凝土建筑施工短暂状况设计验算的规定，仅对模板、支架以及混凝土结构设计验算作出规定，未对模板、支架和早龄期混凝土结构组成的时变结构整体的设计验算作出规定，也就无法正确把握模板、支架和早龄期混凝土结构组成的时变结构整体的安全性。

《建筑施工安全技术统一规范》，也作出了与《混凝土结构工程施工质量验收规范》（GB 50204—2002）类似的规定，第 7.1.1 条规定“模板施工前，应根据建筑物结构特点和混凝土施工工艺进行模板设计，并编制安全技术措施。”，第 7.1.2 条规定“模板及支架应具有足够的强度、刚度和稳定性，能可靠地承受新浇混凝土自重、侧压力和施工中产生的荷载及风荷载。”

此外，《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》（JGJ 130—2001）、《特种作业人员安全技术考核管理规则》（GB 5036—85）、《高处作业分级》（GB 3608—83）、《特种作业人员安全技术考核管理规则》（GB 5306—85）、《安全网》（GB 5725—1997）、《密目式安全立网》（GB 16909—1997）、《钢管脚手架扣件》（GB 15831—1995）、《塔式起重机安全规程》（GB 5144—94）、《机械设备防护罩安全要求》（GB 8196—87）、《施工升降机安全规则》（GB 10055—1996）、《施工卷扬机安全规程》（GB 13329—91）等都对涉及的施工短暂状况的临时设施的设计验算作出了规定。

第二章 施工时变结构安全分析现状

施工阶段钢筋混凝土建筑结构事故的不断发生,促使人们对建筑结构设计理论进行反思,并且认识到目前建筑结构分析设计理论的局限性:分析给定的、已知的、不变的结构;结构所受的荷载也是已知的;静荷载不随时间改变,动荷载随时间按已知规律(包括随机)变化。而施工期间钢筋混凝土建筑结构,是自身随时间改变的时变结构。为此,国内外学者对钢筋混凝土建筑结构施工时变结构体系分析模型、施工荷载在混凝土时变结构和模板支撑系统中的分布规律实测以及施工活荷载的调查统计、钢筋混凝土建筑结构施工安全控制的优化设计方法、早龄期混凝土特性等方面进行了一系列有益的研究,取得了可喜的成果。

第一节 时变结构体系分析模型

对时变结构体系进行力学性能分析,需建立合理的时变结构体系分析模型。20世纪50年代以来,各国学者相继提出精确分析模型、简化分析模型和精化分析模型以及等效框架分析模型等理论。

1. 精确分析模型

精确分析模型是瑞典人 Nielsen 于 1952 年首次提出的。模型假定:①承担施工荷载的楼板为弹性板;②不考虑承担施工荷载楼板的混凝土材料的收缩和徐变;③支架和模板支撑为均匀连续的弹性结构;④忽略模板支撑系统扭矩和剪力;⑤基础(这里基础指建筑结构的基础)完全刚性。由此,建立承担施工荷载楼板与模板支撑系统相互作用的分析模型,求解时变结构内力。

该方法将支撑看成是夹在混凝土楼板之间的弹性均质层,结构与板共同工作;支架和楼板承担荷载统一以荷载比率表述,荷载比率定义为模板支架内力或楼板承担施工荷载与楼板重力荷载加模板自重之比。对板柱建筑,3层模板支撑,7d施工周期,浇筑后5d拆模的施工方,计算出一个施工循环内,楼板承担的最大施工荷载为 $2.56D$ (D 为楼板自重)。该法计算精度高,但计算繁琐不实用。

2. 简化分析模型 (Simplified Method)

1963年 Grundy 和 Kabaila 对板柱建筑提出一种简化分析模型,此法假定:①楼板的支撑和二次支撑为无限刚性连杆;②各层楼板抗弯刚度相同,或随混凝土弹性模量增长而增长,楼板由支撑相互连接,当加上新荷载时,所有楼板的挠度都相等;③支架均匀连续分布,可以将支架反力视作均布荷载处理;④相对楼板而言假定基础为无限刚性。由此,确定楼板、模板支撑或二次支撑承担的施工荷载:

(1) 工序 A 浇筑顶层楼板:新浇楼板重力荷载由其下的支撑楼板按刚度比例分担;模板支撑或二次支撑上的荷载,直接根据力的平衡条件确定;

(2) 工序 B 拆除最底层模板支撑或二次支撑:最底层模板支撑或二次支撑承担的施工荷载,由其上的楼板按刚度比例分担;模板支撑或二次支撑上的荷载,直接根据力的平衡条件确定。

对于板柱建筑,3层模板支撑,7d施工周期,浇筑后5d拆模的施工方,用 Grundy 和 Kabaila 的简化分析模型,给出的一个施工循环内,楼板承担的最大施工荷载为 $2.36D$ (D 为楼板自重)。与 Nielsen 的精确方法相比,偏小 7.8%。由于该法简便实用,不需要专用计算工具,就能获得施