

建筑结构

BUILDING STRUCTURE

主编 周芝兰

普通高等院校土木专业“十一五”规划精品教材

Civil Professional Textbooks for the 11th Five-Year Plan

主审 戴自强

TU3/59

2007

普通高等院校土木专业“十一五”规划精品教材

建 筑 结 构

BUILDING STRUCTURE

丛书审定委员会

王思敬 彭少民 石永久 白国良
李 杰 姜忻良 吴瑞麟 张智慧

本书主审 戴自强

本书主编 周芝兰

本书副主编 璩继立 卜娜蕊

本书编写委员会

周芝兰 璩继立 卜娜蕊 周晓洁
刘克玲 乌 兰 贾少平

华中科技大学出版社
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构/周芝兰 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2007年11月
ISBN 978-7-5609-4296-4

I. 建… II. 周… III. 建筑结构-高等学校-教材 IV. TU3

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第165928号

建筑结构

周芝兰 主编

责任编辑:孙 玮

封面设计:张 璐

责任校对:张 梁

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:龙文排版工作室

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:850mm×1065mm 1/16

印张:20.25

字数:407 000

版次:2007年11月第1版

印次:2007年11月第1次印刷

定价:38.00元

ISBN 978-7-5609-4296-4/TU·253

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书按照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2002)、《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2002)、《砌体结构设计规范》(GB 50003—2002)、《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)和《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)等现行国家标准编写。本书主要内容包括结构工程的基本概念、钢筋混凝土构件基本计算、砌体结构设计原理、抗震和减震设计概念、高层结构设计原理、基础设计概念以及钢结构设计原理等。

本书是普通高等院校建筑学、建筑工程管理、建筑给水排水工程以及建筑采暖与通风等非结构专业的教材,也可供相关工程技术人员使用。

前 言

建筑结构课程是土木工程类非结构专业的主要专业基础课,是建筑学、建筑工程管理、建筑给水与排水工程、采暖通风工程等专业的必修课程。

建筑结构是一门知识涉及面较广的课程,本教材主要阐述钢筋混凝土结构及构件的基本理论设计方法、混合结构设计原理、木结构设计基本知识、抗震减震的概念、高层建筑结构的设计概念及钢结构的设计内容等,使学生通过学习,掌握结构的概念设计方法,为专业课学习打好基础。

天津大学戴自强教授审阅了全部书稿。教材的第1、4、7章由周芝兰编写,第2、6章由周晓洁编写,第3章由刘克玲、卜娜蕊、乌兰和周晓洁编写,第5、10章由璩继立编写,第8、9章及附录部分由乌兰编写,第11章由贾少平编写。

在编写本书时,我们参考了一些公开发表的文献,在此谨向其作者表示感谢。

由于作者水平有限,书中不免存在缺点和错误,敬请读者指正。

编 者

2007年4月

目 录

第 1 章 结构设计功能	(1)
1.1 建筑结构设计任务	(1)
1.1.1 结构与构件	(1)
1.1.2 结构设计的任务	(2)
1.1.3 概念设计	(3)
1.2 建筑结构设计的基本原则	(3)
1.2.1 结构的安全等级	(4)
1.2.2 建筑结构设计使用年限	(4)
1.2.3 结构的功能要求	(4)
【本章要点】	(7)
【思考和练习】	(7)
第 2 章 结构荷载	(8)
2.1 作用、作用效应 S 和结构抗力 R	(8)
2.1.1 结构上的荷载及其分类	(8)
2.1.2 作用效应 S 和结构抗力 R	(8)
2.2 建筑结构设计准则概述	(9)
2.2.1 结构的极限状态	(9)
2.2.2 结构的可靠性与可靠度	(10)
2.2.3 结构的可靠指标 β 和目标可靠指标 $[\beta]$	(11)
2.2.4 实用设计表达式	(12)
【本章要点】	(14)
【思考和练习】	(14)
第 3 章 混凝土构件设计	(16)
3.1 钢筋与混凝土材料的力学性质	(16)
3.1.1 钢筋	(16)
3.1.2 混凝土	(19)
3.1.3 钢筋与混凝土共同工作的原因	(21)
3.2 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	(22)
3.2.1 概述	(22)
3.2.2 受弯构件正截面的受力性能	(22)
3.2.3 受弯构件正截面承载力计算方法	(25)

3.2.4 构造要求	(41)
3.3 混凝土受弯构件斜截面承载力计算	(43)
3.3.1 概述	(43)
3.3.2 有腹筋梁斜截面受剪承载力计算	(43)
3.4 受压构件截面承载力计算	(51)
3.4.1 受压构件的一般构造要求	(51)
3.4.2 轴心受压构件的正截面受压承载力	(53)
3.4.3 偏心受压构件正截面受压承载力	(57)
3.5 预应力混凝土构件	(72)
3.5.1 预应力混凝土的基本概念	(72)
3.5.2 预应力混凝土的材料	(77)
3.5.3 预应力损失	(78)
【本章要点】	(81)
【思考和练习】	(82)
第4章 楼盖、楼梯、阳台及雨篷	(86)
4.1 楼盖	(86)
4.1.1 楼盖的设计要求及结构形式	(87)
4.1.2 单向板肋梁楼盖	(88)
4.1.3 双向板楼盖	(97)
4.1.4 双重井字梁楼盖	(99)
4.1.5 无梁楼盖	(100)
4.1.6 装配式钢筋混凝土楼盖	(102)
4.2 楼梯	(105)
4.2.1 板式楼梯	(106)
4.2.2 梁式楼梯	(108)
4.2.3 装配式楼梯	(109)
4.2.4 楼梯设计计算例题	(109)
4.3 悬挑构件	(111)
4.3.1 阳台的种类及破坏特点	(111)
4.3.2 阳台的设计	(112)
【本章要点】	(114)
【思考和练习】	(114)
第5章 抗震及减震概念设计	(115)
5.1 地震的基本概念	(115)
5.1.1 地震的类型和成因	(115)
5.1.2 地震波	(117)
5.1.3 地震灾害	(117)

5.1.4 地震震级和地震烈度	(118)
5.1.5 地震活动性及其分布	(120)
5.1.6 建筑抗震设防	(121)
5.2 抗震减震概念设计	(123)
5.2.1 选择技术和经济合理的结构体系	(123)
5.2.2 非结构构件的要求	(124)
5.2.3 材料与施工	(125)
5.3 隔震技术简介	(126)
5.3.1 结构隔震技术原理	(126)
5.3.2 基础隔震技术	(128)
【本章要点】	(135)
【思考和练习】	(135)
第6章 砌体结构设计	(136)
6.1 砌体结构房屋承重体系	(137)
6.1.1 墙体的布置原则	(137)
6.1.2 砌体结构的承重体系	(138)
6.2 砌体及其基本材料力学性能	(140)
6.2.1 块体	(140)
6.2.2 砂浆	(142)
6.2.3 砌体的种类	(142)
6.2.4 砌体的抗压强度	(144)
6.3 受压构件承载力计算	(147)
6.3.1 砌体墙、柱受力特点	(147)
6.3.2 砌体墙、柱受压承载力的计算	(149)
6.4 局部受压构件承载力计算	(152)
6.4.1 砌体局部受压的特点	(152)
6.4.2 砌体局部均匀受压	(153)
6.4.3 梁端支承处砌体局部受压	(154)
6.4.4 梁端下设有垫块的砌体局部受压	(156)
6.5 砌体结构房屋设计	(157)
6.5.1 房屋的静力计算方案	(158)
6.5.2 墙、柱高厚比验算	(161)
6.6 墙体的构造措施	(165)
6.6.1 房屋的总高度和层数	(166)
6.6.2 房屋高宽比限值	(166)
6.6.3 抗震横墙的间距限值	(167)
6.6.4 房屋的局部尺寸限值	(167)

6.6.5 沉降缝、伸缩缝及防震缝的设置	(168)
6.6.6 钢筋混凝土构造柱的设置	(169)
6.6.7 钢筋混凝土圈梁的设置	(171)
6.6.8 纵横墙的连接	(172)
6.6.9 楼、屋盖与墙体间的连接	(173)
6.6.10 防止或减轻墙体开裂的构造措施	(174)
【本章要点】	(177)
【思考和练习】	(178)
第7章 高层建筑结构	(180)
7.1 概述	(180)
7.1.1 高层建筑的发展	(180)
7.1.2 高层建筑定义、分类与耐火等级	(183)
7.1.3 高层建筑的优缺点	(185)
7.1.4 高层建筑结构的荷载	(186)
7.1.5 高层建筑设计特点	(188)
7.2 高层建筑结构的布置	(189)
7.2.1 高层结构的总体布置	(189)
7.2.2 结构平面布置	(194)
7.2.3 结构竖向布置	(197)
7.3 高层建筑的结构体系	(198)
7.3.1 框架结构体系	(198)
7.3.2 剪力墙体系	(201)
7.3.3 框架-剪力墙体系	(204)
7.3.4 筒体结构	(206)
7.3.5 其他结构体系	(208)
【本章要点】	(212)
【思考和练习】	(212)
第8章 木结构	(213)
8.1 概述	(213)
8.2 结构用木材	(214)
8.2.1 木材的不等向性	(214)
8.2.2 木材缺陷	(215)
8.2.3 木材的力学性能	(216)
8.2.4 结构用木材的选材标准和含水率的要求	(217)
8.3 木结构的防火和防护	(218)
8.3.1 木结构防火	(218)
8.3.2 木结构的防护	(220)

8.4 木结构构件的连接	(221)
8.4.1 齿连接	(221)
8.4.2 螺栓连接和钉连接	(222)
8.4.3 齿板连接	(224)
8.5 现代木结构	(225)
8.5.1 胶合木结构	(226)
8.5.2 轻型木结构	(227)
【本章要点】	(228)
【思考和练习】	(228)
第9章 钢筋混凝土单层厂房结构	(229)
9.1 单层厂房的特点及结构形式	(229)
9.1.1 单层厂房的特点	(229)
9.1.2 单层厂房结构形式	(229)
9.1.3 排架结构组成	(231)
9.2 单层厂房结构布置	(233)
9.2.1 平面布置	(233)
9.2.2 支撑布置	(236)
9.2.3 围护结构布置	(240)
【本章要点】	(243)
【思考和练习】	(243)
第10章 地基与基础	(244)
10.1 地基与基础的概念	(244)
10.2 地基与基础在建筑工程中的地位	(245)
10.3 地基与基础的设计要求	(246)
10.3.1 建筑物设计总则	(246)
10.3.2 地基与基础的设计要求	(247)
10.3.3 基础设计所需要的资料	(248)
10.4 基础类型	(248)
10.4.1 扩展基础	(248)
10.4.2 联合基础	(250)
10.4.3 柱下条形基础	(251)
10.4.4 柱下交叉条形基础	(251)
10.4.5 筏形基础	(252)
10.4.6 箱形基础	(253)
10.4.7 壳体基础	(253)
10.4.8 桩基础	(254)
10.4.9 沉井基础	(254)

10.5 我国南北地区不同土质的地基土的特点	(256)
10.5.1 概述	(256)
10.5.2 岩石地基	(256)
10.5.3 土岩组合地基	(257)
10.5.4 岩溶与土洞地基	(258)
10.5.5 膨胀土地基	(260)
10.5.6 红黏土地基	(262)
10.6 地基承载力的概念	(263)
【本章要点】	(264)
【思考和练习】	(264)
第 11 章 钢结构	(265)
11.1 概述	(265)
11.1.1 钢结构的应用范围	(265)
11.1.2 钢结构的特点	(267)
11.2 钢结构体系	(267)
11.2.1 大跨度屋盖结构	(267)
11.2.2 多、高层钢结构建筑	(277)
11.2.3 单层厂房的横向平面框架结构及门式刚架	(280)
11.3 钢结构材料	(283)
11.3.1 建筑钢材的技术性能	(283)
11.3.2 钢材的 Z 向性能(层状撕裂)	(285)
11.3.3 钢材的疲劳	(285)
11.3.4 影响钢材性能的主要因素	(286)
11.3.5 钢的种类、规格和选用	(288)
11.4 钢结构的计算方法	(290)
11.5 基本构件计算	(291)
11.5.1 轴心受力构件	(291)
11.5.2 受弯构件(梁)	(294)
11.6 钢结构的连接	(296)
11.6.1 焊缝连接	(296)
11.6.2 普通螺栓连接	(298)
11.6.3 高强度螺栓连接	(300)
【本章要点】	(301)
【思考和练习】	(302)
附表	(304)

第 1 章 结构设计功能

1.1 建筑结构设计任务

1.1.1 结构与构件

建筑师们认为,建筑是建筑物和构筑物的总称,而结构工程师则认为,建筑是由承重骨架形成的实体。工程上将支撑房屋的骨架称为结构。在建筑领域,不同的材料以不同形式构成了各种承重骨架,即构成了各种不同的结构体系。

结构是由基本构件组成的。它们将建筑物的各个部分有序地组成一个具有使用功能的完整空间,形成一个合理的主体结构体系。

结构的基本构件包括建筑房屋的梁构件、柱构件、板构件和墙构件等(见图 1-1)。下面介绍几种常见的基本构件。

1) 梁构件

梁构件通常横放在支座上,承受与构件纵轴方向相垂直的荷载。它的截面尺寸小于其跨度,属于线性构件,在受力后发生弯曲。在一般情况下,梁构件在承受弯矩作用

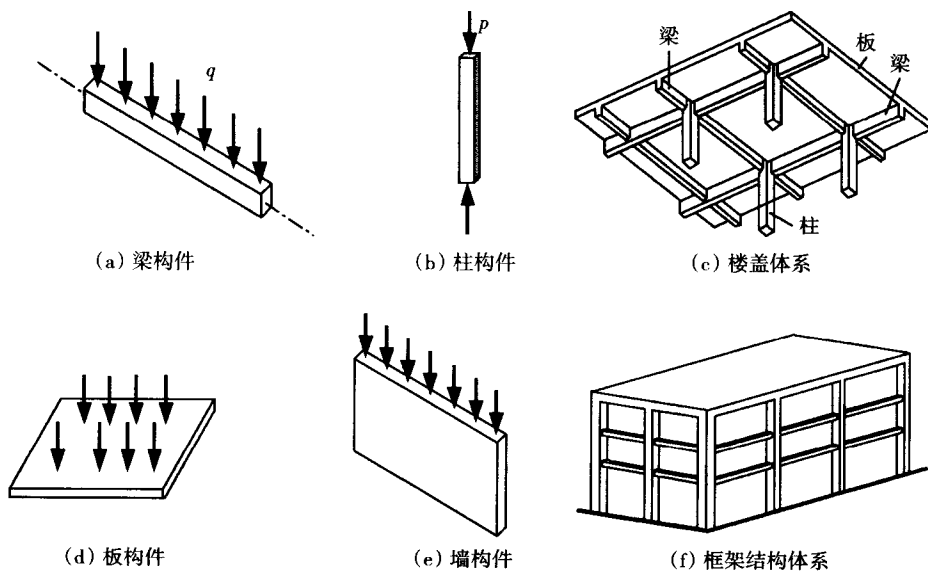


图 1-1 基本构件与结构体系

的同时,还要承受剪切作用,有时还要承受扭转作用,但梁构件主要承受弯矩作用。根据几何形状不同可将梁分为水平直梁、斜梁(楼梯梁)、曲梁、空间曲梁(螺旋形梁)等;根据约束条件及受力不同又可将梁分为简支梁、悬臂梁、框架梁等;当选用的材料不同时,梁又有钢筋混凝土梁、钢梁、实木梁之分。

2) 柱构件

柱构件通常是直立的,承受着与构件纵轴方向平行的荷载,它的截面尺寸小于其高度。在荷载作用下,柱主要是受压,有时也受拉、受弯,但柱构件主要是压弯构件。若柱不直接承受荷载,而仅仅是为了增加墙体的延性而设置时,则为非承重构件。

3) 板构件

板构件是可覆盖一个较大的平面但自身厚度较小的水平构件(如楼板、屋面板),有时也斜向设置(如楼梯板)。板承受垂直于板平面方向上的荷载,以承受弯矩、剪力、扭矩为主。但在结构计算时,剪力和扭矩往往可以忽略。根据板的支撑情况及平面的几何特点来分析,有些板的受力特点及变形与梁基本相同,区别在于它们的截面形式完全不同:板的截面宽而薄,梁的截面高而窄,而受力后都发生单向弯曲。有些板受力后在两个方向上都要发生弯曲,称为双向弯曲,这种板受力特点与梁完全不同。无论板在受力后发生单向弯曲还是双向弯曲,板构件都是属于受弯构件。

4) 墙构件

墙构件主要承受平行于墙面方向的荷载,在本身的重力和竖向荷载作用下,主要承受压力,有时也承受弯矩和剪力(如墙构件承受风、地震、土压力、水压力等水平荷载作用),但它主要是竖向受压构件。以承受重力为主的墙为承重墙,不直接承受荷载,仅作为隔断或分隔建筑空间的隔墙为非承重墙,而以承受风荷载或地震荷载作用所产生的水平力为主的墙为剪力墙。

由上述基本构件按不同的连接方式可构成不同的结构体系。

如由梁、板和柱作为承重构件,墙作为分隔建筑空间使用,即构成框架结构,可用于中小型办公楼,满足大开间或建筑平面灵活布置的使用要求。

由梁、板、柱和钢筋混凝土墙作为承重构件,即构成钢筋混凝土框架-剪力墙结构,适用于中高层建筑,其内部空间可灵活布置,又不会使建筑物产生过大的变形,能相对降低经济造价。

由梁、板和砖墙作为承重构件构成的砖混结构,现今广泛用于住宅建筑,这为改善人们的居住条件作出了很大贡献。

1.1.2 结构设计任务

结构设计应根据建筑物的重要性等级、建筑使用功能要求或生产需要所确定的使用荷载、抗震要求、设防标准等,对结构的基本构件和整体进行设计,以保证基本构件的强度、变形、裂缝满足设计要求,同时保证结构体系的整体安全性、稳定性、变形性能符合设计要求;保证在突发事件发生时,结构仍保持一定的整体性,使人们的生

命安全得以保证;保证合理用材,方便施工,同时尽可能降低建筑造价。总之,结构设计的核心是解决两个问题:一是满足建筑结构功能的要求;二是经济问题。

在结构设计中,增大结构的安全余量往往会增加经济造价,如为满足结构功能要求而采取加大构件的截面尺寸或增加配筋截面、提高对材料强度要求等措施的同时,建筑工程的造价必定提高,导致结构设计经济效益降低。科学的设计方法是在结构的可靠性与经济性之间选取最佳平衡,即以经济合理的方法设计有适当的可靠性的结构。

1.1.3 概念设计

最佳的设计往往是通过概念设计来实现的,而概念设计又往往先于初步设计;它协调建筑功能、结构功能、造型美观和建造条件之间的关系,是整个设计工作的灵魂。概念设计是指根据理论与实验研究结果和工程经验等形成的基本设计原则和设计思想,进行建筑和结构的总体布置,并正确确定细部构造的过程。

概念设计包括建筑概念设计和结构概念设计两个方面。建筑概念设计是对满足建筑使用功能且造型优美、技术先进的总建筑方案的确定;结构概念设计是在特定的建筑空间中用整体的概念来完成结构总体方案的设计。结构概念设计旨在有意识地处理构件与结构、结构与结构的关系,满足结构的功能要求和建筑功能的需要,以及技术经济可能的设计原则,确定最优的结构体系,选择适用的建筑材料和合理的关键部位构造、结合适宜的施工及合理的效益达到房屋设计的统一。

1.2 建筑结构设计的基本原则

在建筑房屋设计过程中涉及建筑、结构、建筑设备(如给排水、采暖通风、建筑电器、燃气)等多个专业,每个专业都有各自的职能以保证建筑的相关功能。建筑工程师是与建筑规划协调,进行房屋体型和周围的环境设计,对房屋的平面及空间进行合理布局,解决好采光、通风、照明、隔音、隔热等建筑技术问题,同时对建筑进行艺术处理,装饰室内外空间,为人们的生活和活动创造良好的环境。结构工程师是确定房屋结构所承受的荷载,合理地选择建筑材料,正确确定结构体系,解决好承载力、变形、稳定、抗倾覆等技术问题以及结构的连接构造和施工方法。设备工程师是确定水源、给排水的标准及系统和装置,确定热源、供热、制冷和空调的标准、系统和装置,确定电源、照明、弱电、动力用电的标准、系统和装置。所以说建筑是建筑师、结构工程师、设备工程师和施工工程师共同配合创造的产物。

如果说建筑的功能是确定使用空间的存在形式,即在物质上、精神上满足具体使用要求,则结构的功能是确定使用空间的存在可能。早在公元前18世纪,巴比伦王汉谟拉比制定的法典中规定:“若建造者为任何人建造一幢房屋,若因未准确施工,而使所建造的房屋倒塌,建造者自己应出资重建;若房主因而致死,则建造者应处死刑;若

压死的是房主之子,则建造者之子抵命。”由此可见,人们在早期的房屋建造中就已经懂得结构安全性的重要了。

因此,结构设计应遵循的原则是,依据建筑物的重要性等级,保证结构体系和结构基本构件能在预定的时间内和规定的条件下,完成预定的功能。一般来讲,预定的时间是指结构的设计使用年限,预定的功能就是结构的功能。

1.2.1 结构的安全等级

建筑物的重要性程度是根据其用途决定的。在建筑结构设计时,应根据建筑结构破坏可能产生的后果(危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等)的严重性,采用不同的安全等级。建筑结构安全等级的划分应符合表 1-1 的要求。

表 1-1 建筑结构的安全等级

安全等级	破坏后果的影响程度	建筑物类型
一级	很严重	重要建筑物
二级	严重	一般建筑物
三级	不严重	次要建筑物

对于特殊的建筑物,其安全等级可根据具体情况另行确定。对于有抗震等级或其他特殊要求的建筑结构,安全等级还应符合相应规范的规定。

1.2.2 建筑结构设计使用年限

设计使用年限是指设计规定的结构或结构构件不需要进行大修,就能完成预定功能的使用时期。结构的设计使用年限应按表 1-2 采用。

表 1-2 结构的设计使用年限

类别	设计使用年限 / 年	示 例
1	5	临时性结构
2	25	易于替换的结构构件
3	50	一般性建筑(普通房屋和构筑物)
4	100	纪念性建筑和特别重要的建筑结构

结构的使用年限与建筑结构的使用寿命有一定的联系,但又有区别;建筑超过设计使用年限并不一定是使用寿命的结束,但其完成预定功能的能力会越来越差。

1.2.3 结构的功能要求

1) 安全性

安全性是指建筑结构应能承受在正常设计、施工和使用过程中可能出现的各种作用(如荷载、外加变形、温度、收缩等)以及在偶然事件(如地震、爆炸等)发生时或发

生后,结构仍能保持必要的整体稳定性,不致发生倒塌。

2) 适用性

适用性是指建筑结构在正常使用过程中,结构构件应具有良好的工作性能,不会产生影响使用的变形、裂缝或振动等现象。

3) 耐久性

耐久性是指建筑结构在正常使用、正常维护的条件下,结构构件具有足够的耐久性能,并能保持建筑的各项功能直至达到设计使用年限,如不发生材料的严重锈蚀、腐蚀、风化等现象或构件的保护层过薄、出现过宽裂缝等现象。耐久性取决于结构所处环境及设计使用年限。

近几年,结构功能不能被保证的工程事故频频出现,以下举几个例子。

例一:1997年7月12日上午9:30,位于浙江省某县城南经济开发区的一微利安居住宅在数秒钟内突然发生整体倒塌,而且一塌到底,当时在楼内的39人全部被埋,其中36人死亡,3人受伤。此楼建筑面积为2476 m²,5层半混合结构,底部为层高2.15 m储藏室,檐口高度为16.95 m,一梯两户,共3个单元30套住房,常居住人口105人。1994年5月10日开工,1994年12月30日竣工,1995年6月验收,1995年6月28日出售,正常使用2年。

原因:调查中未发现影响结构的装修现象,无人为的破坏情况。倒塌的主要原因是:①基础施工过程中存在严重工程隐患,基础材料及施工质量十分低劣,不符合基本设计要求。在清理倒塌现场时,发现不少基础砖墙的砖和砂浆已成粉末状。②设计要求基础内侧进行回填土,夯实至±0.00。但施工时却采用架空板,基础内侧又未粉刷,致使基础长期受积水直接浸泡,强度降低。由于没有回填土,基础墙体的稳定性和抗冲击性减弱。③施工质量管理失控,建设单位质量管理失控,监理不到位。此例属于非正常施工事故。

例二:1995年6月29日,韩国汉城(即现在的首尔)市中心的地上5层、地下4层的三丰百货大楼从凌晨开始,4层至5层楼板开裂甚至个别处下沉150 mm,但商场一直在营业。到下午6点多,仅在30秒时间内,大楼整体倒塌,造成96人当场死亡,202人失踪,951人受伤。

原因:开发方随意改变使用功能,在施工完成后,将5层原滚轴溜冰场改为餐馆。因韩国人就餐习惯就地而坐,5层改为地板采暖,并在厨房增加了一些厨房设备,同时在屋顶增设了30 t的冷却塔。荷载比原设计增加了3倍。施工过程中,管理混乱,有些柱截面尺寸比原设计要求小,甚至无梁楼盖的某柱的柱帽有的都未做。特别是在使用的5年中,商场多次改建。荷载的增加、主承重构件在施工及装修过程中截面尺寸减小、关键部位的构造处理不当等。整个破坏过程相当于“手指穿草纸”。此例属于非正常施工加非正常使用事故。

例三:2001年9月11日,建于1973年、耗资7亿美元、高417 m、地上110层地下6层的钢框筒结构美国世贸中心双塔大厦,遭到恐怖分子劫持的飞机的撞击,致使



图 1-2 美国世贸大厦遭袭情景

南塔楼受到 0.9 级冲击力的撞击,在 1 小时 2 分钟后倒塌;而北塔楼受到 1.0 级的冲击力撞击,在 1 小时 43 分钟后倒塌(见图 1-2)。撞击时,巨大冲击力连同随后引起的爆炸能量仅使大厦晃动了 1 m 多,并没有造成严重倒塌,而倒塌的最终原因是飞机的航空燃油造成的。当飞机撞击大厦后,立即引起大火,航空油顺着关键部位的缝隙流淌、渗透到防火保护层内,接触到钢材的表面。燃起的大火(最终温度估计达到 815℃ 以上)使钢材的强度急剧下降,并产生较大的塑性变形,最后丧失承载力而倒塌。撞击北塔楼的飞机所携带的油量少,撞击点接近顶部。而南塔楼的飞机所携带的油量大,撞击点位置较低,上层的压力大,使南楼倒塌在前。

由于结构体系选型及构造处理具有良好的吸收撞击冲量和爆炸能量作用,钢架本身又具有良好的韧性,因而获得了近两个小时的疏散时间,在大楼发生突发事件时,使得楼内的工作人员得以逃生,挽救了一些人的生命。但此次袭击造成经济损失达 300 亿美元,453 人死亡,5422 人失踪,给美国的金融业、航空业和保险业带来巨大的损失。此例属于偶然事件发生事故。

例四:1983 年 9 月某日晚,上海某研究所食堂突然整体倒塌,其屋顶为双层圆形悬索屋盖,直径为 17.5 m,支撑在砖墙加扶壁柱砌体墙上。屋顶的内环梁由型钢组成,直径为 3 m,高 4.5 m。外环梁为钢筋混凝土环梁,截面为 720 mm×600 mm,内外环间由 90 根直径为 7.5 mm 的钢绞索连接,上铺钢筋混凝土扇形板,板内填豆石混凝土,上铺两毡三油防水层。

原因:该工程于 1960 年竣工,自 1965 年以来未对屋顶进行检查,仅对屋顶局部渗漏处作了修补,致使裂缝处钢绞线长年被严重锈蚀,造成断面减少,承载力不足引起塌落。经事故现场调查,发现 90 根钢索全部沿环梁周边折断。此例属于丧失结构耐久性事故。

而实际上,各专业间的有机结合是能够避免工程事故的发生,并在偶然事件发生时减少损失的。建于 1931 年的世界上标志性高层建筑物之一的帝国大厦,采用的是钢框结构,所有钢构件连接均采用铆钉和螺栓,耗材约 5.7 万吨。大厦高 381 m,共 102 层,风荷载作用下,最大的顶层位移可达 78 mm。特别是在 1945 年 7 月 28 日 9 时 40 分,一架美国轰炸机因大雾撞进帝国大厦 78~79 层间,撞出一个约 42 m² 的大洞,因飞机所携带的燃油少且灭火及时,而最关键是在中央电梯区纵横方向均设置了斜向钢支撑,加强了整个建筑物的侧向刚度,因此大楼安然耸立,保持了世界最高建筑地位。