

高冗余度钢结构 倒塌控制设计指南

日本钢结构协会

美国高层建筑和城市住宅理事会

著

陈以一 赵宪忠

译

Guidelines for
Collapse Control Design

Construction of Steel Buildings with High Redundancy



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

TU391.04/21

2007

高冗余度钢结构倒塌控制设计指南

日本钢结构协会 美国高层建筑和城市住宅理事会 著

陈以一 赵宪忠 译



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

高冗余度钢结构倒塌控制设计指南/日本钢结构协会,
美国高层建筑和城市住宅理事会著;陈以一,赵宪忠译.
上海:同济大学出版社,2007.8

ISBN 978-7-5608-3644-7

I. 高… II. ①日…②美…③陈…④赵… III. 钢结构—
倒塌—控制—设计 IV. TU391.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 122752 号

高冗余度钢结构倒塌控制设计指南

日本钢结构协会 美国高层建筑和城市住宅理事会 著
陈以一 赵宪忠 译

责任编辑 高晓辉 责任校对 郁 峰 封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店
印 刷 崇明裕安印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 15.75
印 数 1—3100

字 数 393000

版 次 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-3644-7/TU·743

定 价 48.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

译者序

本书的翻译出版是近年来中日两国钢结构技术领域频繁交流的一项成果。2002年夏,日本钢结构协会(Japanese Society of Steel Construction, JSSC)和日本钢铁联盟(Japan Iron and Steel Federation, JISF)组织了以东京大学名誉教授高梨晃一为团长的代表团来沪,与同济大学教授沈祖炎等深入讨论,确定了定期组织钢结构技术交流、促进钢结构应用的行动方针。2003年,根据会谈达成的共识,同济大学、上海交通大学、上海金属结构协会与JSSC, JISF举办了第一次专题技术交流会,主题是“钢结构新材料及其应用技术”,吸引了200多位国内专家和技术人员参加。2004年,在北京工业大学、哈尔滨工业大学和中国钢结构协会的协助下,第二次专题技术交流会在北京举行。为配合北京奥林匹克体育场馆建设,这次会议重点交流了两国在大跨度钢结构建筑领域的技术进展。2005年,又在上海、深圳组织了两次专题技术交流会。此次上海技术交流会的一项重要内容,就是回应“911”事件发生后,如何应对高层建筑钢结构防止连续性倒塌(或称连续倒塌)这一众人关注的课题。

2005年专题技术交流会筹备其间,JSSC和JISF的代表作本好文先生赠送了《高冗余度钢结构倒塌控制设计指南》英文付印稿。笔者阅读后,认为这一文献对我国的结构工程技术人员有着重要的参考价值。此后,日方决定授权同济大学出版社出版中文版。岁末年初,日方先后向同济大学赠送了英文版和日文版。这两个版本稍有不同,译者以英文版为基础进行翻译,后根据日文版作校译。

应该说,结构设计的根本任务就是保证结构安全,而防止结构倒塌则是保证结构安全的底线。防止结构倒塌破坏,将结构损伤控制在可接受的范围内,一直是结构工程理论和实践的重要主题。然而“911”事件后,这一主题的重要性以前所未有的程度再次凸现。人们认识到,随着城市化的高度发展,人群密集的高层建筑结构、大跨度建筑结构的连续性倒塌将会带来非常严重的后果,并造成生命和财产的巨大损失,对社会经济、社会秩序乃至人们心理产生巨大的冲击。“911”事件是由于恐怖势力蓄意策划所致,但结构的实际倒塌破坏的原因则更为广泛。仅以近年若干严重破坏为例:2004年,法国戴高乐机场候机厅顶棚倒塌;2005年,德国巴特莱兴哈尔溜冰馆,波兰卡托维茨国际博览会展厅先后倒塌;2006年初,莫斯科鲍曼市场屋顶坍塌;等等。设计欠妥、施工不当、材料缺陷、环境灾害等都是引发倒塌破坏的原因。对有大量人群生活、聚集的高层建筑结构和的大跨度建筑结构进行倒塌分析,采取防止连续性倒塌的措施,将逐步成为结构设计的一项重要内容。就笔者所知,近年来,国内已有一些重要的公共建筑陆续向工程师们提出了进行结构倒塌分析的要求。

研究结构倒塌的直接起因固然非常重要,结构防倒塌设计的重心应该置于更一般的倒塌原因的分析和对策上。然而,结构倒塌过程的机理是什么?如何进行结构的倒塌分析?什么样的结构可以有效防止或阻断倒塌破坏由局部扩大到整体?人们对这些问题还缺乏系统的认识。另一方面,现行设计规范以概率论理论为基础的极限状态设计方法,还难以应用于防止结构连续性破坏这一设计任务。结构工程的研究者和设计者迫切需要在这一课题上取得进展。

在这样一种背景下,《高冗余度钢结构倒塌控制设计指南》一书及时为我们提供了许多重要的资料。本书由“设计”和“研究”两部分组成,在英文版和日文版中是分为两册印刷的,中文

版则将其集为一册。整本书涉及对高层建筑钢结构和大跨度建筑钢结构两种体系的分析,但主要篇幅都在对高层建筑钢结构的研究。“设计”部分对结构防止倒塌的设计提出了具体建议,“研究”部分则对倒塌机理、分析方法进行了详细阐述。本书对冗余度在结构防倒塌设计中的重要性、连续性倒塌发生与否的关键在于局部破坏之后内力重分布能否有效实现、连续性倒塌分析的力学模型和计算方法、火灾高温下钢框架结构的稳定性分析以及结构抗震设计和防止倒塌设计的关联性等,都有非常精到的论述。笔者以为,本书所介绍的理论和方法,不仅有助于钢结构设计,对其他结构体系的研究、分析和设计也具有参考价值。顺便一提的是,本书的日文版获得了日本钢结构协会 2006 年度的特别研究奖。

本书编写时,原作者同时采用了国际单位制和公斤(吨)、厘米制,因涉及众多图表公式转换,译书中均按原书的表达方法。

在中文版付印之际,笔者向帮助此书翻译出版的各有关方面表示由衷的感谢。日本钢结构协会、日本钢铁联盟慨然允诺和促成本书中文版的早日发行,提供了全套资料。在本书的翻译过程中,初稿由同济大学在读研究生王毅、杜纯领、王冠男、孙鹏等承担,本科生徐祥斌、张鹏为插图中的文字提供了帮助。因本书的英文版、日文版均未正式出版发行,从原稿直接由中文成书,同济大学出版社的江岱、高晓辉老师进行了仔细的校勘,并十分用心地对照原文作了编辑。

笔者在日本钢结构协会“高层建筑钢结构冗余度研究委员会”名单中看到了大井谦一教授的名字。大井教授曾是笔者在东京大学生产技术研究所工作时的上司和同事。笔者从本书的部分成果中读到以往研究的拓展脉络,曾准备就有关问题向大井先生进一步请教。不料先生 2005 年夏因脑梗入院,2006 年末辞世。文稿尚余墨香,斯人竟已仙去,令人唏嘘惆怅。希望本书中文版的出版能够表达一份对大井先生的追思。

陈以一
同济大学土木工程学院教授
2007 年 3 月

英文版序



自 1968 年英国罗南坡因特(Ronan Point)公寓楼煤气爆炸事件发生以来,连续性倒塌就成为结构工程师们关注的焦点。此后也有其他结构倒塌事件相继发生。相关的事故调查报告以及为防止同类事件再次发生所考虑的对策等相关文献资料也逐渐积累起来。

2001 年世界贸易中心(World Trade Centre, WTC)倒塌后 9 个月,日本钢结构协会设立了“高层建筑钢结构冗余度研究委员会”。在日本钢铁联盟(JISF)指导和美国高层建筑和城市住宅理事会(Council on Tall Buildings and Urban Habitat, CTBUH)协助下,进行了两年的研究工作。

研究成果汇集成为设计篇和研究篇两部分,前者是一设计指南,后者则反映了更具体的研究资料。这一研究成果既反映了日本在此专题领域的最新思考,也作为重要的研究文献受到欢迎,现已加入到 CTBUH 的文献目录中。

为了使更多的人能够利用这些文献,JISF 将原稿译成英文。本设计指南包括了结构倒塌问题的两个主要方面:其一是构件的物理损失;其二是构件由于火灾而导致的承载力降低或丧失。无论哪一方面,都以研究和设计概念要面向实际结构应用为宗旨。本指南虽不是一个强制性的文件,但对考虑防止连续性倒塌而言,确实提供了必须考虑的重要建议。

Ron Klemencic
美国高层建筑和城市住宅理事会主席
2005 年 9 月

日文版出版谢辞



在《高冗余度钢结构倒塌控制设计指南》出版之际,我以社团法人日本钢结构协会“高层建筑钢结构冗余度研究委员会”干事的身份,向和田章委员长等各位表示感谢。

2001年9月11日世界贸易中心倒塌后,日本钢结构协会在短时间内就组成了以东京工业大学和田章教授为委员长的“高层建筑钢结构冗余度研究委员会”,开始研究工作。

众所周知,日本和美国都大量采用钢结构的高层建筑。“911”事件后,从事钢结构设计建造的工程师们自然对高层建筑钢结构的可靠性产生了疑问。日本钢结构协会认为,研究高层建筑钢结构冗余度的措施是一项紧急任务,以此来提高人们对钢结构可靠性的认识。以和田委员长为首的委员会各位成员,在各自繁忙的日常工作之余,集中开展了一系列的研究活动,在短期内完成了本设计指南。对此我再次表示谢意。

本研究是日本钢结构协会和美国高层建筑和城市住宅理事会(CTBUH)共同推动的。因此,设计指南也作为两家机构的共同著作。我们对以 Ron Klemencic 主席为首的 CTBUH 的各位成员表示感谢,也对 Rodger Wildt 先生为两家机构的协调所作的努力表示感谢。

日本和美国是世界范围内高层建筑钢结构设计建造的引领者。我衷心希望两个协会合作出版的本设计指南能够在世界范围内为广大的结构技术工作者所利用,以期高层建筑钢结构的安全性得到进一步提高,高层建筑钢结构事业能获得新的发展。

作本好文

日本钢结构协会“高层建筑钢结构冗余度研究委员会”干事
日本钢铁联盟建筑专业委员会委员长

2005年9月

日本钢结构协会“高层建筑钢结构冗余度研究委员会”

委员长

和田章

东京工业大学



和田章
委员长

结构工作组组长

大井廉一

东京大学(后任职神户大学)

结构抗火工作组组长

铃木弘之

筑波大学

委员

池田宪一

清水建设株式会社

加村久载

JFE 技研株式会社

川合广树

ABS 咨询公司

木村功

新日本制铁株式会社

庆伊道夫

株式会社日建设计

河野守

独立行政法人建筑研究所
(现任职国土技术政策综合研究所)

佐佐木正道

住友金属工业株式会社

佐佐木睦朗

名古屋大学(现任职法政大学)

高田武之

株式会社神户制钢所

中込忠男

信州大学

西垣太郎

元大成建设株式会社

西山功

独立行政法人建筑研究所
(现任职国土技术政策综合研究所)

长谷川隆

国土技术政策综合研究所
(现任职独立法人建筑研究所)

伏见光雅

新日制铁株式会社

藤原一成

株式会社神户制钢所

村上行夫

JFE Steel 株式会社

吉贝滋

鹿岛建设株式会社



大井廉一
结构工作组组长



铃木弘之
结构抗火工作组
组长

CTBUH 指南工作组成员

Ron Klemecic

Magnusson Klemencic Associates 总裁

Hal Iyengar

SOM 合伙人(退休)

Robert Solomon

美国防火协会建筑与生命安全规范组,
助理副主席

Richard Bukowski

国立科学技术研究所建筑与防火实验室,
高级工程师

John M. Hanson 博士

Hanson Consulting Associates 总裁

John W. Fisher 博士

Lehigh University 资深教授

Edward (Xiaoxuan) Qi 博士

Associate Principal

干事

作本好文

新日本制铁株式会社

Roger Wildt

RW Consulting Group

目 录

第 I 篇 设计	(1)
1 绪论	(3)
1.1 高层钢结构房屋冗余度研究委员会	(3)
1.2 世贸中心	(3)
1.2.1 工程概况	(3)
1.2.2 “911”事件	(3)
1.2.3 世贸中心倒塌原因	(4)
1.2.4 美国调查报告的结论	(4)
1.2.5 纽约建筑署提出的对策	(5)
1.3 冗余度	(5)
1.4 结构承载能力和塑性变形能力的关系	(6)
1.5 建筑结构的极限强度	(7)
1.6 高冗余度钢结构倒塌控制设计指南	(8)
1.6.1 概述	(8)
1.6.2 指南信息的全球共享	(8)
1.6.3 本《指南》的特点及其组成	(8)
2 一般规定	(10)
2.1 总体设计思想	(10)
2.2 结构倒塌控制设计指南:术语	(10)
3 结构倒塌控制设计指南(推荐版)	(14)
3.1 设计方案	(14)
3.1.1 建筑和结构设计方案	(14)
3.1.2 抗火设计方案	(20)
3.1.3 抗火方案:设备和灭火系统	(25)
3.2 评估方法	(30)
3.2.1 目标设定	(30)
3.2.2 评估流程	(30)
3.2.3 冗余度评估	(34)
4 防止竖向荷载作用下结构连续性倒塌的对策	(39)
4.1 高层钢结构柱失效后的性态分析	(39)
4.1.1 结构冗余度作用的研究	(39)
4.1.2 偶然荷载作用下构件失效后的高层钢结构的性态分析	(39)
4.1.3 大跨度梁的极限承载力试分析	(47)
4.1.4 钢结构的冗余度和特征	(50)

4.2	框架结构体系和火灾区域对冗余度的影响	(50)
4.2.1	热变形分析	(50)
4.2.2	火灾区域的影响	(50)
4.2.3	框架结构体系的影响	(53)
4.3	构件截面尺寸和钢材种类对冗余度的影响	(56)
4.3.1	目标	(56)
4.3.2	受荷构件的抗火试验概述	(56)
4.3.3	受荷构件的抗火试验:A组试件	(57)
4.3.4	受荷构件的抗火试验:B组试件	(58)
4.3.5	提高结构冗余度的措施	(59)
5	大型空间结构冗余度的基本概念	(61)
5.1	采用敏感性分析评估和确保空间结构冗余度的方法	(61)
5.2	创建具有高冗余度的空间结构形式	(62)
5.3	确保空间结构冗余度的若干措施总结	(62)
6	提高结构冗余度的有效材料和方法	(63)
6.1	用于新建建筑的材料和方法	(63)
6.1.1	高性能钢材	(63)
6.1.2	CFT 结构	(69)
6.1.3	防火保护措施	(71)
6.2	已有建筑的材料和方法	(73)
第 II 篇 研究		(75)
7	敏感性分析和结构冗余系数	(77)
7.1	竖向承载性能的敏感性分析	(77)
7.1.1	冗余度和关键构件	(77)
7.1.2	敏感性分析	(77)
7.1.3	平面框架结构的敏感性分析	(79)
7.1.4	空间框架结构的敏感性分析	(83)
7.1.5	结论	(85)
7.2	大型空间结构冗余度的基础研究	(87)
7.2.1	引言	(87)
7.2.2	Pandey 的敏感性分析方法	(87)
7.2.3	敏感性分析方法	(88)
7.2.4	数值分析示例	(89)
7.2.5	结论	(90)
8	钢框架结构在构件失效情况下的性能分析	(91)
8.1	Bazant 和 Zhou 倒塌机制的简单分析法	(91)
8.2	竖向承载能力的冗余度及其防止连续性倒塌的可能性	(91)
8.2.1	坠落构件的冲击导致单一楼层倒塌的条件	(91)

8.2.2	AIJ 规定的柱子容许抗压承载力计算公式和屈曲后稳定承载力 计算公式	(91)
8.2.3	屈曲大变形后构件稳定承载力的试验研究	(95)
8.2.4	防止结构出现连续性倒塌的可能性	(98)
8.3	高层结构局部倒塌后的承载能力计算	(99)
8.3.1	目标	(99)
8.3.2	日本高层钢结构的特点	(99)
8.3.3	常规设计的高层结构遭受局部破坏时的计算概况	(101)
8.3.4	试分析 1:模型 A 在柱失效情况下的试分析	(101)
8.3.5	试分析 2:模型 B 在柱失效情况下的试分析	(115)
8.3.6	试分析 3:大跨度主梁的极限承载力	(134)
8.4	高层结构柱失效状态下的性能分析及简单倒塌判别法	(140)
8.4.1	研究示例 1:基准模型分析	(140)
8.4.2	研究示例 2:顶部加强桁架的作用	(146)
8.4.3	研究示例 3:NIKKEN SEKKEI 模型	(151)
9	火灾下钢框架性能的研究	(153)
9.1	火灾下钢框架的稳定性	(153)
9.1.1	引言	(153)
9.1.2	框架柱的屈曲温度	(153)
9.1.3	柱子高温屈曲后的框架反应	(155)
9.1.4	包括失稳过程的框架温度变形分析	(158)
9.1.5	高温下钢框架结构稳定性的概要	(159)
9.1.6	结论	(163)
9.2	火灾下高层结构反应分析与倒塌评估简易方法	(163)
9.2.1	第一阶段研究:基本分析	(163)
9.2.2	第二阶段研究:帽型结构对荷载重分布的作用	(184)
9.2.3	第三阶段研究:防火分隔的作用	(201)
9.2.4	评估框架倒塌的简易方法	(205)
9.3	大截面与耐火钢材对提高火灾下高层钢结构建筑冗余度的作用	(207)
9.3.1	引言	(207)
9.3.2	系列 A 试验	(208)
9.3.3	系列 B 试验	(213)
9.4	钢框架的抗火能力	(217)
9.4.1	前言	(217)
9.4.2	火灾升温	(217)
9.4.3	防火层和钢框架温度	(218)
9.4.4	钢框架的抗火承载力	(220)
9.4.5	结论与建议	(224)
附录		(225)
附录 A	钢材的应力-应变关系	(225)

附录 B 自由曲面的弹塑性屈曲特征	(226)
B.1 构件的总长度基本相同的情况,其中弦杆的整体稳定计算长度是均匀的 ...	(226)
B.2 初始屈曲时的内力状况	(230)
附录 C 典型框架的失稳运动	(232)
参考文献	(233)

第 I 篇 设计

I Design

1 绪 论

1.1 高层钢结构房屋冗余度研究委员会

美国于2001年9月11日发生了世贸中心(WTC)塔楼的倒塌事件。在电视上频频看到的连续性倒塌情景是一个动力过程,这对钢结构广泛应用于高层建筑和大跨度建筑的日本而言,已经不能再将其简单看作是一个特例事件而忽视了。鉴于此,受日本钢铁联盟的委托,一个研究高层钢结构房屋冗余度的委员会于2002年6月成立,历时两年的研究,完成了《高冗余度钢结构倒塌控制设计指南》(以下简称《指南》)一书。

2001年11月,日本建筑学会成立了一个调查美国世贸中心倒塌事件的特别委员会。2003年8月,该委员会完成了一份关于世贸中心倒塌原因的报告。高层钢结构房屋冗余度研究委员会并非承担日本建筑学会的调查任务,而是研究高层钢结构建筑的设计方法,使之能够抵抗连续坍塌,或者说使之拥有较高的冗余度。

1.2 世贸中心

1.2.1 工程概况

世贸中心是纽约市曼哈顿岛南端一组建筑群的总称,它汇集了各种类型的从事国际贸易的私人公司和公共机构。世贸中心由7幢建筑组成,包括2幢110层的高层建筑、4幢8~22层建筑,以及1幢大街对面的47层高的建筑。这个建筑群的地下室深达6层。工程始建于1966年,于1973年竣工。

该工程的建筑设计由 Minoru Yamasaki 承担,结构设计由 Skilling, Helle, Christiansen 和 Robertson 西雅图的设计事务所完成。最终的设计由 Leslie Robertson 审定。在世贸中心的施工期间,日本很多施工领域的技术人员进行过现场参观。它极大地影响了日本高层建筑的设计和结构技术,并且在建成后的近30年内,一直被认为是同时期文明社会的一个象征,甚至在30年后,世贸中心的结构体系仍然被认为是合理性发挥到极致的一个范例。

1.2.2 “911”事件

美国航空公司(American Airline)11号航班的波音767飞机遭到劫持,于2001年9月11日早晨8:45几乎水平地撞上了世贸中心的北楼(WTC 1)侧面,撞击部位位于94~98层之间。18分钟后,联合航空(United Airline)175号航班的波音767飞机沿对角方向撞上了世贸中心南楼的(WTC 2)东面,撞击部位为78~82层之间。早晨9:50,南楼受冲击层的上部开始倾斜,随后上部向下部的坍塌引起了连续性坍塌。早晨10:28,北楼的天线倒塌后,上部向下部的坍塌也引起了连续性坍塌。这两幢楼倒塌所造成的破坏不仅影响了世贸中心区域,也殃及了周边建筑。

1.2.3 世贸中心倒塌原因

根据美国政府的调查报告(FEMA 报告),喷气机燃料在撞击发生后燃烧了数分钟,由于燃料因重力作用向低层流动,点燃了多处物体,使得若干层楼都发生了火灾。报告指出,受影响楼层中的家具、器皿、文档和其他物品长时间的燃烧所产生的火和热是导致世贸中心倒塌的直接原因。

从结构角度而言,首先,撞击导致外框筒柱和内框筒柱的破坏,同时伴随着楼层的坍塌;其次,以角钢做弦杆、圆钢做腹杆的楼面桁架受热膨胀,发生悬链线形的较大挠曲,并开始坍塌;同时,内外框筒柱受到高温影响,其材料的杨氏弹性模量和强度降低;接下来,由于楼板的坍塌,原先以楼板为水平支承保持稳定的柱子由于失去了支承导致无约束长度增大,从而失去了承受竖向荷载的能力;最后,已遭受冲击的上部楼层跌落数米至更低楼层上,而该楼层无法承受其上所有荷载,导致结构发生了连续性的坍塌。

世贸中心两幢塔楼的上部均有刚度很大的巨型伸臂桁架,该桁架有6层楼高,沿内筒平面共计4榀,从而大大增强了核心框架与外围结构的整体性。由于采用了外围密柱抗弯框架结构和巨型伸臂桁架结构,使得结构由局部坍塌到整体逐步倒塌的时间大大延长了。

自从世贸中心倒塌以后,不仅仅在美国,在日本也引起了关于结构冗余度的广泛讨论。冗余度应该成为结构设计中必须考虑的概念之一。世贸中心的两幢楼(WTC 1 和 WTC 2)在受到撞击以后持续站立了1h的事实说明,这两幢楼具有足够的冗余度。但是,两幢楼在经历了长时间的燃烧后以自由降落的方式倒塌的情形是一种连续性的倒塌,又不是典型的具有充分冗余度的建筑的特征。

街区对面的WTC 7是一个在低层部位安放发电设备、燃料储藏设备和电力传输设备的建筑。它最终的倒塌是由结构物起火伴随着屋内设施的燃烧,以及事发后长达7h内没有得到灭火救助等多方面的因素造成的。发电设备用房采用的是大跨度框架结构,其巨型转换梁支承着上部结构的柱子。该框架由于长时间处于高温环境中,从而丧失了承载能力,并导致整个建筑物的连续性倒塌。WTC 7由于持续时间长达数小时的大规模火灾而倒塌震惊了相关领域的专家。由于强烈地震后的市区经常会发生大规模的火灾,所以专家们认为日本的高层建筑设计中应该将这种导致倒塌的原因考虑进去。

1.2.4 美国调查报告的结论

美国的调查报告在研究了世贸中心的倒塌过程后,列举了以下几点防范措施和观点。与此相应,日本钢结构协会成立一个新的高层钢结构房屋冗余度委员会,开始对钢结构房屋冗余度进行研究。

- (1) 结构具有鲁棒性(robust)和冗余度的重要性;
- (2) 提供紧急情况下疏散用的、且拥有照明指示的楼梯间;
- (3) 对租户进行紧急撤离训练;
- (4) 给疏散通道砌筑抗冲击墙;
- (5) 设置可以防止因强风、冲击以及构件变形而脱落的防火围护;
- (6) 紧急疏散楼梯间不应集中于建筑物的中心而应分散布置;
- (7) 喷淋装置应该有充足的供水能力;
- (8) 确保冲击和火灾作用下的钢结构节点性能;

- (9) 应发展能够预测结构构件在升温和火灾下结构性能的设计方法；
- (10) 对结构工程师和消防工程师进行两种领域的交互技术培训；
- (11) 发展一种能够预测火势传播的方法；
- (12) 建立关于构件火灾性能的数据库；
- (13) 紧急情况下，允许动用升降机运送消防队员和火灾中的被困人员；
- (14) 对消防员进行钢结构火灾的教育；
- (15) 为在紧急情况下提出合适的现场决策，帮助消防员和工程专家建立协作机制。

1.2.5 纽约建筑署提出的对策

鉴于世贸中心的倒塌，纽约市建筑署所辖的美国世贸中心建筑规范特别行动小组于 2003 年提出了对结构设计和施工的建议。关于结构设计方面的建议列举如下，其中有部分建议和日本高层建筑的设计施工也有关联。

- (1) 发行针对结构连续性破坏的结构强度设计指南；
- (2) 禁止在高度超过 75 英尺(约 23 m)的新建高层商业建筑中采用空腹桁架；
- (3) 在楼梯间以及电梯井道采用抗冲击的材料；
- (4) 非火灾事件中全楼疏散计划的制定将义务化；
- (5) 在建筑物改建中，构件防火性能是否得到保护，必须通过具有资质的人员检查；
- (6) 15 年内，在所有高于 100 英尺(约 30 m)的没有喷淋系统的高层商业建筑中建立喷淋系统；
- (7) 要求所有商务楼做好消防用的“楼宇信息卡”；
- (8) 在高层商务楼中改进紧急火灾情况下的通信能力；
- (9) 为防火安全责任人提供附加的专业训练；
- (10) 使用紧急发电用的常备储油罐系统时，应限制输油管直径；在非配备常用储油罐系统时，应完善分散输油管的标准；
- (11) 新建商务楼中，空调设备的防火阻断体系须经过建筑署现场检查。

1.3 冗余度

在英文字典中，冗余度称为“redundancy”或“redundant”，其含义是：过多的状态；多余的；使用了多于所需的词语；为防止整个系统失效而对原件的备份；多于静定结构所需的抵抗外力的多余构件。可见，冗余度用于表示提高复杂系统的安全性和信息传递的可靠性。在土木工程和建筑结构中，冗余是指一种状况，“由过多杆件组成的机械和结构，其内力、反力等无法由平衡条件确定”，这种状况就称作冗余或超静定。在检验结构的几何可变性时，冗余度常与超静定结构联系在一起。

含有冗余度概念的系统可用于其他多种领域内。客机中采用多个发动机，即使一个发动机失效，客机仍能继续飞行。城市交通系统包括公路运输、铁路运输以及城市间的海运和空运；因此，当一种运输方式遭到破坏后，其他的运输方式可以替代它，以避免运输的中断。输电网络也利用了这个概念，建立了多条传输路径到达城市区域；即使强风刮倒了一个输电塔，仍然不会造成长时间的输电中断。在日常生活中，当我们发布会议日期或者会议日程表时，一般都同时告知日期和星期，例如 7 月 12 日(星期一)，这是一个典型的通过冗余度提高信息传达