

防止多高层混凝土建筑 渐次倒塌的设计与分析

PREVENTION OF PROGRESSIVE COLLAPSE IN MULTISTORY CONCRETE BUILDINGS



Oklahoma City Federal Building: Then and Now

[美] 弗兰西斯·K·哈梅
史蒂文·M·巴德雷基 著
S·K·戈什
高立人 译

中国建筑工业出版社

防止多高层混凝土建筑渐 倒塌的设计与分

**PREVENTION OF PROGRESSIVE COLLAPSE
IN MULTISTORY CONCRETE BUILDINGS**

弗兰西斯·K·哈梅
[美] 史蒂文·M·巴德雷基
S·K·戈什

高立人

· 中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2009-2842号

图书在版编目 (CIP) 数据

防止多高层混凝土建筑渐次倒塌的设计与分析 / (美) 哈梅, 巴德雷基, 戈什著;
高立人译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010. 10
ISBN 978-7-112-12143-4

I. ①防… II. ①哈…②巴…③戈…④高… III. ①多层建筑-混凝土结构-抗震结构-结构设计②高层建筑-混凝土结构-抗震结构-结构设计 IV. ①TU973.1
②TU352.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 096072 号

Copyright © 2006 Structures and Codes Institute (SCI)
Chinese translation copyright © 2010 by China Architecture & Building Press
All rights reserved.

本书由美国 SCI 授权我社在中国翻译、出版、发行本书中文版

责任编辑: 王 跃 戚琳琳
责任设计: 陈 旭
责任校对: 陈晶晶

防止多高层混凝土建筑渐次倒塌的设计与分析

弗兰西斯·K·哈梅
[美] 史蒂文·M·巴德雷基 著
S·K·戈什
高立人 译

*

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
北京嘉泰利德公司制版
北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 880×1230 毫米 1/16 印张: 14½ 字数: 464 千字
2010 年 12 月第一版 2010 年 12 月第一次印刷
定价: 49.00 元
ISBN 978-7-112-12143-4
(19408)

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)

译者序

无论是地震、台风等自然灾害，还是爆炸、撞击等人为事件，结构首先遭受的都是局部破坏。但是，由于原设计没有考虑提供这能起到悬链作用的整体束缚力，或提供这能替补的传至基础的候补传力途径来预防可能会发生的渐次倒塌，则在一个承重竖向构件失去后的重力作用下，构件之间会引起所谓的连锁反应。破坏范围渐次蔓延扩大，最终导致不相称的过大倒塌。据美国有关部门的统计，在这种灾难中，90%以上的死亡人员都是被塌下来的废墟给压死的。

美国土木工程师学会 ASCE 7-02 对此提出了两种可供选择的防止渐次倒塌的设计方法：间接设计（束缚力法）和直接设计（候补传力途径法）。

作者哈梅和巴德雷基长期以来负责防止渐次倒塌的设计与监理；戈什一直从事混凝土建筑物的抗震设计与研究，并是美国混凝土学会（ACI）和抗震工程研究学会（EERI）的指导委员会成员。他们在本书中列举了框架—剪力墙办公楼、板柱—核心筒住宅楼和剪力墙住宅楼这三个工程实例的防止渐次倒塌设计与分析来示范说明束缚力法和候补传力途径法的具体实施。分析结果表明：

（1）这些建筑物原始设计（即按抗重力、抗震与抗风设计）的配筋量已足以满足这整体束缚力的要求，而无需添加任何增补钢筋。但关键的问题是，如何对这些现有钢筋通过合理的连接和端部的锚固来确保这些抗拉束缚钢筋的整体连续性。

（2）在用 GSA 候补传力途径法对这些原始设计进行分析与评估时，根本毋需加大结构构件的尺寸。只需对某些特定部位的配筋进行一定程度的补强即可满足这防止渐次倒塌的要求。关键的问题仍然是要对这些特定部位现有钢筋的中止位置、搭接长度与端部的锚固等细部设计进行仔细认真地评估与修改。

除此之外，在这三个工程实例的设计与分析中，作者根据规定仅用 ETABS 程序进行内力与变形的分析，而对所有的荷载组合、配筋、构件的抗弯、抗剪、抗扭与抗冲切的强度及其钢筋所需的搭接长度、中止位置等都是用手算来完成的。这对想了解手算和美国规范不同之处（如限定的最大设计剪力与扭矩的取值都比我国的小等）的结构设计人员来讲无疑也是一本值得一读的参考资料。参与本书翻译工作的还有高晓红、杨国安、张晓晨与候兵。

高立人

序 言

渐次倒塌是由最初的局部破坏在构件之间所引发的渐进式蔓延扩展而最终导致整个结构或其大部分的一种倒塌。由于渐次倒塌在许多情况下是（但不都是）不相称的过大倒塌，即与这引发事件相比显得过大，所以这种现象已日益倍受关注。

一个由局部破坏渐次引发整栋建筑物过大部分倒塌的突出案例就是罗兰波英特（Ronan Point，英国伦敦东部）1968年由煤气爆炸所引起的灾难。这个案例引起了专业人员对建筑物总结构体系的整体性的高度关注。俄克拉何马州俄克拉何马城的艾尔弗雷德 P. 默拉联邦大厦（Alfred P. Murrah Federal Building）在 1995 年遭遇炸弹爆炸的袭击，摧毁或严重毁坏了 3 根周边的柱子。这被毁坏柱子上方第 3 层楼的转换大梁及其上层楼面都渐次式地倒塌。大约 70% 的这个建筑物遭受了触目惊心的破坏，提供了又一个不相称过大倒塌的知名实例。在这一连串事件后所发生的就是现在大家都熟知的 2001 年 9 月 11 日世贸中心 1、2 双塔的倒塌事件。这无不向我们指出了尽管每一个塔楼的破坏都是一种渐次式的倒塌，但这双塔却都不是所谓的不相称过大倒塌。这就已充分说明，工程必须履行的竟然不是防止这渐次倒塌，而是防止这不相称的过大倒塌。不管是与否，反正倒塌都是渐次式的。本书不想没完没了地去论述这种区别，而关注的就是这渐次式的倒塌。尽管很少明确地阐明过，但不言而喻，渐次倒塌也是不相称的。

最近几年来，美国联邦政府已经推出了在建筑物的设计中处理防止倒塌的若干方法。两个联邦政府部门（即大量房屋的主管部门）——美国公共事务管理局（General Service Administration，简称 GSA）和国防部（Department of Defense，简称 DoD）要求结构工程师们把防止渐次倒塌看做是许多建筑物的设计准则。由这两个政府部门所提供的设计导则体现了在美国现今可得到的关于这个主题的最详尽信息资料。遗憾的是，很少有结构工程师通晓这控制渐次倒塌的 GSA 或 DoD 技术要求条件。甚至更少有人能正确地在设计中去应用它们。本书就是试图在这方面给予提供帮助。正文将示范在以不同结构体系为特征的现浇钢筋混凝土建筑物中，GSA 和 DoD 渐次倒塌控制处理方法的实施。

虽然这本教范手册的主要对象是正在执业的结构工程师，但它对在校的学生、教育工作者、管理人员和那些涉及建筑物设计、施工与审批的人员来讲也是很有用的。而且，评估某建筑物抗渐次倒塌的思考过程对反思该建筑物是怎样作为一个整体来受力的是有很大帮助的。

尽管作了各种各样的尝试来使这六章的编辑能做到前后协调一致，但一些前后自相的矛盾总是依然存在。由于这是这本厚书的首版，几乎可以肯定还是能找到一些错误的。笔者会真心地感谢那些向我们指出错误和前后自相矛盾的每一位读者。同时还欢迎对如何改进本书原文的其他建议。

致 谢

S. K. Ghosh 公司的 Prabuddha Dasgupta 对本书厚厚的原稿作了细心地校对，并改善了这些章节之间的一致性。他还设计了本书非常吸引人的封面。在此，对他的诸多贡献致以衷心的感谢！

夏威夷，檀香山

伊利诺伊，巴勒坦

弗兰西斯·K·哈梅
史蒂文·M·巴德雷基
S·K·戈什
2006 年 9 月

目 录

译者序	iii
序 言	iv
第 1 章 概述	1
1.1 出版的目与编排	1
1.2 渐次倒塌的定义	2
1.3 考虑渐次倒塌控制的设计进展	3
1.4 现有防止渐次倒塌的设计准则	5
1.4.1 ACI 318 - 02	6
1.5 钢筋混凝土建筑物的设计考虑因素	7
1.5.1 多道防线的设计方法	7
1.5.2 防止渐次倒塌的钢筋细部设计	8
1.5.2.1 抗渐次倒塌的性能	10
1.5.2.2 抗爆炸的性能	10
1.5.3 ASCE 7 - 02 的设计建议	11
1.5.3.1 合适有效的平面布置	12
1.5.3.2 整体束缚的方法	12
1.5.3.3 连续的转延侧墙	12
1.5.3.4 板在正交方向的附加支撑	12
1.5.3.5 承重内隔墙	13
1.5.3.6 楼板的悬链作用	13
1.5.3.7 墙的深梁作用	13
1.5.3.8 超静定结构体系	14
1.5.3.9 延性功能的细部设计	14
1.5.3.10 分隔成小开间的建筑物	14
1.6 参考文献	15
第 2 章 国防部的 DoD 导则	17
2.1 DoD 导则的发展史	17

2.2	设计的处理方法	18
2.3	材料性能	19
2.4	间接（或被动）设计——束缚力	19
2.4.1	综述	19
2.4.2	内部束缚钢筋	20
2.4.2.1	内部束缚力的推导	22
2.4.3	周边外围束缚钢筋	23
2.4.4	对外柱和外墙的水平束缚钢筋	24
2.4.5	对角柱的水平束缚钢筋	24
2.4.6	竖向束缚钢筋	24
2.5	直接设计——候补传力途径（Alternate Path）	25
2.5.1	分析方法	25
2.5.2	结构构件的去法	25
2.5.2.1	外部与内部构件	27
2.5.2.2	框架与平板结构体系	27
2.5.2.3	承重/剪力墙结构体系	28
2.5.3	荷载组合的规定	30
2.5.4	破坏限度	31
2.5.5	验收标准	31
2.5.5.1	抗弯	31
2.5.5.2	抗轴力与弯矩的组合作用	32
2.5.5.3	抗剪	33
2.5.5.4	节点	33
2.5.5.5	变形	33
2.5.6	候补传力途径分析的归纳	34
2.6	附加延性	35
2.7	板的向上负荷	36
2.8	参考文献	37
第3章	公共事务管理局的 GSA 导则	38
3.1	概述	38
3.2	设计的处理方法	38
3.3	分析的方法	38
3.4	结构构件的去法	39
3.4.1	规则结构造型	39

3.4.1.1 框架或平板结构	40
3.4.1.2 承重/剪力墙结构	40
3.4.2 不规则结构造型	41
3.5 荷载组合的规定	42
3.6 材料与构件性能	42
3.7 破坏限度	43
3.8 验收标准	43
3.9 构件的变形限度	44
3.10 重新设计	46
3.11 参考文献	47
第4章 框架—剪力墙结构体系办公楼	48
4.1 概述	48
4.2 建筑物的简要数据资料	48
4.3 分析方案	49
4.4 渐次倒塌评估的案例情况	50
4.5 对抗震设计等级 SDC A 的分析（普通抗弯框架）	51
4.5.1 设计的资料与数据	51
4.5.2 DoD 的处理方法	53
4.5.2.1 抗拉束缚力的算例	54
4.5.2.2 候补传力途径算例——内柱失去（案例情况 1I）	58
4.5.3 GSA 的处理方法	72
4.5.3.1 综述	72
4.5.3.2 梁的强度（按重力、地震力和风力设计的）	73
4.5.3.3 临近长边中部的柱子失去（案例情况 1E）	74
4.5.3.4 临近短边中部的柱子失去（案例情况 2E）	87
4.5.3.5 角柱的失去（案例情况 3E）	97
4.5.3.6 临近长边中部的柱子失去（案例情况 1E）——板被模拟	104
4.6 对抗震设计等级 SDC D 的分析（特种抗弯框架）	111
4.6.1 设计的资料与数据	111
4.6.2 DoD 的处理方法	113
4.6.2.1 抗拉束缚力的算例	113
4.6.2.2 候补传力途径算例——内柱失去（案例情况 1I）	116
4.6.3 GSA 的处理方法	125
4.6.3.1 综述	125

4.6.3.2	梁的强度 (按重力、地震力和风力设计的)	126
4.6.3.3	临近长边中部的柱子失去 (案例情况 1E)	127
4.6.3.4	临近短边中部的柱子失去 (案例情况 2E)	136
4.6.3.5	角柱的失去 (案例情况 3E)	140
4.7	参考文献	145
第 5 章	板柱—核心筒结构体系住宅楼	147
5.1	概述	147
5.2	设计的资料与数据	148
5.3	现有的配筋详图	149
5.4	DoD 的处理方法	151
5.4.1	抗拉束缚力的算例	151
5.4.1.1	内部束缚钢筋	152
5.4.1.2	周边外围束缚钢筋	154
5.4.1.3	对外柱的水平束缚钢筋	154
5.4.1.4	对角柱的水平束缚钢筋	155
5.4.1.5	竖向束缚钢筋	155
5.4.1.6	所需束缚力的归纳	156
5.4.2	板的抗上举力设计	157
5.4.2.1	板的抗弯	157
5.5	GSA 的处理方法	159
5.5.1	分析模型	159
5.5.2	渐次倒塌的案例情况	161
5.5.3	渐次倒塌分析中的材料性能	162
5.5.4	位于长边中部的柱子失去 (案例情况 1)	163
5.5.4.1	板的检验	163
5.5.4.2	柱子的检验	172
5.5.5	临近短边中部的柱子失去 (案例情况 2)	173
5.5.5.1	板的检验	173
5.5.5.2	柱子的检验	181
5.5.6	角柱的失去 (案例情况 3)	182
5.5.6.1	板的检验	182
5.5.6.2	柱子的检验	188
5.5.7	分析结果的归纳	189
5.6	DoD 和 GSA 处理方法的比较	189

5.7 参考文献	190
第6章 承重/剪力墙结构体系住宅楼	191
6.1 概述	191
6.2 设计的资料与数据	191
6.3 现有的配筋情况	193
6.4 DoD 的处理方法	194
6.4.1 抗拉束缚力的算例	194
6.4.1.1 内部束缚钢筋	195
6.4.1.2 周边外围束缚钢筋	196
6.4.1.3 对外墙的水平束缚钢筋	197
6.4.1.4 对角柱的水平束缚钢筋	197
6.4.1.5 竖向束缚钢筋	197
6.4.1.6 所需束缚力的归纳	197
6.4.2 候补传力途径的算例	198
6.4.2.1 渐次倒塌的案例情况	198
6.4.2.2 分析模型	199
6.4.2.3 荷载组合条件	200
6.4.2.4 现有构件的强度	200
6.4.2.5 建筑物端部的侧墙失去 (案例情况1)	204
6.4.2.6 横断内承重墙的失去 (案例情况2)	211
6.4.2.7 位于角部的墙体失去 (案例情况3)	218
6.4.2.8 拟定结构补强的归纳	218
6.5 GSA 的处理方法	219
6.6 参考文献	219

第 1 章 概述

1.1 出版的目的是与编排

在 1995 年 4 月 Alfred P. Murrah 联邦大厦遭受恶毒攻击而部分倒塌之后，这建筑物总结构体系的整体性和渐次倒塌的控制受到全国的关注。根据视觉观察与分析，联邦政府应急灾害管理局（FEMA）的紧急事故小组判断：渐次倒塌明显地加大了由炸弹爆炸所带来的直接破坏。俄克拉何马城体格检查人员办公室的行动计划主任 Ray Blakeney 估计，该事件所造成的 168 位死亡人数中的 90% 都是被塌下来的废墟给压死的 [1.1]（括号里的数字指的是列在本章最后的参考文献编号）。

后来，2001 年世贸中心双塔的倒塌事件又进一步引起了全国关于渐次倒塌的讨论。如何才能使这 Murrah 联邦大厦和世贸中心双塔免遭（或遭受最低程度的）渐次倒塌呢？现行建筑规范和国家标准能清楚地注释在遭遇各种灾难情况下的结构性状，或有更加严谨的对付方法吗？

现在，国家建筑规范对渐次倒塌的控制还缺乏明确细致的考虑。关于什么样的规定条例（若有的话）应该被纳入建筑规范和不管怎样这些规定条例对所有建筑等级（或建筑物类别）都应该是强制性的议题讨论一直在延续着。不过，结构工程师更赞成，在遭遇非常负荷时的结构性状考虑因素应该是规范标准做法的事情。

眼下，美国联邦政府已经推出了在建筑物的设计中处理防止渐次倒塌的若干方法。两个大量房屋的主管部门，美国公共事务管理局（GSA）和国防部（DoD）要求结构工程师把防止渐次倒塌作为一项设计的标准。这两个组织部门所提供的设计导则体现了美国当前所能得到有关这主题的最全面信息资料。

不过，很少有结构工程师通晓控制渐次倒塌的 GSA 或 DoD 技术要求条件。这可归因于它确实与抗风和抗震的设计不同，渐次倒塌的控制还缺少一套全国各地都确认的设计方法。在一些文件中仅提供了大概的指导，但却没有所需量值或可供实施上的基本要求条件。

出版本书的目的就是试图帮助填补这种资料上的空白。正文示范了 GSA 和 DoD 控制现浇钢筋混凝土建筑物渐次倒塌方法的具体实施过程，以帮助正在执业的结构工程师了解这不同结构体系防止渐次倒塌的设计方法与过程。尽管这些例题必然都是特定的，但这些基本原理还是都可适用于所有的建筑结构的。各章的主题概述如下：

第 1 章——关于渐次倒塌的简要论述；

第 2 章——DoD 渐次倒塌控制方法概要；

第 3 章——GSA 渐次倒塌控制方法概要；

第 4 章——带有抗弯框架办公楼的控制渐次倒塌例题设计；

第 5 章——带有平板结构住宅楼的控制渐次倒塌例题设计；

第 6 章——承重墙结构体系住宅楼的控制渐次倒塌例题设计。

为了说明 DoD 和 GSA 设计方法的运用,对这三个例题作了详细的介绍。这些例题中的建筑物首先按重力、风荷载和地震力的组合作用来进行设计,然后再来检验和控制渐次倒塌。这重力和侧向荷载的设计直接取之于由 S. K. Ghosh 和 David A. Fanella 编著的《混凝土建筑物的抗震与抗风设计》(《Seismic and Wind Design of Concrete Buildings》)[1.2]。选择这些例题有下面三个原因:

(1) 这些例题代表了那些需要按重力、风荷载和地震力的组合作用来进行设计的典型钢筋混凝土建筑物。从上述的参考资料中引用这些工程实例是为了避免再重述那些与本书主题无关的内容。本书的中心思想是集中在这渐次倒塌的分析上。读者如果想了解更全面的抗重力、抗风和抗震设计的详情就可去参阅这本《混凝土建筑物的抗震与抗风设计》。

(2) 这些例题都是按照 2000 年出版的《国际建筑规范》(2000 IBC)[1.3]、《ASCE 建筑物和其他结构的标准最小设计荷载》(ASCE 7-98)[1.4]和《结构混凝土的建筑规范要求》(ACI 318-99)[1.5]的规定来进行设计的。

(3) 这些所选用的例题代表了在实践中常遇到的三种主要钢筋混凝土结构体系。

1.2 渐次倒塌的定义

ASCE 7-02 [1.6] 的条文说明将渐次倒塌定义为“由最初的局部破坏在构件之间所引发的渐进式蔓延扩展而最终导致整个结构或不相称的大部分倒塌”。渐次倒塌的开始可由设计中未曾考虑到的非故意超载、误用设施或异常负荷(如意外爆炸或恐怖行为)引起,渐次倒塌势必会加大人员伤亡和幸存者被困的可能性。

一个渐次倒塌的工程实例发生在俄克拉何马城的 Alfred P. Murrah 联邦大厦,在这个 9 层楼的建筑物中接近 50% 的可使用楼面倒塌。主要的结构破坏集中在该建筑物面临爆炸的北侧(见图 1-1)。大厦建于 1974~1976 年,其主要结构体系由按 ACI 318-71 [1.7] 规范设计的普通钢筋混凝土抗弯框架组成,尽管细部设计做得不错,但这 Marrah 联邦大厦未被要求按抗震、防爆或预防其他任何极罕遇的

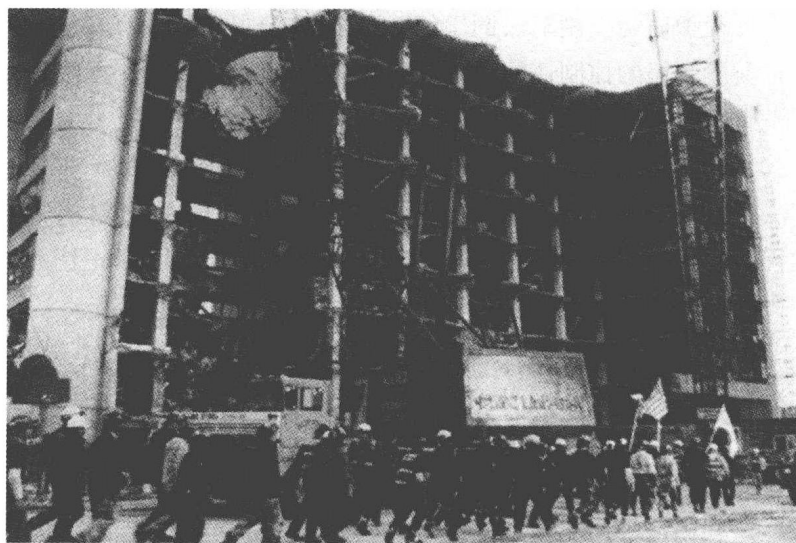


图 1-1 俄克拉何马城的 Alfred P. Murrah 联邦大厦

荷载来进行设计。这结构问题的另外一个主要方面就是第三层楼的转换大梁，它支撑着上部的中间柱和给底层提供了 40 英尺（12.2m）宽的柱间距。

由于这炸弹的规模达 4000 磅（1814kg）TNT 当量，再加上爆炸位置与大厦靠得很近，则不可避免地会引致广泛普遍的破坏。不过，凡具有较多赘余度和延性功能的结构体系是能有效地减低渐次倒塌程度的。像特种钢筋混凝土抗弯框架这类按抗震细部设计的结构体系和带有多道防线的双重结构体系都能减小灾难性事件所带来的破坏。把建筑物划分成小开间是提供结构整体性和阻抗渐次倒塌的另外一种方法。在带有间隔墙的建筑中，采用高百分率的承重墙则势必会加大结构的超静定性。尽管这小的模数单元空间不适合用于办公楼，但对住宅建筑物来讲还是很有效能的。

这带有承重间隔墙建筑物的一个案情实例就是位于沙特阿拉伯达赫拉姆的 Khobar 塔楼。1996 年 6 月这 Khobar 塔楼（当时为美国空军人员和其他盟军的驻地）成为恐怖分子袭击的目标。一辆装有估计相当于 3000 ~ 8000 磅（1362 ~ 3632kg）TNT 当量的燃料卡车在塔楼的北边沿围栏外面被引爆。19 名部队战士死亡、约 500 多人受伤。

Khobar 塔楼虽然破坏严重（见图 1-2），但没有发生渐次式的倒塌。和 Murrah 联邦大厦截然不同的是，这死亡和受伤差不多都是由崩射进宿舍的破碎玻璃窗造成的，而不是结构的倒塌，这是一个在 ASCE 7-02 的标题为“提供总体结构整体性导则”的注解中所论述一栋体现诸多设计基本原则的建筑物的真实例子（见本书 1.5.3 节）。

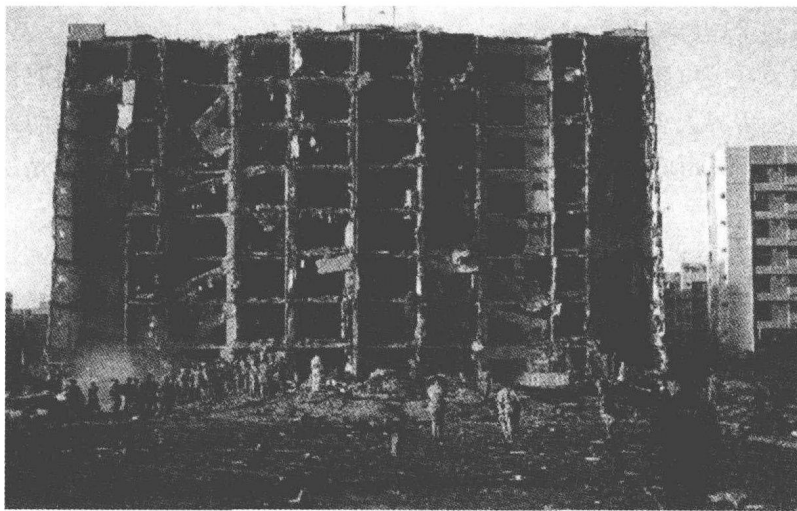


图 1-2 沙特阿拉伯达赫拉姆的 Khobar 塔楼

1.3 考虑渐次倒塌控制的设计进展

自古以来，建筑物的性状就一直是备受人们关注的问题。这写于公元前 2200 年的《哈穆拉比法典》（the Code of Hammurabi）的摘录强调了这正确合理的建筑结构的关键重要性。

“如果某营造者为某人盖一栋房子而没有把它的结构做得坚固牢靠并造成房子倒塌和该房子主人的死——这营造者必须被处于死刑”。



图 1-3 英国纽罕姆的 Ronan Point 公寓楼

在现今，这些建筑规范都已进化成能从自然和非天然的人为灾难中吸取教训来调整设计的要求条件了。例如，安德鲁飓风所造成的巨大损失促使南佛罗里达制定了更严格的抗风设计要求。同样，北岭地震引发了对相关钢框架建筑物焊接接头的研究和规范条文的修改。

这引发在设计过程中需要考虑防止渐次倒塌的一件大事就是 1968 年 5 月 16 日发生在英国纽罕姆的一件 23 层 Ronan Point 公寓楼的部分倒塌事件（见图 1-3）。由这第 18 层楼一间套房里划火柴所引发的煤气爆炸致使一道靠近该建筑物拐角的预制混凝土承重墙板破坏，并从原位消失。这个竖向支承构件的丧失导致该部位的楼盖和墙沿这大楼的整个高度渐次倒塌。这 Ronan Point 公寓楼的倒塌事件对工程界人士是特别具有启发性的，并且导致英国的规范作了重要的改动，但美国的规范仅作了有限的改动与论述。

尽管整个建筑物全部都渐次倒塌的事件罕有，但这种事件令人难忘的固有特征却接二连三地引致对这个问题的关注。就像图 1-4 所显示说明的那样，主要建筑规范关于渐次倒塌控制的相关修订往往都是在紧随严重的灾难事件之后才进行的。不过，在过去的五年里，这个方面所做的工作已有显著地增加。

这时程图也说明了这美国防止渐次倒塌的设计导则在比较短的时间范围内取得了进展。在这个开始推陈出新的阶段，工程界人士关于控制渐次倒塌的最切合方法几乎没有统一的意见。本书中所列举的两个主要文件（GSA 和 DoD）的设计导则清楚地阐明了这些不同的意见。这情况也是和那些较老的

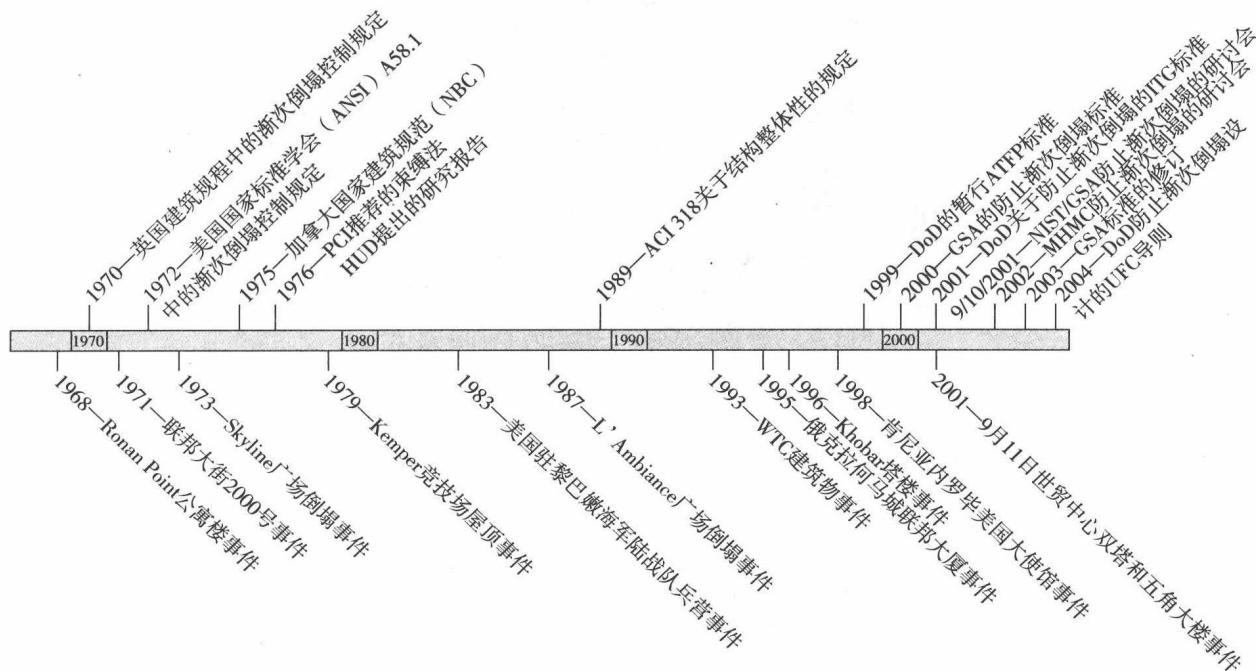


图 1-4 建筑物灾难与规范相关的推陈出新时程图

典型规范（即 BOCA [1.8]、SBC [1.9] 和 UBC [1.10]）中有关抗风和抗震设计规定条款的进化过程一样的。这 GSA 和 DoD 防止渐次倒塌文件的编制者们也都是在颇为独立进行研究的状况下工作的。另外，现有的防止渐次倒塌导则还没有顺利完成进化的演变过程来呈献抗风和抗震的规定条款，其中包括从历次大地震和飓风灾难事件中吸取的经验教训。

1.4 现有防止渐次倒塌的设计准则

许多建筑规范、标准和设计导则（国家的和国际的）都包含有关防止渐次倒塌的论述（见表 1-1）。不过，这些文件的指导深度却有相当大的不同。在美国，没有国家级的典型建筑规范明确地论述这渐次倒塌的控制。ASCE 7-02 只是在它的注解本中作了阻止渐次倒塌的大概论述（见本书的 1.5.3 节），但没有可定量分析或可实施的技术要求条件。

现在，大多数按照明确的防止渐次倒塌要求条件来进行设计的建筑结构都是属于国防部（DoD）和美国公共事务管理局（GSA）所拥有的或租有的政府设施。这两个政府部门都已推行了为控制渐次倒塌的可定量分析和可具体实施的方法。民营部门还没有类似的导则或标准。由于它们导则的全面性，所以这本设计手册中的例题都是采用 DoD 和 GSA 这两种方法来评估抗渐次倒塌的。这 DoD 和 GSA 方法的详细讨论将依次分别在第 2 章和第 3 章介绍。

DoD 和 GSA 为控制渐次倒塌所持有的设计理念（无论采用某种分析方法）都可适用于所有的建筑物。借助以多赘余度、连续性和延性为目标的概念设计来提供总体结构的整体性是一种能勉励所有结构设计人员去思考的切实可行的办法。虽然 ACI 318 在这方面不像 DoD 和 GSA 导则那样全面完备，但它提供了一些通用的细部设计要求条件以致力提高钢筋混凝土建筑物的结构整体性（和以此来减少渐次倒塌的潜在可能性）。

主要规范和标准防止渐次倒塌要求一览表

表 1-1

标准或主管部门	文件	要求条件	评注
美国国防部（DoD）	UFC 4-010-01,《DoD 建筑物的最低防恐怖行为标准》（2003 年 10 月 8 日）[1 11] 和 UFC 4-023-03,《建筑物的抗渐次倒塌设计》（2004 年 10 月 18 日）[1 12]	对所有 DoD 的新建筑物和大型老房改造：三层或三层以上的建筑物都必须考虑防止渐次倒塌的问题	设计方法取决于对该设施所要求的防御等级，对于特低和低防御等级的（大多数 DoD 建筑物）采用间接设计法（即束缚力法），而对于中和高防御等级的则采用间接和直接设计法（即候补传力途径法）
美国公共事务管理局（GSA）	《新建联邦办公大楼与重点现代化工程项目的渐次倒塌分析和设计导则》（2003 年 7 月）[1 13]	对新建的联邦办公大楼和重点现代化工程项目，文件规定了确定去掉某些支承后不应导致上部结构倒塌的方法与措施	采用候补传力途径的设计方法，并通过运用需—供比（demand—capacity ratios, DCR）来确定验收标准
美国土木工程师学会（ASCE）	ASCE 7-02,《建筑物和其他结构的最小设计荷载》（2002）[1 6]	注解含有关于减小渐次倒塌潜在可能性的大概论述，但没有提供可定量分析或可实施的技术要求条件	论述了两种可供选择的抗渐次倒塌设计方法：直接设计（候补传力途径法或特定局部抗力法）和间接设计

续表

标准或主管部门	文件	要求条件	评注
美国混凝土学会 (ACI)	ACI 318, 《结构混凝土的建筑规范要求》(2002) [1 14]	尽管没有明确地顾及渐次倒塌的问题, 但要求对结构的整体性进行加强, 以提高超静定性和延性	例如, 现浇混凝土建筑物的规定条文明确要求了这周边梁里上下连续贯通钢筋的最少含量
英国陛下文书局 (UK)	《建筑规程》(1992) [1 15]	提出了要求防止五层或五层以上的所有建筑物不相称过大倒塌的准则	规定了三个层次的设计方法, 其中包括: 提供有效的约束力、候补传力途径和特定的局部抗力
加拿大研究委员会	《加拿大国家建筑规范》(1995) [1 16]	含有限止由局部破坏导致不相称过大倒塌的预防措施的大概论述	论述了数十年来的某些渐次倒塌形式。至于具体的指导性建议见 NBC 1995 的结构注解 (第 4 部分) [1 16]

1. 4. 1 ACI 318 -02

ACI 318 含有提高在遭遇意外负荷情况下的总体结构整体性的规定。ACI 318 -02 第 7. 13 条对结构整体性的要求提出了一种处理渐次倒塌问题的间接方法。就像第 7. 13 条的注解所陈述的那样, “本规范这一条的意图是要求提高结构的超静定性和延性, 为的是在一个主要支承构件遭遇破坏的事件中, 或在遭遇非正常负荷的事件中都能将其所造成的破坏限制在相对较小的范围内”。

第 7. 13 条规定了一些关于钢筋的基本细部设计要求, 这些要求有助于将总体结构束缚在一起, 以提供抵抗渐次倒塌的能力。在 ACI 318 的 2002 版本里, 这第 7. 13 条作了如下的修订。

- (1) 用来连接钢筋的机械连接接头和焊接接头应符合现行容许的结构整体性要求。
- (2) 现行规范要求使用带有握裹顶部连续纵向钢筋的不小于 135°弯钩的 U 形箍筋, 也可以选用整根封闭式的箍筋。对于圈拢连续纵向钢筋的箍筋规定条文已修订为排除使用上下两根配套而成且不带 135°弯钩的这种封闭式箍筋, 因为这箍筋上部的单根横筋是无法阻止顶部连续纵向钢筋偏离梁的顶面的。

表 1 - 2 和图 1 - 5 归纳了 ACI 对结构整体性的要求。

ACI 318 -02 对结构整体性的要求			表 1 - 2
构件	条文	配筋要求 *	钢筋的接头位置与锚固要求
密肋 (梁)	7 13 2 1	应有 1 根连续贯通的底部钢筋	钢筋的接头应设置在或靠近支座处。在边支座应提供标准的弯钩
周边梁	7 13 2 2 和 7 13 2 3	应连续贯通的顶部钢筋: 为支座处负弯矩所需钢筋面积的 1/6 (最少 2 根)	钢筋的接头应设置在或靠近跨中处。在边支座应提供标准的弯钩
		应连续贯通的底部钢筋: 为跨中正弯矩所需钢筋面积的 1/4 (最少 2 根)	钢筋的接头应设置在或靠近支座处。在边支座和梁截面高度的变换处应提供标准的弯钩
		所有连续贯通的钢筋都应该用 U 形箍筋或整根封闭式的箍筋来圈拢	U 形箍筋和整根封闭式的箍筋都应设有不小于 135°的弯钩来握裹连续贯通的顶部钢筋
除周边以外的其他梁	7 13 2 4	如果没有像周边梁所规定的那样来提供箍筋, 则跨中正弯矩所需的底部钢筋面积的 1/4 应该是连续贯通的 (最少 2 根)	钢筋的接头应设置在或靠近支座处。在边支座和梁截面高度的变换处应提供标准的弯钩