



土木工程结构研究新进展丛书

清华大学抗震防灾与高性能结构研究组报告集 ①

混凝土结构防连续倒塌理论 与 设计方法研究

Theory and design method for progressive collapse
prevention of concrete structures

陆新征 李 易 叶列平 著

Xin-Zheng LU, Yi LI, Lie-Ping YE

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构防连续倒塌理论与设计方法研究/陆新征等著.

北京:中国建筑工程出版社,2011.11

土木工程结构研究新进展丛书

ISBN 978-7-112-13657-5

I. ①混… II. ①陆… III. ①混凝土结构-坍塌-防治-结构设计 IV. ①TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 208160 号

建筑结构的连续倒塌是指由于偶然作用(如煤气爆炸、炸弹袭击、车辆撞击、火灾等)造成结构局部破坏,并引发连锁反应导致破坏向结构的其他部分扩散,最终造成结构的大范围坍塌。近年来,建筑结构的连续倒塌问题受到工程界的广泛关注,并成为当前结构工程和防灾减灾领域的重要研究前沿。本书配合我国相关规范规程的编制工作,系统介绍了混凝土结构防连续倒塌的理论和工程设计方法,主要包括:国内外建筑结构防连续倒塌设计的发展历程与研究现状,我国典型混凝土结构抗连续倒塌性能的评价,混凝土框架结构的连续倒塌规律和抗连续倒塌工作机理,基于能量原理的混凝土框架结构抗连续倒塌承载力需求分析方法,现有抗连续倒塌工程设计方法的分析、检验和改进,以及混凝土框架结构火灾连续倒塌分析与设计方面的研究进展。

本书可供广大土建专业人员在防连续倒塌分析、设计和研究中参考。

* * *

责任编辑:李天虹

责任设计:董建平

责任校对:刘梦然 姜小莲

土木工程结构研究新进展丛书

清华大学抗震防灾与高性能结构研究组报告集 I

混凝土结构防连续倒塌理论与设计方法研究

Theory and design method for progressive collapse

prevention of concrete structures

陆新征 李 易 叶列平 著

Xin-Zheng LU, Yi LI, Lie-Ping YE

*

中国建筑工程出版社出版、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

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:10 $\frac{3}{4}$ 字数:264千字

2011年11月第一版 2011年11月第一次印刷

定价:28.00元

ISBN 978-7-112-13657-5

(21419)

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

燃气爆炸、恐怖袭击、火灾等偶然作用引起的建筑结构局部破坏后所产生的连续倒塌可能造成生命和财产的严重损失。国际上建筑结构连续倒塌问题的研究始于1969年英国Ronan Point公寓煤气爆炸连续倒塌事故。2001年“911”恐怖袭击导致纽约世贸中心发生连续倒塌后，建筑结构防连续倒塌设计逐渐受到国际土木工程学术界和工程界的广泛关注。近年来，我国建筑结构防连续倒塌设计的需求也日益增长，但相关研究尚不能充分满足工程设计的需要。

早在20世纪90年代，清华大学就在国家自然科学基金等项目的支持下，开展了结构连续倒塌问题的研究工作。陈肇元、江见鲸、刘西拉、崔京浩等前辈学者都为我国工程结构防连续倒塌研究作出了重要的开创性贡献。此后，清华大学抗震防灾研究组在国家相关科研项目的支持下，配合我国相关规范规程的编制工作，对混凝土结构防连续倒塌的理论、分析和设计方法开展了一系列的科学研究和工程实践，本书就是在这些工作的基础上总结撰写而成的。

国际上现有的抗连续倒塌设计方法可分为两类：①不针对灾害荷载作用的抗连续倒塌设计，②针对具体灾害荷载作用的抗连续倒塌设计。本书第2~5章，主要针对第一类抗连续倒塌设计方法，分析了我国混凝土结构的抗连续倒塌性能，研究了混凝土框架结构抗连续倒塌的工作机理，提出了基于能量原理的混凝土框架抗连续倒塌承载力需求分析方法，检验、分析并改进了已有的工程设计方法。本书第6、7章，则针对具体灾害——火灾——作用下混凝土结构的连续倒塌问题，建立了混凝土框架结构的火灾连续倒塌数值分析模型，研究了火灾连续倒塌全过程分析的关键影响因素，提出了混凝土框架结构火灾连续倒塌全过程分析的流程。

本书由陆新征、李易共同撰写，陆新征、叶列平统一定稿。

参加有关研究工作的还有清华大学博士生卢啸、缪志伟、汪训流，硕士生林旭川，本科生梁益、马一飞。在整个研究工作中，还得到了清华大学钱稼茹教授、韩林海教授、时旭东教授、任爱珠教授，中国建筑科学研究院徐有邻研究员、邸小坛研究员，澳大利亚Griffith大学关红博士等的帮助和支持，在此也表示衷心的感谢。

本书的研究工作得到“国家重点基础研究发展计划(973)(2012CB719703)”、“国家科技支撑计划(2006BAJ03A02, 2009BAJ28B01)”、“国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90815025)”和“教育部新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-10-0528)”的支持，特此致谢！并感谢清华大学“力学计算与仿真”实验室和“土木工程安全与耐久教育部重点实验室”提供的高性能计算平台和实验研究条件。

由于作者水平有限，本书中肯定存在许多不足之处，敬请读者批评指正。

2011年8月
北京清华园

目 录

第 1 章 建筑结构连续倒塌设计与研究的现状	1
1.1 建筑结构的连续倒塌问题	1
1.2 典型连续倒塌事件及其对设计方法的影响	3
1.3 抗连续倒塌设计方法	6
1.4 抗连续倒塌的相关研究	17
第 2 章 连续倒塌数值分析方法	21
2.1 纤维梁模型	21
2.2 分层壳模型	26
2.3 构件破坏的模拟	28
第 3 章 混凝土结构抗连续倒塌性能分析和评价	30
3.1 典型 RC 框架结构分析算例	30
3.2 RC 框架结构抗连续倒塌机制研究	32
3.3 RC 框架结构连续倒塌抗力研究	40
3.4 RC 框架结构抗连续倒塌性能评价(鲁棒性/易损性分析)	47
3.5 RC 框架-剪力墙结构抗连续倒塌性能分析	54
第 4 章 基于能量平衡原理的 RC 框架结构连续倒塌抗力需求分析	58
4.1 研究现状	59
4.2 理论框架	60
4.3 梁机制下结构与构件的抗力需求分析	65
4.4 悬链线机制下结构与构件的抗力需求分析	71
第 5 章 RC 框架结构抗连续倒塌的工程设计方法	82
5.1 概念设计法	82
5.2 拆除构件法	83
5.3 拉结强度法	88
5.4 抗连续倒塌的配筋构造要求	100
第 6 章 RC 框架结构火灾连续倒塌数值分析模型	101
6.1 热-力耦合材料本构模型	101

6.2 梁柱纤维梁模型 THUFIBER-T	109
6.3 楼板分层壳模型	115
6.4 RC 框架整体结构火灾连续倒塌数值分析	119
第 7 章 火灾下 RC 框架结构连续倒塌分析与设计建议	122
7.1 整体现浇楼板对 RC 框架抗连续倒塌性能的影响	122
7.2 混凝土高温剥落对 RC 框架抗连续倒塌性能的影响	127
7.3 某实际工程火灾作用下的倒塌事故分析	129
7.4 火灾下 RC 框架结构抗连续倒塌设计的分析方法建议	136
参考文献	140
附录 A 八层 RC 框架算例配筋图	148
附录 B 八层 RC 框架非线性动力拆除构件分析结果	154
附录 C 八层 RC 框架 Pushdown 分析结果	160

第 1 章 建筑结构连续倒塌设计与研究的现状

1.1 建筑结构的连续倒塌问题

近几十年,随着工程技术水平的不断提高,建筑结构向大型化、复杂化方向发展。与此同时,结构安全性要求也不断提高。目前,常规结构设计主要考虑荷载作用的超载概率和材料强度的低强概率,采用可靠度理论来进行构件的承载力极限状态设计,以保证结构的安全性。其结构分析是针对完好结构进行的,如抗震分析和抗风分析等。但在工程结构漫长的使用寿命中,可能遭遇各种偶然突发灾害事件(偶然作用),如爆炸、冲击、火灾等,不可避免地会导致结构局部破坏或损伤,如果剩余结构不能有效承担结构初始破坏和损伤造成的不平衡荷载或内力变化,剩余结构就会进一步发生破坏,这种破坏可能引发多米诺骨牌式的连锁反应,导致破坏在结构系统内不断发展,从而造成结构的大范围严重破坏甚至整个结构的倒塌,也就是连续性倒塌。

Ellingwood(2006)对结构连续倒塌(Progressive collapse)的定义为:由于意外事件(如煤气爆炸、炸弹袭击、车辆撞击、火灾等)导致结构局部破坏或部分子结构损伤,并引发连锁反应导致破坏向结构的其他部分扩散,最终造成结构的大范围坍塌。一般来说,如果结构的最终破坏状态与初始破坏不成比例,即可称之为连续倒塌。(A progressive collapse of a building is initiated by an event that causes local damage that the structural system cannot absorb or contain, and that subsequently propagates throughout the structural system, or a major portion of it, leading to a final damage state that is disproportionate to the local damage that initiated it.)其他文献的定义也与之类似,强调倒塌在结构系统内的传播使得因小范围的初始破坏造成结构大范围的倒塌,如 ASCE7-05(ASCE, 2005)、《工程结构可靠性设计统一标准 GB 50153—2008》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2008)、《高层建筑混凝土结构技术规程 JGJ 3—2010》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010a)。连续倒塌事故往往伴随着严重的生命财产损失和社会影响,比如 2001 年的纽约世界贸易中心大厦双塔连续倒塌事件。因此,如何减少局部破坏对整体结构的影响,防止结构因局部破坏而导致结构整体倒塌或与起因不相称的大范围结构倒塌,成为目前结构工程学科和防灾减灾学科研究的热点之一。

BS8110(BSI, 2002)将结构的抗连续倒塌能力称为结构的鲁棒性(Robustness)。鲁棒性是来自于系统工程学科的概念,是指系统抵御外部环境干扰和内部不确定因素影响而能保持其稳定工作的能力(姜长生等, 1998)。结合结构连续倒塌的定义,可以发现结构连续倒塌问题和传统结构工程设计所关注的构件承载力和变形等问题不同,它关注的是整体结构在个别构件或局部小范围结构破坏失效或损伤这类扰动下结构系统保持其原结构构形的能力。

在部分构件发生局部破坏并失去其原有结构承载功能后(移除),整体结构的受力系统会发生两个显著的变化:首先,初始局部破坏后,原结构的受力模式发生显著变化,比如对于框架结构,如果框架柱失效,则其支撑的框架梁端部可能由负弯矩作用变为正弯矩作用,其支撑的上部框架柱可能由受压变为受拉;其次,在新的受力模式下,结构和构件的抗力需求通常会显著增大,并可能会导致构件的屈服,进而对构件的塑性变形能力提出了更高的要求。因此与常规的结构设计不同,以实现抗连续倒塌为目标的结构设计需要对结构在部分构件失效退出工作后剩余结构和构件的受力模式及抗力需求进行检验与设计,故而结构抗连续倒塌设计需采用专门的设计方法。

自1968年英国Ronan Point公寓煤气爆炸事故使工程界意识到建筑结构的连续倒塌问题以来,相关研究在世界范围内逐渐展开。最早的建筑结构抗连续倒塌规定来自于1970年的英国建筑法案修正案以及1976年版的正式法案(Building Regulations 1976),要求建筑结构在意外荷载作用下不应发生与初始破坏不相称的大范围倒塌(HMSO, 1976)。随后英国设计规范相继增加了关键构件法、拉结强度法、拆除构件法的设计规定并延续至今(ODPM, 2004; BSI, 2002)。美国也在同一时期开展了相关研究工作,对装配式结构的替代传力路径(Building Research Division Team, 1970)和节点性能(Fuller, 1975)提出了设计要求。但是当时工程界并未对建筑结构的连续倒塌问题给予足够的认识,1975年美国“建筑结构连续倒塌研讨会”上85%的与会人员认为ACI318规范的拉结规定能够使结构避免连续倒塌,规范不需要对结构的抗连续倒塌进行专门的规定(Breen, 1980)。1995年Oklahoma州的汽车炸弹事件和2001年“911”事件使建筑结构的连续倒塌问题受到工程界的广泛重视(Crowder et al, 2004),由此引发了大量关于连续倒塌问题的研究工作(Osama, 2006)。此后,欧美一些发达国家先后在其设计规范和设计指南中增加或完善了结构抗连续倒塌的设计条文,如英国规范(ODPM, 2004; BSI, 2002)、欧洲规范(CEN, 2004a; CEN, 2006)和美国规范(ASCE, 2005; ACI, 2008)。美国还制定了专门的抗连续倒塌设计规范(GSA, 2003; DoD, 2010),相对于通用规范(如英国规范、欧洲规范)的原则性规定,专门的抗连续倒塌设计规范对抗连续倒塌设计目标、计算分析方法和结构构造要求等进行了更详细的规定。

“911”事件前,我国关于结构抗连续倒塌的研究成果还比较有限。早期朱幼麟(1988)、万墨林(1990a; 1990b)和朱明程(1994)等人对国内外的连续倒塌事故进行了研究,提出了一些原则性的设计建议。但是相关可操作的设计方法还很缺乏,仅在《混凝土结构设计规范 GB 50010—2002》(中华人民共和国建设部, 2002)中作了概念性说明。近年来,随着我国经济高速发展、不断涌现出大型复杂公共建筑物,以及参与国际工程建设的需求,对建筑结构安全度关注程度不断提高,故而近年来结构抗连续倒塌设计越来越得到重视,比如莫斯科中国贸易中心(朱炳寅等, 2007)、卡塔尔多哈办公楼(傅学怡等, 2008)、虹桥综合交通枢纽(周健等, 2010)、成都双流国际机场(赵广坡等, 2010)、新广州站(蔡建国等, 2010)等重大工程项目中,建筑结构的抗连续倒塌设计问题成为亟需解决的主要课题。2010年编制的《高层建筑混凝土结构技术规程 JGJ 3—2010》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010a)和《混凝土结构设计规范 GB 50010—2010》(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010b)均纳入有关抗连续倒塌设计要求,体现了我国在抗连续倒塌方面一些最新的研究成果。

1.2 典型连续倒塌事件及其对设计方法的影响

结构抗连续倒塌研究与典型连续倒塌案例的研究密切相关,并对建立抗连续倒塌设计方法有重要影响:首先,连续倒塌问题是从重大工程事故中发现的,并且结构连续倒塌中很多特有的问题也是从事故调查分析中发现并引起工程界重视的;其次,结构连续倒塌属于结构整体行为,试验研究花费巨大,而典型倒塌案例为结构连续倒塌研究提供了丰富的第一手资料。

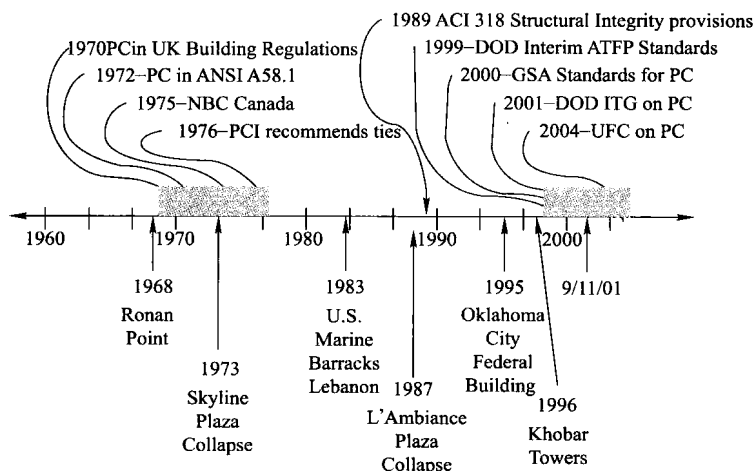


图 1.1 连续倒塌重大事故与设计规范时间表(Crowder et al, 2004)

历史上三次重大结构连续倒塌事件引发了两次建筑结构连续倒塌研究的热潮,它们分别是:1968年英国 Ronan Point 公寓燃气爆炸事件、1995年 Oklahoma 州 Alfred P. Murrah 联邦政府大楼汽车炸弹袭击事件和 2001年纽约世界贸易中心大厦飞机撞击事件。这些重大连续倒塌事故直接促成了结构抗连续设计方法的产生和改进。Crowder 等人(2004)总结了几次重大连续倒塌事故和规范颁布的时间表,如图 1.1 所示。可以发现有两次规范制定和修订的热潮:第一次为 Ronan Point 事件之后,在英国、加拿大等国的结构设计规范中首先引入抗连续倒塌设计内容;第二次为 Oklahoma 事件之后,美国的结构设计规范进一步强化了抗连续倒塌设计的内容,同时一些专门的抗连续倒塌设计规范也开始制定并陆续颁布,而在这期间发生的世贸中心大厦遭恐怖袭击倒塌事件对规范的修订起到了巨大的推动作用。

1.2.1 Ronan Point 公寓倒塌事故

1968年5月16日,22层的英国 Ronan Point 公寓(装配式大板结构)第18层角部房间发生燃气爆炸事故。爆炸造成结构外墙板(局部竖向支撑构件)发生破坏,然而整体结构最终发生倒塌的区域远远超过爆炸直接破坏的区域,最终18层以上的角部结构由于支撑失效而发生大面积倒塌,18层以下的角部结构因上部结构破坏碎片的堆载和冲击作用,也发生大面积倒塌(Griffiths et al, 1968),如图 1.2 所示。

Ronan Point 公寓倒塌事故的分析研究对结构抗连续倒塌设计提供了以下三点启示:

(1) 结构体系的替代传力路径对抗连续倒塌性能有重要影响。Ronan Point 事件中, 当第 18 层外墙板破坏后, 由于螺栓连接承载力不足, 破坏区域上方的结构难以形成有效的替代传力路径, 导致连续倒塌的发生。如果预制墙/板间安放足够的钢筋拉结并合理布置结构构件, 连续倒塌则可以完全避免(Griffiths et al, 1968)。

(2) 对失效后可能带来严重连续倒塌后果的构件, 应视为关键构件进行灾害荷载的检验。试验证实, Ronan Point 公寓的承重墙的抗爆能力(Levy et al, 1992)远小于燃气爆炸产生的冲击力(Bignell et al, 1977)。如果设计时能够考虑到承重墙板可能遭受的意外灾害荷载, 则可避免导致连续倒塌发生的初始破坏。

(3) 高层装配墙板结构的节点连接较为薄弱, 不能提供有效的抗连续倒塌能力。根据 Wearne (2000)的研究, 即使对 Ronan Point 公寓的节点连接进行抗连续倒塌设计, 该结构在风荷载长期作用下的振动也会对其节点连接造成严重的损伤, 使其抗连续倒塌承载力降低。

Ronan Point 事件使结构工程界意识到建筑结构除整体受力的破坏模式外, 还存在因局部构件破坏而引发的整体结构破坏。Ronan Point 事件揭开了结构连续倒塌设计与研究的序幕, 英国、欧洲、美国等一些发达国家相继开展了结构连续倒塌的研究, 相关设计方法也陆续提出(Pearson et al, 2005)。

1.2.2 Alfred P. Murrah 大楼倒塌事故

1995 年 4 月 19 日, 美国 Alfred P. Murrah 联邦政府办公大楼(9 层混凝土框架结构)遭汽车炸弹袭击, 结构发生连续倒塌, 如图 1.3 所示。事故调查显示(Corley, 1996): 在爆炸作用下, G20 柱直接破坏, 其支撑的荷载传递发生转移, 相邻柱 G16 和 G24 受爆炸作用也严重损伤, 两者效果的叠加使得这些柱发生后继破坏, 主梁随即倒塌, 引起整个结构大范围的连续倒塌。



图 1.3 1995 年 Alfred P. Murrah 联邦政府大楼事件



图 1.2 1968 年 Ronan Point 公寓事件

Alfred P. Murrah 事件给抗连续倒塌设计方法研究提供了以下四点启示:

(1) 冗余传力路径对结构抗连续倒塌能力具有显著影响。出于门厅建筑布置的需要, Murrah 大楼外围轴线上底层框架的高度和跨度分别是内部框架层高和跨度的两倍, Sozen 等人(1998)通过分析发现, 外围轴线上任意一个柱发生破坏, 结构就不能承担自身荷载而发生连续倒塌。

(2) 抗连续倒塌设计需要考虑反向荷载作用。Corley 等人(1996)发现 Murrah 大楼的楼板是按向下的重力荷载设计的,而事件发生时,破坏区域的楼板在向上的爆炸作用下已经破坏失效,楼面荷载坠落造成下层结构的过载,进而造成更严重的倒塌破坏。

(3) 抗震设计对建筑结构抗连续倒塌能力的影响。Murrah 大楼未进行抗震设计,因此研究人员想要知道如果采用抗震设计,该大楼是否还会发生如此严重的连续倒塌。Corley 等人(1996; 1998)认为抗震设计的构造要求,如钢筋的连续性和可靠锚固,能够增强结构的延性,进而增强 Murrah 大楼的抗连续倒塌能力。Hayes 等人(2005)研究发现,抗震加固方式中增设内部剪力墙不能提高遭受爆炸作用的外围框架的抗连续倒塌能力,而附加抗震框架的方式能够减小爆炸直接产生的破坏和连续倒塌的程度。

(4) 从防护角度来减轻结构遭受的意外荷载,从而达到减小结构初始破坏的可能性或减小初始破坏程度的目的。Hinman 等人(1997)研究了 Murrah 大楼遭受的爆炸荷载,建议结构体系设计从防止、减缓和控制三个方面减轻意外袭击及其造成的后果,并给出一些建筑和结构方案建议。

在 Alfred P. Murrah 事件以前,工程界普遍认为发生意外事故,并造成可引起结构连续倒塌的局部破坏是一个小概率事件,因此建筑结构抗连续倒塌设计的应用前景有限。但 McGuire(1974)认为结构意外荷载的发生频率将会增加,连续倒塌将会成为建筑结构安全的一大威胁。随着管道燃气的普及、反恐需求的提高,工程界意识到对部分易遭受意外灾害荷载和恐怖袭击的建筑物有必要进行系统的抗连续倒塌设计,欧美的设计规范也增加了抗连续倒塌设计的要求。在 Alfred P. Murrah 事件的影响下,美国总务部和国防部分别颁布了各自的抗连续倒塌设计专用规范(Crowder et al, 2004)。

1.2.3 世贸大厦倒塌事故

2001 年 9 月 11 日,纽约世界贸易中心(WTC)双塔遭受飞机撞击,机内燃油引起楼内大火,南楼在撞击后 56 分钟开始倒塌,北楼在撞击后 102 分钟开始倒塌。美国国家标准与技术研究院 NIST 事故调查组(2005)通过数值模拟与录像资料的比对,详细研究了飞机撞击、燃油扩散、火场分布、构件与结构破坏等四个过程,认为结构的冲击破坏、火灾损伤和外围承载柱的失稳破坏是造成 WTC 双塔发生连续倒塌的主要原因。NIST(2005)建议未来的规范设计方法应从以下三个方面增强结构的抗连续倒塌能力:①节点的连续性、承载力和延性;②局部薄弱部位的加强;③替代传力路径。

世贸大厦事件给结构抗连续倒塌设计方法的研究提供了以下两点启示:

(1) 初始局部破坏可能对结构的原有受力模式产生影响,进而影响结构的抗连续倒塌性能。在该事件中,飞机撞击对 WTC 楼板体系和内部核心筒框架柱造成了严重的破坏,而由此产生的内力重分布使外围桁架承担了大量荷载,使得大楼在飞机撞击后没有立即倒塌(Omika et al, 2005)。而由于火灾的作用,楼板对 WTC 外围桁架柱的侧向约束减弱,导致外围桁架柱失稳破坏,进而引发连续倒塌(Usmani et al, 2003; NIST, 2005)。

(2) 火灾造成的结构初始破坏和其他动力灾害存在差异,抗连续倒塌设计应区别对待。火灾的蔓延造成结构初始损伤是动态的,NIST(2005)的调查报告表明,由于楼板的开洞和防火分区的破坏,火灾在竖向穿越了楼层、在水平向穿越了防火分区,实际火灾规模远远大于设计规模。此外,受火区域的结构对其他区域可能产生较大的不利作用,受火

楼板下挠产生的水平拉力加速了 WTC 外围桁架柱的失稳破坏(Usmani et al, 2003)。

世贸大厦这种大型复杂结构的连续倒塌立即引起了工程界的广泛关注,此后关于建筑结构连续倒塌问题的研究受到工程界的普遍重视。

1.3 抗连续倒塌设计方法

根据 1.2 节的事故分析可知,连续倒塌的一般性发展过程为:

- ① 出现初始破坏;
- ② 剩余结构构件无法承担初始破坏导致的重分布内力或者冲击荷载(堆载);
- ③ 引起剩余构件的连锁破坏。

当上述任一阶段的发展被有效地限制,就能够实现建筑结构的防连续倒塌目标。因而可根据连续倒塌各发展阶段的特点分别制定相应的工程对策,如图 1.4 所示。

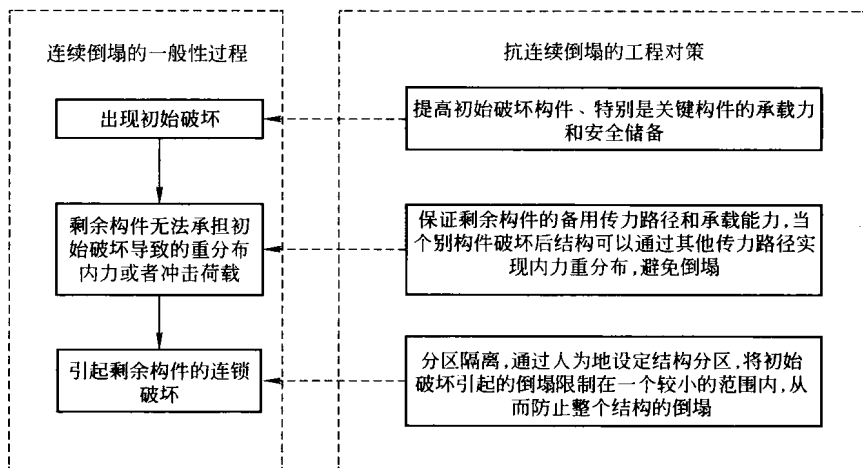


图 1.4 抗连续倒塌工程对策

目前结构的抗连续倒塌设计方法主要针对结构系统的抗连续倒塌承载力,即上述连续倒塌过程的第 2 阶段进行。第 1 和第 3 阶段分别针对局部结构的承载力和结构系统布置/构造,现有抗连续倒塌设计方法也有涉及(如防连续倒塌的关键构件设计或结构体系概念设计等)。

根据防连续倒塌所针对的意外灾害荷载类型,现有建筑结构的抗连续倒塌设计方法可分为两类:

(1) 不针对灾害荷载作用的抗连续倒塌设计

引起连续倒塌的灾害荷载有很强的不确定性:①在荷载类型方面,燃气爆炸、恐怖袭击、车辆与飞行物撞击、火灾和人为失误等都有可能造成结构的初始局部破坏,不同类型的灾害荷载引起的结构作用具有不同的特点,比如燃气爆炸、炸弹爆炸和车辆撞击虽然都对结构造成动力作用,但是荷载作用时间、峰值等都不相同(NIST, 2008);②在荷载作用位置方面,由于意外事件的随机性,整体结构的任何部位都可能遭受灾害荷载作用,其作用位置和范围也难以准确估计,一些灾害荷载的作用位置和范围甚至是

动态的,在作用过程中会发生迁移,如火灾的蔓延;③在荷载作用幅值方面,同样由于各种意外事件的随机性,确定灾害荷载幅值也是一项困难的工作,特别是多种灾害荷载可能共同对结构产生作用,如 911 事件中飞机撞击和火灾共同对整体结构产生破坏作用(NIST, 2005)。

不针对灾害荷载作用的结构抗连续倒塌设计中,不考虑灾害荷载对局部结构的作用,假设灾害荷载作用下局部结构已经发生破坏,直接对剩余结构跨越初始局部破坏区域的能力进行设计。现有抗连续倒塌的设计规范多采用该方法,在具体操作中,对于结构所有的典型部位,通过移除一根竖向支承构件来考察结构的抗连续倒塌能力,这样处理的原因是:建筑结构的初始局部破坏是不可预测的,每次移除一个竖向支承构件并不是为了模拟实际的初始破坏,而是因为这种方式可以正确评估一个结构发生连续倒塌风险的高低,并且通过这种方式能够有效增强结构的冗余度,降低结构发生连续倒塌的风险(GSA, 2003)。这种方法虽然回避了灾害荷载作用的不确定性,但是其分析的整体结构系统抗连续倒塌性能正是各种灾害作用下建筑结构连续倒塌中的共性问题,能够反映结构系统的抗连续倒塌能力。同时,不针对灾害荷载作用的抗连续倒塌设计的分析更加简便,这使得这类设计方法更易标准化和工程应用,现有规范(如 BS8110、Eurocode 2、GSA2003、DoD2010)中的主要方法(拆除构件法和拉结强度法)都属于不针对灾害荷载作用的抗连续倒塌设计。

(2) 针对灾害荷载作用的抗连续倒塌设计

尽管引起结构连续倒塌的灾害荷载具有很强的不确定性,但仍有一定的规律可循:①在灾害荷载类型方面,建筑结构易遭受的灾害荷载类型和其用途、建造地点等因素有关,比如燃气爆炸多发生在配有管道燃气的住宅,车辆撞击多发生在临街建筑,而大型火灾多发生在火荷载相对集中的仓库、商厦和住宅;②在荷载作用位置方面,灾害荷载作用位置与灾害源的位置有关,比如燃气爆炸多发生在结构的外边缘处(通风要求),车辆撞击发生在结构底层的外边缘处,大型火灾多发生在火荷载集中的楼层和结构部位;③在荷载幅值方面,灾害荷载作用可根据灾害源的性质进行估算,比如车辆撞击力可根据车辆速度和质量进行估算,燃气爆炸可根据房间表面积和通风面积等估算,火灾的温度可根据烟气的性质、热和质量的交换估算(CEN, 2006)。

针对灾害荷载作用的结构抗连续倒塌设计,首先通过风险分析确定灾害荷载的种类和严重程度,然后分析灾害荷载对结构的作用,进而进行灾害荷载作用下整体结构的连续倒塌分析。这类设计能够解决第一类抗连续倒塌设计中难以处理的两个问题:①灾害荷载对结构的初始局部破坏产生有限损伤的情况,比如火灾作用下的局部结构仅发生损伤而并非完全失效的情况;②利用剩余结构的抗连续倒塌能力实现设计目标的难度较大或代价较大的情况,比如现有规范(如 BS8110、Eurocode 2、GSA2003、DoD2010)中的关键构件法就是针对这种情况。

针对灾害荷载作用的结构抗连续倒塌问题,其设计的复杂程度和分析难度显著提升,目前还没有设计规范对此有具体的规定。一些规范推荐了部分灾害荷载的计算方法,但在结构抗连续倒塌设计时又采用了第一类不针对灾害荷载作用的抗连续倒塌设计,比如 Eurocode 1(CEN, 2006)和 UFC3-340-02(DoD, 2008)。针对灾害荷载作用的抗连续倒塌设计,要求设计人员具有各种灾害荷载的知识和相应的整体结构弹塑性和倒塌分析的能力。

力,因此目前此类抗连续倒塌设计主要应用于特殊用途建筑结构的设计,如美国 UFC 系列的抗连续倒塌设计规范主要面向国防工程设施。

本节将对现有的抗连续倒塌规范设计方法进行总结和分析,为工程设计和科学研究提供参考。

1.3.1 英国规范

英国规范的体系分为三个层次: Building Regulations、Approved Document 和 British Standard。Building Regulations 是法令性文件,具有较为广泛的约束性和应用范围,且只规定建筑的设计目标而不涉及具体的设计方法。Approved Document 是根据 Building Regulations 而制定的应用指南和解释说明,目前包括 14 个文件,其中 Approved Document A 是结构部分。Approved Document 不针对具体结构形式,也不进行具体的设计,它在解决问题时要求设计人员按照其指定的 British Standard 进行设计,以达到相应的设计目标。British Standard 是各种具体的设计规范,其内容详细,对设计分析方法、设计参数、构造要求等均作出了详细的规定。这三类文件构成了整个英国规范的设计体系,在英国规范的抗连续倒塌设计规定中,也是遵循这样的规则来进行设计。

1.3.1.1 Building Regulations

由于 1968 年 Ronan Point 公寓倒塌事件,英国成为最早对建筑结构进行连续倒塌问题研究和抗连续倒塌设计的国家。1976 年的建筑法案(HMSO, 1976)在 Ronan Point 事故后即规定:意外荷载所导致的初始破坏不应导致建筑结构不成比例的倒塌。

1.3.1.2 Approved Document A

英国 Approved Document A(ODPM, 2004)提供了三个抗连续倒塌设计方法:①拉结强度设计(Tying):通过结构现有的构件或连接将结构进行“捆绑”,以提高结构的整体性和冗余度;②构件的跨越能力设计(Bridging):结构的水平构件应在其支撑构件破坏后仍然能够横跨两个开间而不完全失去承载力,发生坍塌的区域不应超过楼层面积 15%或者 75m^2 ;③关键构件设计(Key Element):对于破坏后可能引发大范围坍塌的构件,应设计成为关键构件,即该构件在各个方向应能承受额外的 34kN/m^2 的均布荷载,该值是 Ronan Point 公寓中承重墙承受的爆炸荷载。

1.3.1.3 混凝土结构设计规范 British Standard 8110

英国混凝土结构设计规范 BS8110(BSI, 2002)将结构的抗连续倒塌能力称之为结构的鲁棒性(Robustness),并通过五个方法增强结构的鲁棒性:①结构整体性检查,避免结构布置上出现明显的薄弱部位;②结构具有承担一定水平力的能力,每个楼层应能承受相当于该楼层自重 1.5%的水平荷载;③拉结强度法;④关键构件法和拆除构件法;⑤当竖向构件容易遭受车辆碰撞时,可以设置防护设施。③和④中的设计方法源自于 Approved Document A,但是 BS8110 对构造和设计有更为详细的规定。BS8110 按照图 1.5 所示流程组织上述方法的实施以保证结构的抗连续倒塌性能。

英国规范的贡献在于率先关注连续倒塌问题,提出了几个可行的设计计算方法和设计流程,其中对拉结强度法的理论模型和设计细节研究得比较完善,该方法目前也被其他几个主要的抗连续倒塌规范所采用。

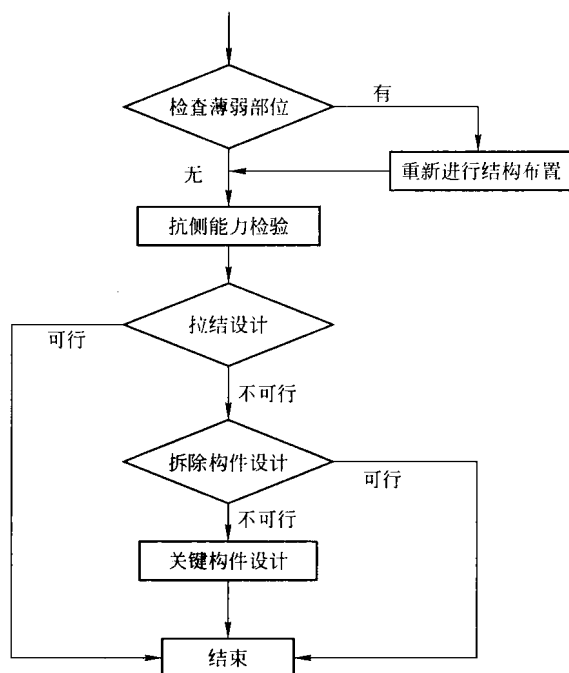


图 1.5 BS8110 设计流程(BSI, 2002)

1.3.2 欧洲规范

1.3.2.1 荷载规范 Eurocode 1

荷载规范 Eurocode 1(CEN, 2006)规定, 结构必须具有足够的承载力以抵御可预测或不可预测的意外荷载。该规范关于连续倒塌的设计分为两个部分: 一部分针对具体的意外事件, 侧重结构的防护, 目的是减小意外荷载对结构的损伤; 另一部分则独立于意外事件, 侧重结构的抗连续倒塌能力, 目的在于控制局部破坏对结构体系的影响。对一个具体结构而言, 判别其是否针对意外事件进行设计需要依据意外荷载发生的可能性、造成的后果、对公众的影响、可接受的程度和保护措施来综合考虑。

在针对具体意外事件进行防连续倒塌设计时, Eurocode 1(CEN, 2006)建议采用三条途径: ①降低意外事件的发生概率, 如保证道路与结构之间的足够距离、改善结构内部的通风性能等; ②减轻意外事件对结构的破坏作用, 如设置防护栏等; ③提高结构的承载力, 增强结构抵御意外事件的能力。规范对冲击和爆炸造成的荷载效应进行了详尽的规定, 包括汽车、火车和船舶的撞击、粉尘和燃气的爆炸等。

然而即使按照规定的荷载进行设计也无法完全避免局部破坏的发生, 因为在结构的生命周期内, 规范所规定的意外荷载值总有可能被超越。因此 Eurocode 1(CEN, 2006)要求, 当结构局部破坏发生时, 结构破坏应控制在一定范围之内。在具体设计方法上, Eurocode 1采用了与英国规范类似的拉结强度法、拆除构件法和关键构件法三种方法, 只是 Eurocode 1 的拉结强度法的设计值与英国规范有所不同。除此外, Eurocode 1 强调从概念设计的角度增强结构的整体性和延性, 从而增强结构的抗连续倒塌能力。

上述方法如果同时运用将会给结构设计带来沉重的负担, Eurocode 1 最大的贡献在于

对建筑划分安全等级，根据不同等级应用不同要求的设计方法，这个方法被其他国家的规范所采用或借鉴，比如英国规范((ODPM, 2004)的等级划分几乎完全采用了 Eurocode 1 的准则。Eurocode 1(CEN, 2006)在安全等级划分上采用了两种分类方法：一个是根据建筑的功能和大小来划分安全等级，该方法简单实用(如表 1.1 所示)，英国规范采用的也是这个方法；还有一个是倒塌风险分析，根据一个包含定性分析和定量分析的流程来实现，如图 1.6 所示。分析过程中运用了可靠度方法得到风险水平的综合评价，这是欧洲规范的特色。此外，欧洲规范容许同一建筑的不同部分采用不同的安全等级，比如进行结构分缝的结构。

Eurocode 1 安全等级划分 表 1.1

等级	建筑类别和使用类型
1	不超过 4 层的单体别墅；农业建筑；人群罕至并且与其他相邻建筑或活动场所相距 1.5 倍建筑高度以外的建筑
2 低风险分组	5 层的单体别墅；不超过 4 层的宾馆、公寓等住宅建筑和办公楼；不超过 3 层的工业建筑；不超过 3 层并且每层面积小于 1000m ² 的零售业房屋；单层教学楼
2 高风险分组	5~15 层的宾馆、公寓等住宅建筑、办公楼和零售业房屋；不超过 3 层的医院建筑；2~15 层的教学楼；每层面积小于 1000m ² 的大型公共建筑；不超过 6 层的非机动车停车场；不超过 15 层的机动车停车场；小于 2000m ² 的休闲娱乐中心
3	超过 2 类高风险分组中所定义的面积和层数的建筑；可容纳大量人群的大型公共建筑；超过 5000 人的运动场；大于 2000m ² 的休闲娱乐中心

注：1. 当从属于多个等级时取最高的等级；
2. 地下室满足 2 类高风险分组中的定义则地下室可不计入总楼层数。

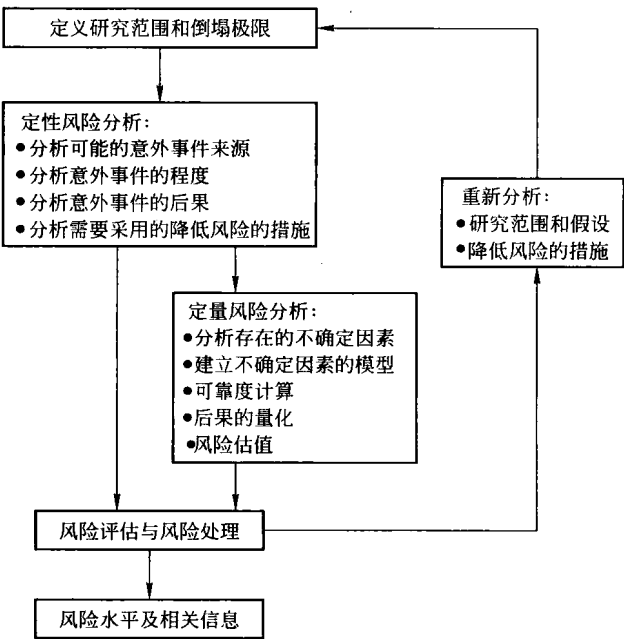


图 1.6 Eurocode 1 倒塌风险评估流程(CEN, 2006)

1.3.2.2 混凝土结构设计规范 Eurocode 2

混凝土结构设计规范 Eurocode 2(CEN, 2004a)针对混凝土结构给出了具体的构造要求,比如拉结钢筋连续性和锚固的要求,此外 Eurocode 2 扩展了 Eurocode 1 的拉结形式,增加了对外围墙/柱和角柱的拉结要求。在具体拉结强度的数值上, Eurocode 2 也有所不同。

1.3.3 美国规范

1.3.3.1 美国混凝土学会 ACI 318-08

ACI318-08(ACI, 2008)没有提供直接抵御连续倒塌的设计方法,但包含了为实现结构延性和整体性所需采取的构造措施。该规范要求,构件配筋和构件连接构造应有效保证结构构件之间的拉结连接,增强结构的整体性,具体包括:钢筋在支座处应连续贯通;钢筋搭接的位置和要求;钢筋端部弯钩的要求等。对预制装配结构应采用沿建筑周边的纵向、横向和竖向拉结,并对拉结强度作了详细规定。

此外,ACI318-08 中的抗震设计有利于提高结构的抗连续倒塌能力(Corley, 2002)。结构构件的抗震构造要求改善了构件的延性,使得结构在大震下实现延性破坏,而这些能力正是结构抗连续倒塌所需要的。ACI318-08 中对抗震框架的构造措施也能改善结构的抗爆和抗倒塌能力。这些措施使得梁和柱具有更高的承载力和更好的延性,在爆炸荷载下生存能力更强。当然,结构在爆炸等意外荷载下的倒塌机制与在地震作用下的倒塌机制是不同的,两者的区别还有待进一步的研究。

1.3.3.2 美国土木工程学会 ASCE 7-05

ASCE 7-05(ASCE, 2005)认为:除了特别设计的保护体系,将一般建筑物设计成为能够抵御由直接作用在大部分构件上的意外荷载所引发的倒塌,是不切实际的。但是,可以通过合理的设计来限制结构的局部倒塌,防止或降低连续倒塌的风险。ASCE 7-05(ASCE, 2005)要求结构构件必须具备足够的连续性、冗余承载力和耗能能力(延性),将初始局部破坏区域的荷载有效传递到能够承担这些冗余荷载的周边结构上,从而提高整体结构系统的稳定性。具体实施方法包括直接设计法和间接设计法。

直接设计法包括:①拆除构件法,结构在一根结构构件破坏后,具有跨越局部破坏位置继续承受荷载的能力;②局部抗力法,要求结构或部分结构具有足够的抵御一定意外荷载或袭击的能力。

间接设计法通过保证结构的最小承载力、提高结构的连续性和延性来增强结构的抗连续倒塌能力。包括:①合理的结构布置,避免结构的薄弱环节;②加强连接构造,保证结构的整体性和连续性;③提高结构冗余度,保证多荷载传递路径;④采用延性材料和延性构造措施,实现延性破坏;⑤考虑反向荷载作用;⑥楼板/梁的悬链线作用;⑦使墙体能承受面外横向荷载;⑧抗连续倒塌结构分区。

1.3.3.3 美国总务部 GSA2003

GSA2003(GSA, 2003)是世界上第一个抗连续倒塌设计专业规范。其主要贡献在于深化了拆除构件法概念,提出了拆除构件法的详细流程和分析方法。以往规范的拆除构件法,如英国规范、欧洲规范,仅提出通过拆除一根竖向构件来检验结构的跨越能力,没有解释具体原因,也没有具体实施方法。而 GSA2003(GSA, 2003)阐述了之所以每个工况仅拆除一根竖向承载构件是因为建筑结构的初始破坏是不可预测的,每次拆除一个竖向承

承载力构件并不是为了模拟结构的实际初始破坏,而是因为这种方式可以正确评估一个结构发生连续倒塌风险的高低,并且通过这种方式能够有效增强结构的冗余度,降低结构发生连续倒塌的风险。在拆除构件法的具体操作流程上,GSA2003(GSA, 2003)建议首先建立结构的有限元模型,然后瞬间拆除一根竖向承载构件并对剩余结构进行分析,分析方法按照是否考虑非线性和动力效应的影响分为四类:线性静力方法、线性动力方法、非线性静力方法和非线性动力方法。

GSA2003(GSA, 2003)规定线性分析作为一种简化的分析方法,只能应用于10层和10层以下的规则建筑。对于10层以上的建筑和不规则的建筑,则必须采用非线性方法,非线性分析需要考虑材料非线性和几何非线性。对于线性分析,GSA2003采用需求能力比(DCR)作为连续倒塌判别准则;而对于非线性分析,则是以倒塌的面积和比例作为连续倒塌判别准则。

动力灾害作用下,结构由初始破坏状态到新的平衡状态之间需要经历一个动力过程,因此GSA2003(GSA, 2003)规定在静力分析中,对竖向荷载乘以动力放大系数来考虑实际动力过程的影响。对于动力分析则不需要考虑。

另外,GSA2003还建议了一些概念性的设计措施来提高结构的抗连续倒塌能力,包括提高结构冗余度、延性、连续性、考虑反向荷载作用和抗剪强度等,并在附录中提供了构件和构造的设计流程,遵循这些流程将使结构更容易通过连续倒塌风险评估。

1.3.3.4 美国国防部 DoD2005/2009/2010

DoD2010(DoD, 2010)也是一部抗连续倒塌设计专业规范,其历史版本包括DoD2005(DoD, 2005)和DoD2009(DoD, 2009)。与GSA2003相比,DoD2010的内容更加丰富:在内容上,除钢结构和混凝土结构抗连续倒塌设计内容外,还包含砌体结构、木结构以及冷弯薄壁型钢结构的相关抗连续倒塌设计方法;在设计方法上,DoD2010除拆除构件法外还采用了拉结强度法。

DoD2010(DoD, 2010)对拉结强度的规定大部分遵循了英国规范中的要求,考虑到拉结强度法以悬链线作用机制为目标的设计,规范要求相应的拉结构件必须保证相应的变形能力。DoD2010对基本拉结强度的要求在英国规范的基础上进行了修正,取消了与楼层数相关的基本拉结强度取值方法,提高了对悬链线机制下基本拉结强度的取值。

DoD2010(DoD, 2010)对拆除构件法的规定基本上遵循GSA2003(GSA, 2003)的要求,比如对静力与动力、线性与非线性方法的分析规定。但是DoD2010对需检验部位做了更为严格的要求,除GSA规定的底层柱/墙以外,对上部各层的柱/墙,特别是结构转换层的柱/墙和层间截面发生变化的柱/墙规定了拆除构件要求。在非线性分析时,DoD2010采用了ASCE-41的构件性能指标,该指标比GSA2003和DoD2005的相关规定要更加细致。

1.3.4 现有规范设计方法的分析

根据上述总结,目前各国规范的结构抗连续倒塌设计方法可以划分成四类:概念设计、拉结强度设计、拆除构件设计和关键构件设计。但各国规范一般选择其中的一种或多种方法进行设计规定。对于同一设计方法,各国规范又进行了不同程度的修改。此外,由于对连续倒塌问题认识的侧重点不同,各国规范还包含了各自特有的抗连续倒塌设计要