

# 结构的连续倒塌：规范介绍和比较

梁益 陆新征 缪志伟 叶列平  
(清华大学土木工程系, 北京, 100084)

**摘要:** 目前, 结构的连续倒塌已成为严重威胁公共安全的重要问题, 因而日益受到关注。国外自 1968 年英国 Ronan Point 公寓倒塌事件发生以来, 已经对连续倒塌问题进行了三十余年的研究, 并编制了相关设计规范。而我国规范目前尚未规定详细抗连续倒塌设计方法。因此, 本文对国外主要的抗连续倒塌设计规范(如美国 ACI 318, GSA 2003, DoD 2005、欧洲 EuroCode 1、英国 BS8100 等)中相应的抗连续倒塌设计条文进行了总结和比较, 并在此基础上提出了一些结构抗连续倒塌的设计概念和几种主要的设计方法, 以及我国在这方面需要解决的问题, 可供我国编制相关规范参考。

**关键词:** 连续倒塌 规范 设计方法

## Progressive Collapse of Structures: Introduction and Comparison of Standards

Liang Yi Lu Xin-zheng Miao Zhi-wei Ye Lie-ping  
(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract:** Currently, the progressive collapse of the structures has become a serious threat to the public safety. Since the collapse of the Ronan Point Tower in United Kingdom in 1968, north America and Europe have conducted more than 30 years of research to this issue and developed relevant design codes and design guides. However, codes in China have not yet provided details on the resistance of progressive collapse. In this paper, the corresponding design specifications for the progressive collapse prevention in the main foreign design codes (e.g., ACI 318-02, GSA 2003, DoD 2005, EuroCode1, BS8100) are summarized and compared. Then, the major design methods to prevent progressive collapse are proposed and suggestions are given for the Chinese codes.

**Key words:** progressive collapse codes design method

## 1 前言

结构的连续倒塌是由于意外荷载造成结构的局部破坏, 并引发连锁反应导致破坏向结构的其它部分扩散, 最终使结构主体丧失承载力, 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<sup>[1]</sup>。造成连续倒塌的原因有很多, 包括设计和建造过程中的人为失误, 以及在设计考虑范围之外的意外事件引起的荷载作用, 如煤气爆炸、炸弹袭击、车辆撞击、火灾等。连续倒塌一旦发生, 一般造成很严重的生命财产损失, 并产生恶劣的社会影响, 因而日益受到公众的关注和研究者的重视。

自从 1968 年英国 Ronan Point 公寓倒塌事件发生以来, 国外对连续倒塌问题已经进行了三十余年的研究, 其间经历了 1995 年美国 Alfred P Murrah 联邦政府办公楼倒塌、2001 年世贸双塔倒塌等多起重大事故。在我国, 结构发生倒塌的事故也常有发生。如 1990 年发生在辽宁盘锦的由于燃气爆炸导致主体结构倒塌的事故, 以及最近山西大同发生的一起同样是由于燃气爆炸导致的某居民楼部分坍塌事件。随着这些事故频繁的发生, 结构的连续倒塌已经成为严重威胁公共安全的重要问题。我国现行混凝土结构设计规范 GB50010 第 3.1.6 条

基金项目: 国家十五科技支撑计划(编号: 2006BAK01A02-09)和清华大学基础研究基金(编号: JC2007003)资助

作者简介: 梁益(1985.3—), 男, 清华大学土木系本科, 主要从事结构连续倒塌研究。

规定<sup>[2]</sup>: 结构应具有整体稳定性, 结构的局部破坏不应导致大范围倒塌。但规范只对该条款作了简单的说明, 没有提出设计的具体方法和准则, 缺乏可操作性。目前, 一些主要的国外规范中均有关于如何改善结构抗连续倒塌能力的规定, 如英国的 British Standard、欧洲的 Eurocode 1、加拿大的 NBCC 等。美国公共事务管理局编制的《联邦政府办公楼以及大型现代建筑连续倒塌分析和设计指南》(GSA 2003) 和美国国防部编制的《建筑抗连续倒塌设计》(DoD 2005) 则较为详细的阐述了结构抗连续倒塌的设计方法及流程。本文在对一些相关国外规范进行简单比较的基础上, 介绍了一些结构抗连续倒塌的设计概念以及几种主要的设计方法, 并建议了我国应该尽快开展的工作。

## 2 有关连续倒塌的国外规范

### 2.1 英国规范规程

英国是最早对建筑结构进行抗连续倒塌设计的国家之一。由于 Ronan Point 公寓倒塌事件的发生, 英国的设计规范开始对五层和五层以上的建筑进行针对意外事件的考虑。1976 建筑规程 (Building Regulations) 规定<sup>[3]</sup>: 结构在意外荷载下不应发生与初始破坏不相称的大范围坍塌。提出了三种设计方法: 1) 拉结强度设计: 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: 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, 发生坍塌的相应区域不应超过楼层面积 15% 或者  $75\text{m}^2$ ; 3) 关键构件设计: 对于拆除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  $34\text{kN/m}^2$  的均布荷载。在混凝土规范 BS8100 中<sup>[4]</sup>, 为了提高结构在意外荷载下的鲁棒性, 除采用了上述三种设计方法外, 还应保证结构不存在明显的薄弱处, 且每个楼层应能承受相当于该楼层自重 1.5% 的水平荷载。

英国将抗连续倒塌设计方法纳入结构设计流程已经有三十余年的历史, 在这期间内陆续发生了一些大规模的爆炸事件, 它们对结构的破坏都仅限于局部范围内, 这说明这些方法是比较有效的。目前, 英国正考虑将结构抗连续倒塌设计的应用扩至更大的范围, 但考虑经济性将参考欧洲规范中的规定对建筑按照安全等级进行分类设计。

### 2.2 欧洲 Eurocode 1<sup>[5]</sup>

Eurocode 1 规定, 结构必须具有足够的强度以抵御可预测或不可预测的意外荷载。规范中的抗连续倒塌设计分为两个方面, 一个方面基于具体的意外事件, 另一方面则独立于意外事件, 设计目的在于控制意外事件造成的局部破坏。

在针对具体意外事件进行设计时, 规范建议采用三条途径: 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) 增加结构的强度, 提高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, 包括汽车的撞击、火车的撞击、轮船的撞击以及粉尘爆炸、燃气爆炸等。当然, 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, 该荷载值总是有可能被超越的。局部破坏一旦发生, 结构需具备良好的整体性、延性和冗余度来控制破坏蔓延。与英国规范类似, 欧洲规范采用了拉结强度法、拆除构件法和关键构件法三种方法, 这些方法的应用是对应于建筑安全等级分类的, 如表 1 所示。

表 1 Eurocode 1 中的建筑安全等级分类以及相应的设计方法

建筑安全等级	1	2 (高风险)	2 (低风险)	3
--------	---	---------	---------	---

应采用的 设计方法	无需特别设计	水平拉结	1. 水平竖向拉结 2. 拆除构件法 3. 关键构件法	需进行倒塌 风险评估
--------------	--------	------	-----------------------------------	---------------

## 2.3 美国的相关规范规程

### 2.3.1 美国混凝土协会 ACI 318-02<sup>[6]</sup>

该混凝土规范没有提供直接的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措施。规范中要求,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,改善结构的整体性,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。

一些研究者提出,ACI318-02 中的抗震设计有利于提高结构的抗连续倒塌能力<sup>[7]</sup>。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在抵御连续倒塌时所需要的。为了分析结构的抗震设计和结构在爆炸荷载下的抗连续倒塌能力之间的关系,美国联邦紧急事务管理局(FEMA)发起了一项对 1995 年在汽车炸弹袭击下发生严重坍塌的 Alfred P Murrah 办公楼的专门研究<sup>[8]</sup>。结果表明,如果按照目前的抗震设计对原有建筑进行加固,结构的抗倒塌能力将得到加强,在同样的爆炸袭击下倒塌面积显著减小。同时,目前 ACI318-02 中对于抗震框架(special moment frame)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强度和更好的延性,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和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。

### 2.3.2 美国公共事务管理局 GSA 2003<sup>[9]</sup>

该指南首先提供了一个判断建筑是否可以免于进行抗连续倒塌分析的流程(Exemption Process),考虑了建筑的用途、使用年限、结构材料、结构构造等多方面的因素。如果通过该流程判定建筑的倒塌风险为低,则可免于进一步的分析,否则将采用拆除构件法对结构的抗连续倒塌能力进行评估。可选择分析方法包括线弹性分析和非线性分析,其中线弹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。按照是否考虑动力效应又可分为静力分析和动力分析,对于静力分析竖向荷载采用考虑动力放大系数的  $Load=2(DL+0.25LL)$ ,其中,DL 为结构的恒载标准值,LL 为结构的活载标准值。对于动力分析,荷载组合采用  $Load=DL+0.25LL$ 。指南采用屈强比(DCR)作为线弹性分析的破坏准则,而对于非线性分析方法,则是以塑性铰转动和位移的延性比作为破坏准则。

另外,指南还建议了一些可供采纳的概念性的设计措施来提高新建建筑抵御连续倒塌的能力,包括提高结构冗余度、延性、连续性和考虑反向荷载作用等,并在附录中提供了进行结构构件尺寸和细部构造初始设计的流程供设计者参考,遵循这些流程将使结构更容易通过接下来的连续倒塌风险评估。

### 2.3.3 美国国防部 DoD 2005<sup>[10]</sup>

该规范的主要目标为减少国防设施由于不可预测的事件造成的潜在连续倒塌风险。规范将建筑分为极低、低、中、高四个安全等级,对应不同的安全等级采用从简单到复杂的设计方法,即:1)对于极低保护等级的建筑,只要保证结构的水平拉结强度即可;2)对于中等保护等级的建筑,应保证结构水平和竖向的拉结强度,如果存在构件竖向拉结强度不足,则可采用拆除构件法分析;3)对于中、高保护等级的建筑,则拉结强度法和拆除构件法的要求均需得到满足。

规范对拉结强度的规定基本上遵循英国相关规范中的要求,对拆除构件法则进行了比较详细的规定,并提供了线性静力、非线性静力和非线性动力三种分析方法的具体步骤。对于静力分析,荷载组合采用  $2[(0.9 \text{ or } 1.2)D + (0.5L \text{ or } 0.2S)] + 0.2W$ ,其中  $D$  为恒载, $L$  为活载, $S$  为地震荷载, $W$  为风荷载, $2$  为动力放大系数,0.9 为重力荷载有利时采用,0.5 $L$  表示最大标准活荷载的平均值;对于动力分析,则采用  $(0.9 \text{ or } 1.2)D + (0.5L \text{ or } 0.2S) + 0.2W$ 。规范还规定了承重构件的拆除、荷载的计算、破坏限制、容许准则等内容。

### 3 主要的设计方法介绍

结构的抗连续倒塌设计方法可以分为两类<sup>[11]</sup>:1)针对意外事件进行设计,保证结构构件在意外荷载作用下一定的承载力;2)针对局部破坏进行设计,使结构具有多荷载传递路径,允许一定程度的破坏而不发生坍塌。

可能引发连续倒塌的意外事件很多,对于某些可以预见的事件(如爆炸和撞击),可以根据经验或者理论研究来假定它们造成的荷载作用,由此来进行构件的设计和结构形式的布置。这在 Eurocode 1 以及美国国防部编制的“新建结构抗爆设计”(Structural Design to Resist Explosive Effects for New Buildings)和“既有结构抗爆设计”(Structural Design to Resist Explosive Effects for Existing Buildings)中均有详细规定<sup>[10]</sup>。本文主要讨论的是针对局部破坏所采用的设计方法,主要分为两大类:1)间接设计:基本上指一些概念性的设计措施,同时还包括拉结强度法;2)直接设计:主要为拆除构件法和关键构件法。

#### 3.1 概念设计措施

各国规范和设计指南均强调了进行抗连续倒塌概念设计的重要性。研究表明,对于充分考虑风荷载和地震荷载进行设计的结构,结构本身已具备较好的整体性和延性,能一定程度上抵御连续倒塌的发生<sup>[12]</sup>。因此,在此基础上采取一些针对意外事件的概念性的设计措施,不仅可以取得良好的效果,而且不会过多的增加建筑的造价。一般包括以下几个方面<sup>[10]</sup><sup>[13]</sup>:(1)合理的结构布置,避免结构的薄弱处;(2)加强连接构造,保证结构的整体性和连续性;(3)提高冗余度,保证多荷载传递路径;(4)采用延性材料,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)设计墙使其能承受横向荷载。

#### 3.2 拉结强度法

在结构中通过现有构件和连接进行拉结,可提供结构的整体牢固性以及荷载的多传递路径。有人将该方法归为一种量化的概念设计。我国规范 GB50010 在对第 3.1.6 条的说明中对拉结的概念和作用有一些简单的描述,但没有具体规定<sup>[2]</sup>。

按照拉结的位置和作用可分为内部拉结、周边拉结、对墙/柱的拉结以及竖向拉结四种类型<sup>[3]</sup><sup>[9]</sup>,如图 1 所示。对于各种拉结,要求传力路径连续、直接,并对拉结强度进行验算。一般来说,结构材料不同,拉结强度的要求也不一样。以内部拉结为例,英国规范中混凝土结构和钢结构的内部拉结强度计算公式中荷载组合系数有差异,此外混凝土结构的内部拉结强度与结构层数和拉结跨度有关,而在钢结构中则与拉结的跨度和间距有关<sup>[4]</sup>。

根据最近 Abruzzo John 等人的研究<sup>[14]</sup>,即使满足现行美国混凝土规范 ACI 318-02 中的整体性要求以及 DoD 2005 中的拉结强度规定,结构在抵御连续倒塌方面仍然具有明显的弱点。同时,如果涉及到复杂、不规则结构的设计,设计者将很难有效的理解并采用这一方法。尽管如此,该方法能一定程度上保证结构在连续性和整体性上的基本要求,而且比较简单,不显著改变结构构型而且不过多增加建造费用。

#### 3.3 拆除构件法

拆除构件法通过有选择性的拆除结构的一个或几个承重构件(柱、承重墙),并对剩余

结构进行分析, 确定初始破坏发生蔓延的程度, 以此评价结构抵御连续倒塌的能力。GSA 2003 中规定<sup>[8]</sup>, 对于典型结构, 建筑每层外围的长边中柱(墙)、短边中柱(墙)及角柱(墙)均须一一拆除进行分析, 并考虑建筑底层和地下停车场不易采取安全防护措施, 该层还需拆除一根内部柱(墙)。如图 2 所示。对于不规则结构, 设计者须根据工程经验判断拆除位置。采用该方法分析时应应对结构施加的荷载在本文第二部分的相关规范中已经提到, 不再赘述。

根据是否考虑非线性和动力效应, 拆除构件法可采用线性静力分析、非线性静力分析、线性动力分析、非线性动力分析。这四种分析方法依次从简单到复杂, 简单的方法实施方便, 计算快速, 但不精确, 同时出于安全的考虑, 往往采用更保守的荷载组合, 因而得到保守计算结果; 复杂的方法精确程度较高, 但繁琐耗时, 而且对计算结果很难进行检验。对此, 有学者提出一种渐进分析步骤 (progressive analysis procedure)<sup>[15]</sup>, 即依次采纳从简单的线弹性静力分析到复杂的非线性动力分析, 计算逐步精确, 而且每一阶段的计算结果均建立在上一阶段结果的基础上, 相对易于检验。

拆除构件法能较真实的模拟结构的倒塌过程, 较好的评价结构抗连续倒塌的能力, 而且设计过程不依赖于意外荷载, 适用于任何意外事件下的结构破坏分析。但另一方面, 拆除构件法设计繁琐, 往往需要花费较多的时间和人力物力资源, 这无论是对于业主还是设计者而言都是很难接受的。因此, 对于重要性较低的建筑, 应尽量采用简单易行的方法, 而对于重要性较高的建筑则应采用复杂的方法进行精确分析。

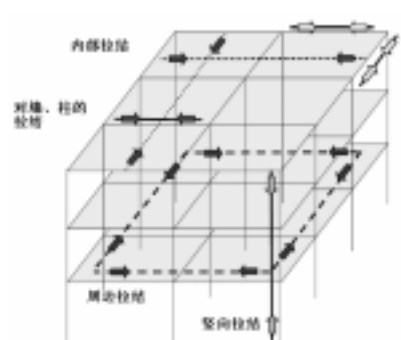


图 1 拉结示意图

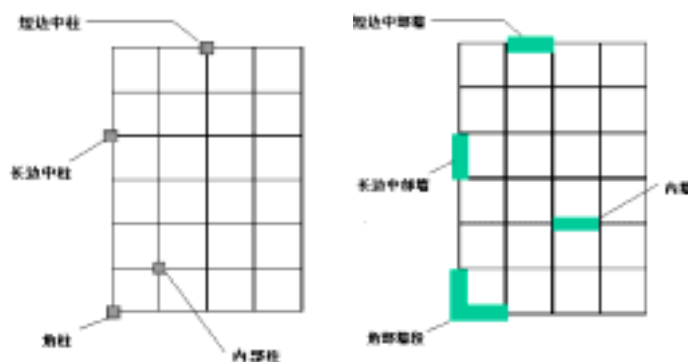


图 2 柱(墙)的拆除位置示意图

### 3.4 关键构件法

对于无法满足拆除构件法要求 (即拆除后可能引发结构大范围坍塌) 的结构构件, 应设计成为关键构件, 使其具有足够的强度能一定程度上抵御意外荷载作用。在英国及欧洲规范中, 关键构件在原有荷载组合的基础上各个方向应能承受额外的  $34\text{kN/m}^2$  的均布荷载, 该值是通过参考 Ronan Point 公寓承重墙的失效荷载得到的, 而并不是针对爆炸计算得到的压力值<sup>[3]</sup>。当然, 该荷载值总是有可能被超越的。但通过该方法加固对结构整体稳定性有重要影响的构件, 能一定程度上减轻局部破坏发生的程度从而降低连续倒塌发生的可能。设计中应将这种方法和拆除构件法结合起来, 既能有效改善结构抵御连续倒塌的能力, 同时也能减少建造费用, 取得良好的经济效益。

## 4 结论

在我国目前的建筑设计中, 特别是对于高层、大跨等重要建筑的设计, 地震和风荷载往往对设计结果起控制作用, 对于如何提高结构在意外荷载作用下的稳定性和承载力还不够重视, 这也是我国相关设计规范中缺乏这方面的设计流程造成的。应在借鉴国外经验的基础上, 尽快展开对结构连续倒塌的研究, 并在相关规范中增加结构抵御连续倒塌设计方法的内容。

目前亟待进行的工作有：

(1) 建立与建筑物重要性相对应的安全等级分类

意外事件的发生是一个小概率事件,因而对所有的建筑都进行抗连续倒塌设计是不合理的,也是不经济的。应根据重要性对建筑进行安全等级分类,并依此采用与其相适应的设计方法进行结构抗连续倒塌设计。

(2) 寻找适合我国的设计方法

可借鉴国外规范中已有的设计方法,但应综合考虑我国国情,采用的设计方法不应过多增加建筑造价和设计者的负担。

(3) 开展对拆除构件法的研究

对于重要建筑,应采取拆除构件法评估结构抵御连续倒塌的能力。因此,对于如何将拆除构件法应用于我国的结构设计应展开研究,包括拆除构件的选择、荷载组合以及破坏准则的确定等。鉴于难以进行实体模型试验,这些问题可借助于计算机进行仿真分析来解决。

### 参考文献

- [1] Ellingwood Bruce R. Mitigating Risk from Abnormal Loads and Progressive Collapse. Journal of Performance of Constructed Facilities [J], 2006, 20 ( 4 ): 315-323.
- [2] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范 [S]. 中国建筑工业出版社, 2002.
- [3] Moore D B. The UK and European regulations for accidental actions [C]. Workshop on Prevention of Progressive Collapse, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C.
- [4] Structural use of concrete: Part 1: Code of practice for design and construction[S]. British Standard Institute, 1997.
- [5] Draft prEN 1991-1-7 Eurocode 1-Actions on structures. Part 1.7: General Actions - Accidental actions [S]. European Committee for Standardization, 2005.
- [6] Building code requirements for structural concrete (ACI 318M-02) and commentary (ACI 318RM-02) [S]. American Concrete Institute, 2002.
- [7] Osama A, Mohamed. Progressive Collapse of Structures: Annotated Bibliography and Comparison of Codes and Standards [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20 ( 4 ): 418-425.
- [8] Hayes Jr, John R. Can strengthening for earthquake improve blast and progressive collapse resistance [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131 ( 8 ): 1157-1177.
- [9] Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization project s[S]. U.S. General Service Administration, 2003.
- [10] Unified Facilities Criteria : Design of Structures to Resist Progressive Collapse [S]. U.S. Department of Defence, 2005.
- [11] Ellingwood Bruce R. Building Design for Abnormal Loads and Progressive Collapse [S]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2005, 20 ( 3 ): 194-205.
- [12] 刘小娜,马东辉等. 建筑结构抵御连续倒塌能力分析 [C], 周锡元等. 城市与工程安全减灾研究与进展. 北京: 中国科学技术出版社, 2006: 350-354.
- [13] Liu Y. Failure analysis of building structures under abnormal loads [D]. Canada: University of Waterloo, 2004.
- [14] Abruzzo John, Matta Alain, Panariello Gary. Study of mitigation strategies for progressive collapse of a reinforced concrete commercial building [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 20(4): 384-390.
- [15] Marjanishvili S M. Progressive Analysis Procedure for Progressive Collapse [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2004, 18 ( 2 ): 79-85.