

混凝土框架结构的抗连续性倒塌设计方法¹

叶列平, 陆新征, 李易, 梁益, 马一飞

清华大学土木工程系, 北京 100084

摘要: 介绍了各国规范关于结构抗连续性倒塌的设计目标和有关设计规定。结合按我国规范设计的钢筋混凝土框架结构的实际情况和抗连续倒塌设计目标, 在大量分析研究的基础上, 提出了对我国框架结构抗连续性倒塌的概念设计方法、拉结强度设计方法和拆除构件设计法, 并给出了有关配筋构造措施。

关键词: 框架结构; 抗连续性倒塌; 拉结强度; 拆除构件; 配筋构造

Design Method on the Progressive-collapse-resistance of RC frames

Ye Lieping, Lu Xinzheng, Li Yi, Liang Yi, Ma Yifei

Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract: This paper firstly introduced the design objectives and corresponding specifications of the progressive-collapse-prevention in different codes of foreign countries. Based on a number of calculations, with the consideration of the actual structures designed according to Chinese codes, and the design objectives for Chinese structures, the design methods for the progressive-collapse-prevention of Chinese RC frame structures are proposed in this paper, which include conceptual method, tie force (TF) method and alternative path (AP) method, together with corresponding detail design requirements.

Keywords: frame structure, progressive-collapse-resistance, tie force method, alternative path, detail design

1、引言

结构是由若干结构构件连接形成、并能够长期安全可靠地承受其上各种荷载和作用的合理的整体承力骨架系统。各种荷载和作用, 不仅包括结构正常使用状态下结构自重等永久荷载, 人群和物品等可变荷载, 以及自然环境对结构的作用, 如风荷载、地震荷载、化学腐蚀等, 还应包括发生意外事件的偶然荷载与作用, 如爆炸、冲击、火灾和超设防烈度的特大地震。

根据荷载与作用随时间的变异性, 我国建筑结构设计标准将荷载与作用分为: 永久荷载与作用、可变荷载与作用、偶然荷载与作用。其中, 永久荷载与作用和可变荷载与作用的量值、作用位置和作用特性都是可以估计的, 且估计值具有一定保证率, 据此按现行结构设计方法, 通常可以保证所设计的结构具有足够的安全度, 也即产生破坏的失效概率足够小。然而, 偶然荷载与作用属于极小概率事件, 其量值、作用位置和作用特性都无法估计, 并且具

¹资助项目: 国家科技支撑计划课题 (2006BAJ03A02); 国家自然科学基金重大研究计划重点项目资助 (90815025); 国家科技支撑计划项目 2009BAJ28B01

叶列平 (1960-), 男, 浙江温州人, 清华大学土木工程系教授、博士生导师, 研究方向为: 混凝土结构, 结构抗震减震, 新型结构体系。

有量值很大、作用时间很短的特点，这就给结构设计带来很大的困难。鉴于偶然荷载与作用的不可估计性和其作用特征的复杂性，以及结构设计经济性的考虑，通常一般结构设计时对偶然荷载与作用都不进行计算设计。但一旦出现偶然荷载与作用，则往往因其量值过大而导致直接遭受偶然荷载与作用部位的结构构件破坏。因此，针对偶然荷载与作用，结构应能满足以下要求：容许结构局部发生严重破坏和失效，未破坏的剩余结构能有效承受因局部破坏后发生的荷载和内力重分布，不至于短时间内造成结构的破坏范围迅速扩散而导致大范围、甚至整个结构的坍塌。如果结构因局部破坏引发连锁反应，导致破坏向结构的其它部分扩散，最终使整个结构丧失承载力，造成结构的大范围坍塌，这种破坏现象称为连续性倒塌。

自从 1968 年英国 Ronan Point 公寓发生连续性倒塌事件以来，国外对结构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^[1]。

工程经验及研究表明，通过加强结构的整体性、连续性和增加结构冗余度，可以有效地改善结构抗连续倒塌能力，英美等国的混凝土结构设计规范中均有这方面的详细规定^{[2][3]}。美国已编制了针对防结构连续倒塌的设计规程和指南^{[4][5]}，提出了一些具体措施和设计方法。本文基于国外有关设计规范和标准中关于混凝土结构防连续性倒塌有关规定的分析研究，提出了我国混凝土结构防连续性倒塌的设计建议。

2、中国规范关于防连续倒塌的规定

我国《混凝土结构设计规范 GB50010—2002》^[6]3.1.6 条规定：“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”。该条文的说明进一步指出：“当结构发生局部破坏时，如不引发大范围倒塌，即认为结构具有整体稳定性”。结构的延性、荷载传力途径的多重性以及结构体系的超静定性，均能加强结构的整体稳定性。设置竖直方向和水平方向通长的钢筋系杆将整个结构连系成一个整体，是提供结构整体稳定性的方法之一。另一方面，按特定的局部破坏状态和荷载组合进行设计，也是保证结构整体稳定性的措施之一。当偶然事件产生特大的荷载时，要求按荷载效应的偶然组合进行设计（规范 3.2.3 条）以保持结构的完整无缺，往往经济上代价太高，有时甚至是不现实。此时，可采用“允许局部爆炸或撞击引起结构发生局部破坏，但整个结构不发生连续倒塌的原则进行设计。”

该规定仅给出了结构防连续性倒塌的设计目标和有关概念设计原则，尽管对设计人员有一定指导作用，但因未给出具体的定量设计方法，实际操作性差。

3、国外规范和规程关于结构整体性的规定和建议

3.1 美国

美国国家标准学会（ANSI）对结构的整体性的定义是^[7]：结构作为整体抵抗局部破坏而不发生大范围坍塌的能力。这实际上描述了结构作为整体抵抗连续倒塌能力的重要特征，也

即结构抗连续倒塌设计的着眼点不是某一具体构件，而是结构整体，因此需考虑结构构件之间的相互关系。

美国 ACI318-02 规范^[3]也没有提供抗连续倒塌设计方法，但给出了保证结构整体性和延性所应采取的措施。ACI 318-02 规范 7.13 节指出：“工程经验表明适当改进配筋构造可显著增强结构的整体牢固性”。因此 ACI318-02 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，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，ACI 318-02 规范 16.5 节指出：“应采用纵向、横向和竖向拉结，禁止使用仅依靠自重的摩擦连接”。

1968年英国 Ronan Point 公寓垮塌事件后，ASCE 标准 7 的前身 1972 版 ANSI 标准^{[7][8]}A58.1 中的 1.3.1 条首次引入了关于防止由于严重超载导致局部破坏引发的结构连续倒塌的规定。1982 版的 ANSI 标准 A58.1 第 1.3 节定性的描述了结构整体性，要求对结构进行合理设计，使其在局部范围内主要承重构件失效后仍能保证荷载的有效传递，并推荐“直接设计法”和“间接设计法”。直接设计法包括多荷载传递路径设计和局部加强设计；间接设计法主要是通过结构构件的最小承载力要求、连续性要求和延性的规定，来间接增强结构抗连续倒塌的能力。该标准还给出了诸如结构的合理布置、设置内承重墙、楼板的荷载传递方向、楼板和梁的悬链线作用、墙的横向承载能力等建议。2005 版 ASCE 标准 7 则包含了更多的关于防连续倒塌研究的最新进展和增强结构整体性的具体规定^[9]，主要是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)，能够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强度、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，避免结构的薄弱部位；(2)加强连接构造，保证结构的整体性和连续性；(3)提高结构的冗余度，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)利用楼板和梁的悬链线作用；(7)使墙能承受横向荷载；(8)抗连续倒塌结构分区。

2001 年，美国联邦安全委员会 (Interagency Security Committee) ^{[7][8]}提供了应用于结构设计的“工程实用指南”，主要关注结构抗爆能力和其它特殊结构的安全措施。该文件将结构防连续倒塌设计的目的描述为：“当发生局部破坏时，结构破坏或倒塌的范围不应与初始破坏的原因不成比例。”具体设计可通过在建筑每层周边拆除一个柱来进行，即无论因何种原因导致柱发生破坏时，应保证结构仍具有足够的荷载传递能力。该文件建议结构构件在反向受力时应具有相应的延性和承载力，这对于预应力混凝土、预制混凝土结构和砌体结构尤其重要。

在进行结构连续性倒塌分析时，有效活荷载可取规范设计活荷载的 25%，同时容许考虑因冲击产生的材料应变硬化对材料强度的提高。该文件还给出了通过结构构造措施改善结构连续性、延性和冗余度的指导性建议。

2003 年，美国公共事务管理局（General Service Administration）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》^[5]，提供了对既有或新建政府办公大楼进行连续倒塌风险评估的参考流程，并建议了有关设计措施以改善新建大楼抗连续倒塌的能力。首先，考虑建筑的用途、使用年限、结构材料、结构构造等多方面的因素，提供了一个判断建筑是否需要抗连续倒塌分析的流程。然后，建议了对结构抗倒塌性能有改善作用的构造措施。对于需要进行连续性倒塌风险评估的结构，建议采用拆除构件法进行分析，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。指南采用屈强比（DCR）作为线弹性分析的破坏准则，而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^[10]。为便于判定，指南给出了一般结构的最大延性比和转角限制。

美国国防设施标准《建筑抗连续性倒塌设计》^[4]，建议的结构抗连续倒塌的主要目标为：在不过多增加建造费用和改变结构形式的基础上，减少国防设施由于不可预测事件造成的潜在连续倒塌风险。3 层及 3 层以上的建筑均需要进行防连续性倒塌设计，但提供的设计方法只在于控制结构的整体坍塌，而不能保证结构不发生局部破坏。根据建筑的资产价值和使用情况，分为四个等级：非常低、低、中和高。前两个等级可归类为普通建筑，后两者则为特殊建筑。对于普通建筑只需采用提高抗连续倒塌能力的构造措施和拉结强度设计，而对于特殊建筑则需采用拆除构件法（Alternate load path method）进行分析，并酌情考虑动力效应和非线性。该文件认为，大多数建筑均属于普通建筑范畴，而对混凝土结构和钢结构进行拉结设计也十分简单，造价也不会过多增加。该文件对拉结强度法和拆除构件法的设计流程进行了详细规定，还包括一些具体的设计要求，如：构件节点连接应具有足够的承载能力，保证与该节点连接的较弱构件的承载力能够得到发挥；连接构造应与抗震要求一致，并要求能够承受反向荷载的作用；破坏范围应控制在拆除构件的相邻楼层，破坏范围应控制在 70m^2 或 15% 的楼面面积等。

3.2 加拿大

加拿大国家建筑规范^[8]对结构整体性的定义是：“结构具有容纳局部破坏的能力而不发生大范围坍塌”。要求结构应具有足够的整体性，以承受在其生命期内预期可能发生的各种作用，建议设计人员针对具有约 10^{-4} /年重现概率的严重意外事故给予必要的考虑，并采取相应的措施。加拿大规范也提供了一些设计方法，包括局部承载力、最小拉结强度、备用荷载路径等要求。

3.3 欧洲

欧洲 Eurocode-1 “结构上的作用”规定^[11]，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。造成这些意外荷载的原因包括设计和建造过程中的人为失误，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。结构由此导致的破坏范围不应与初始破坏不相称。

该规范将结构抗连续倒塌设计分为两个方面：一是采用消除和减轻灾害的设计方法，以此来降低结构发生局部破坏的可能；另一则是提高结构整体性、冗余度和延性的设计方法，使结构能将破坏控制在局部范围内而不发生整体倒塌。根据建筑重要性分为四个等级：对于较低等级的建筑物，无需特别进行抗连续倒塌设计，只需满足一般的整体性要求；对于次重要等级的建筑，应采用水平向的拉结强度法进行设计；对于重要等级的建筑，需要同时采用水平向和竖向的拉结强度法以及拆除构件设计法和关键构件设计法进行设计；对于极为重要的建筑，则应精确分析并给出倒塌风险水平，采用的方法应考虑动力效应、非线性以及结构和荷载之间的相互作用。

该规范对冲击和爆炸对结构的作用效应进行了详尽的规定，并建议了一些相应的设计措施，如防撞柱的设置、压力消散构件的布置等。以常见的燃气爆炸为例，爆炸造成的等效静压力 P_d 可通过压力消散构件可承受的最大静压力、压力消散构件的面积和房间的体积共同确定，关键构件在该等效静压力下不应失去承载力。另外该规范还给出了连续倒塌风险评估的具体方法和操作步骤。

3.4 英国

1968 年 Ronan Point 公寓倒塌事件发生后，英国建筑规范开始考虑针对意外荷载和连续倒塌的设计。1976 年的建筑规定指出，建筑结构在意外事件下发生倒塌的范围不应与初始破坏不相称，该要求只针对于 5 层及 5 层以上的建筑。1996 年，英国建筑荷载规范 BS6399 中关于连续性倒塌的设计方法包括 3 个层次^[12]：

(1) 拉结(Tying): 对结构构件和连接提供水平和竖向拉结，是保证结构连续性的最基本构造。这些拉结可使结构水平构件在失去竖向支承构件后发挥悬链线作用，提供结构的备用荷载传递路径。

(2) 跨越(Bridging): 在竖向承重构件失效后，结构应能跨越局部破坏范围，并保持良好的整体承载力和稳定性。这通常通过有选择性的拆除一些不能被拉结的构件，并对剩余结构进行分析。构件拆除后所导致的破坏范围不应超过相应楼层面积的 15% 或 70m^2 。

(3) 关键构件(Key element): 对于关键构件要求针对意外荷载进行设计，应能承受 34kN/m^2 的均布压力。

30 余年的工程经验表明，上述 3 方面的规定十分有效，建筑造价增加适中。

英国混凝土结构规范 BS 8100^[13]通过提高结构的鲁棒性 (Robustness) 来改善结构抵御连续倒塌的能力。规范对鲁棒性的定义是，应合理的设计和布置结构使其在意外荷载下不至于

脆弱,即单个构件或者局部范围的破坏不应导致主体结构的坍塌。BS 8100 的第 3.1.4 节指出,设计中需要着重检查结构整体性,结构布置不应有明显的弱点,并且具有足够的荷载传递路径。结构的每层均须能够承受相当于该楼层自重 1.5%的假定水平荷载。与 BS 6399 类似,BS 8100 给出了结构的拉结能力、跨越能力和关键构件设计,并作了具体规定。

4 结构防连续倒塌的设计思想

根据各国规范建筑结构防连续倒塌的规定和原则,结构抗连续性倒塌设计的设计思想可以分为三类:

第一类:对于可能直接遭受意外荷载作用的结构构件,应具有一定承载力。对于可能直接遭受意外荷载作用的结构构件,如易遭受车辆撞击和人为破坏的结构外围柱、危险源周边的结构构件、备用荷载传递路径上的构件等,应作为整体结构系统中的关键构件,使其具有足够的安全储备。这种方法称为局部加强法。但这种方法的问题在于,意外事件作用很难定量,也很难给出相应的发生概率。即使针对某几种可能发生的意外事件进行设计,也不能保证这些关键构件在其它的突发事件情况下不会破坏。此外,这些关键构件一旦被恐怖分子利用,将成为重点袭击的目标,反而会造成更严重的后果。因此,要求所设计的结构绝对不发生局部破坏不是一种可行的设计方法,最好能采取措施降低意外事件发生的概率。

第二类:使结构具有足够的备用荷载传递路径。主要关注意外事件发生后的整体结构的后果严重程度,即在结构已发生局部破坏情况下,结构系统具有足够的备用荷载传递路径,有效传递局部构件失效而造成的荷载和内力重分布,不发生大范围坍塌。这种方法不针对具体的意外事件,因而适用于任何情况。当结构中的某一构件失效时,不可避免会造成局部范围的坍塌,只要坍塌范围在可接受的程度内,就可以认为结构设计是满足要求的。但如何定义这个可接受的程度,是一个十分复杂的问题。

第三类:使结构分区隔离,将局部破坏限制在分区范围内。这种措施只适用于限制平面大而层数少的结构发生的水平向连续倒塌,比如多跨桥梁、厂房和机场候机楼等。而对于一般多层或者高层建筑,发生连续倒塌时,水平向连续倒塌和竖向连续倒塌并存且以竖向连续倒塌为主,一旦初始破坏发生,结构分区并不能有效控制连续倒塌的范围。故而分区隔离方法在建筑结构中很少采用。

备用荷载传递路径通常可通过以下措施实现:

(1) 规定构件连接和拉结力的最低要求,保证整体结构的连续性,一旦失去原有支撑时,仍可维持一定的承载能力;

(2) 规定可接受的局部破坏范围,并使结构体系能形成跨越局部破坏范围的受力骨架。

这种方法需解决的问题有,需要给出备用荷载传递路径上的荷载取值和荷载组合,还要规定备用荷载传递路径上结构的极限状态。

5 混凝土框架结构防连续性倒塌的设计方法

5.1 一般规定

根据对国外钢筋混凝土结构抗连续倒塌设计方法的研究分析,并结合按我国规范设计的结构的实际情况和上述抗连续倒塌设计目标,本文作者在大量分析研究的基础上,提出了适合我国混凝土框架结构抗连续倒塌设计方法^{[16]~[21]},主要包括:概念设计、拉结强度设计和拆除构件设计,各种方法主要根据表 1 建筑物的重要性选择,其中拉结强度设计和拆除构件设计借助现有的结构分析手段可以实现。对于特别复杂或者有特殊要求的结构,则在表 1 设计的基础上,还应采用非线性动力分析方法对结构抗连续倒塌进行验算。

表 1 结构抗连续倒塌设计方法的要求

建筑的重要性	设计要求		
	概念设计	拉结设计	拆除构件设计
普通结构	是		
重要结构	是	是	
非常重要结构	是	是	是

拉结强度设计和拆除构件设计时,荷载组合设计值可按式确定:

$$S = A(S_{Gk} + \sum \psi_{qi} S_{qik}) + \psi_{cw} S_{qwk} \quad (1)$$

式中, S_{Gk} 为永久荷载标准值; S_{qik} 为竖向可变荷载(包括楼面、屋面活荷载和雪荷载)标准值; ψ_{qi} 为可变荷载的准永久值系数; ψ_{cw} 为风荷载组合值系数,取 0.2; S_{qwk} 为风荷载标准值; A 为动力放大系数。

从结构初始局部破坏发生,到剩余结构达到一个新平衡状态是一个动力过程。如果按静力法计算剩余结构的内力,需乘以动力放大系数来考虑拆除构件后的动力效应。本文建议动力放大系数 A 的取值为:当构件直接与被拆除构件相连或位于被拆除构件正上方时,取 2.0;其他情况取 1.0。

由于连续倒塌属于结构破坏的极端情况,其安全度可适当降低。抗连续倒塌的目标是剩余结构的水平构件不发生断裂破坏落下,因此跨越被拆除构件的水平构件容许最大程度发挥其抗弯承载能力和变形能力,故其正截面抗弯承载力计算时,钢筋抗拉强度可采用极限强度 f_u ,即可取 $1.25f_{yk}$, f_{yk} 为钢筋抗拉强度标准值。其它构件及其它受力情况的承载力计算,材料强度可采用标准值,斜截面等考虑到破坏的脆性特征,故不建议提高材料强度。

5.2 概念设计

概念设计主要从结构体系的备用路径、整体性、延性、连接构造和关键构件的判别等方面进行结构方案和结构布置设计,避免存在易导致结构连续倒塌的薄弱环节,具体内容如下:

(1) 增加结构的冗余度,使结构体系具有足够的备用荷载传递路径

具有足够的备用荷载传递路径是结构不发生连续倒塌的基本要求。采用合理的结构方案和结构布置,增加结构的冗余度,形成具有多个和多向荷载传递路径传力的结构体系,可避免存在引发连续性倒塌的薄弱部位。通常可通过拆除构件法判定结构是否具有备用荷载传递路径,即在结构方案确定后,拆除某一构件,检查剩余结构是否具有备用荷载传递路径,并根据经验估计备用荷载传递路径是否具有相应的承载能力。

(2) 设置整体型加强构件或设置结构缝

局部构件破坏后,控制由此引起的破坏范围,是结构防连续倒塌的目标。为此,可设置整体型加强构件或设置结构缝,对整个结构进行分区。一旦发生局部构件破坏,可将破坏范围控制在一个分区内,阻止连续性倒塌的蔓延。整体型加强构件是结构中的关键构件,其安全储备应高于一般构件。

(3) 加强结构构件的连接构造,保证结构的整体性

保证结构构件的有效连接能增强结构的整体性,并增加结构的冗余度,对于提高结构的抗连续倒塌能力至关重要。对于框架结构,当某根柱发生破坏失去承载力,其直接支承的梁应能跨越两个开间而不塌落,这就要求跨越柱上梁中的钢筋贯通并具有足够的抗拉强度,通过贯通钢筋的悬链线传递机制,将梁上荷载传递至相邻的柱。拉结构造是最简便的保证结构整体性的措施。对于混凝土框架结构,一般要求在外围周边构件中的纵向受力钢筋应拉通布置(纵向、横向、竖向),结构的内部拉结应沿互相垂直的两个方向分布在各个楼层,并与外部拉结有效连接。

(4) 加强结构延性构造措施,保证剩余结构的延性

结构在局部破坏发生后,剩余结构中部分构件会进入塑性。因此,应选择延性较好的材料,采用延性构造措施,提高结构的塑性变形能力,增强剩余结构的内力重分布能力,可避免发生连续性倒塌。可根据拆除构件后的结构失效模式概念判别来确认需加强延性的部位。

(5) 对可能出现的意外荷载和作用有所估计

如果能够对可能出现的意外荷载和作用有所估计,则会使得结构抗连续倒塌设计更有目的性,即可有针对性的对可能遭遇意外荷载直接作用的结构构件进行局部加强。如对居民楼应着重考虑燃气爆炸对结构可能产生的破坏作用,对易爆危险品、化工反应装置厂房等,也应考虑可能发生的爆炸对结构产生的破坏作用,同时采取措施降低意外事件的发生概率。由于意外荷载的作用方向可能与正常使用荷载相反,因此对可能直接遭遇意外荷载作用的部位,需要考虑结构可能承受反向荷载作用的情况。对于主要承受结构重力荷载的墙和柱,应考虑能承受一定的横向荷载,竖向构件应有足够钢筋可靠锚固于水平构件。

概念设计的缺点是难以量化,依赖于设计人员水平和经验。尽管如此,对于一般结构,通过以上概念设计的指导,可有效增强结构的整体性,在一定程度上可提高结构抗连续倒塌能力。

5.2 拉结强度设计

拉结强度设计是对结构构件间的连接强度进行验算，使其满足一定的要求，以保证结构的整体性和备用荷载传递路径的承载能力。拉结强度法基本原则是，在一根竖向构件失效后，跨越该竖向构件的框架梁具有足够的极限承载能力避免发生连续破坏，如图 1 所示。

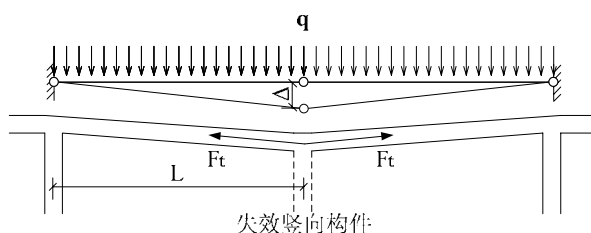


图 1 柱子失效后梁的跨越能力

竖向构件失效后，跨越该竖向构件的框架梁的极限承载力可按两种机制确定。在小变形阶段，框架梁的极限承载力以梁端塑性铰的抗弯承载力提供，称为“梁机制”。在大变形阶段，梁端塑性铰承载力丧失，框架梁的极限承载力以梁内连续纵筋轴向极限拉力的竖向分力提供，称为“悬链线机制”。为保证梁内连续纵筋能可靠地发挥其极限拉力，纵筋需在梁端支座有足够的锚固，即要求发挥“悬链线机制”的梁内纵筋在梁端支座处是连续的。一般情况下，“梁机制”和“悬链线机制”不同时出现，因此框架梁的跨越能力可取“梁机制”和“悬链线机制”两者中的较大值。

根据框架梁的位置，框架结构中有三种主要的抗连续倒塌子结构单元，如图 2 所示。对于图 2(a)所示的内部结构单元，跨越被拆除竖向构件的框架梁两端有可靠锚固，此时“悬链线机制”提供的承载力一般高于“梁机制”的承载力，故可仅按“悬链线机制”计算内部结构单元的跨越能力；对于图 2(c)所示的角部结构单元，框架梁的跨越能力仅能依靠“梁机制”提供，故仅设按“梁机制”计算；对于图 2(b)所示的周边结构单元，可通过三个框架梁的“梁机制”或边框架梁的“悬链线机制”两者中的较大值计算其跨越能力。

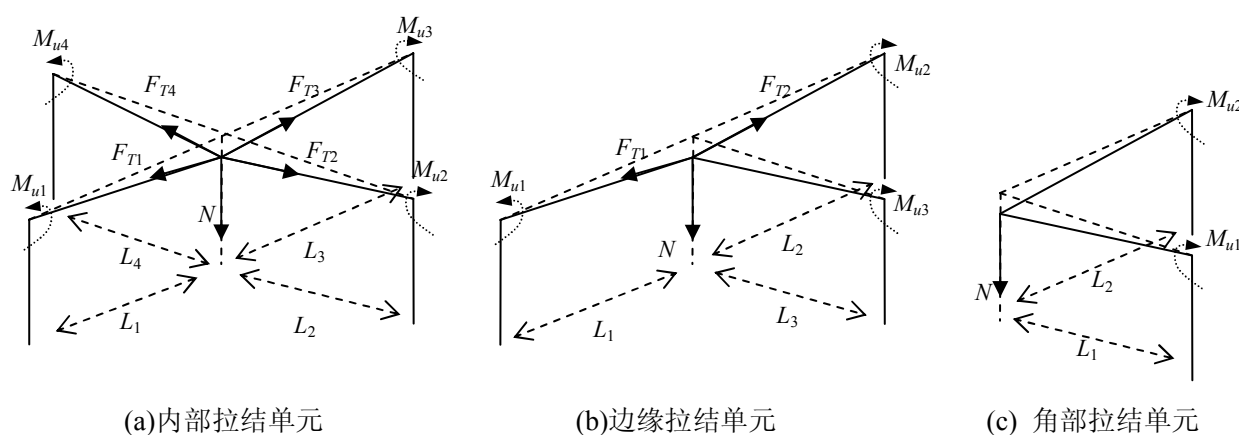


图 2 不同位置处框架梁的跨越能力受力图

拉结强度设计无需对整个结构进行受力分析，比较简便易行，但由于计算模型过于简化，也不考虑风荷载，有关计算参数的经验性成分较多。对于复杂结构，其可靠性和经济性也存

在问题。基于本文作者根据按我国规范设计的混凝土结构抗连续倒塌分析研究^{[16][17]}，建议的混凝土框架结构拉结强度设计法简单介绍如下。

混凝土框架结构拉结强度设计法的基本原则和基本假定如下：

(1) 柱失效后，柱支撑的梁在维持其极限承载力的条件下，能够承受直接传递到梁上的本层荷载，具备足够的跨越能力。

(2) 梁的跨越能力可以分别通过塑性铰机制（即梁端和跨中形成的塑性铰）和连续贯通钢筋的悬链线机制（即连续贯通钢筋的抗拉强度）实现，分别如图 3(a)和图 3(b)所示。

(3) 对于梁机制，出于计算简便的目的，偏于安全的仅考虑梁端塑性铰负弯矩的抗弯能力，不考虑跨中的正弯矩贡献。

(4) 如果梁沿一个方向纵筋贯通，则可考虑其悬链线机制，否则不予考虑。

(5) 对图 2(a)中的内部拉结单元和图 2(b)中的边缘拉结单元，分别验算梁机制和悬链线机制的承载力并取大值；对图 2(c)中的角部拉结单元，仅验算梁机制的承载力。

(6) 梁端塑性铰应具有足够的变形能力，梁应具有足够的抗剪承载力。

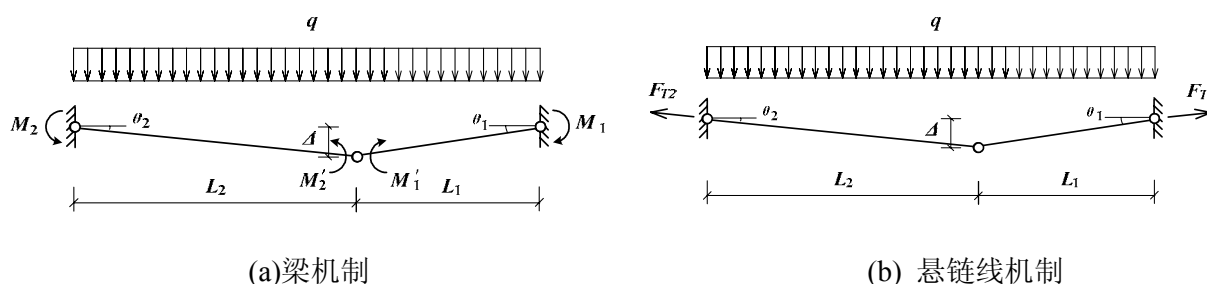


图 3 拉结强度的计算简图

两种承载力机制的计算方法如下：

(1) 按悬链线机制计算时，梁提供的拉结强度 F_T 需满足，

$$F_T > \beta q L_i L_j / \Delta \quad (2)$$

其中， β 为考虑非线性影响的内力折减系数，取 0.67； q 为根据公式(1)算得作用于梁上的均布荷载； L_i 和 L_j 是跨越方向被拆除柱两侧梁的跨度； Δ 是结点容许极限位移，取短梁跨度的 1/5。

(2) 按梁机制计算时，仅考虑梁端塑性铰负弯矩的抗弯能力，不考虑跨中的正弯矩贡献，梁端塑性铰提供的抗弯承载力 M_i 需要满足，

$$M_i > \frac{\beta q L_i^2}{2} \quad (3)$$

其中， L_i 为图 3(a)中的 L_1 或 L_2 ； β 和 q 的意义与 (2) 式的意义和取值相同。

此外，对于每一根柱/墙，均须从基础到结构顶部进行连续的竖向拉结，拉结力必须大于该柱/墙从属楼面面积上最大楼层荷载标准值。

5.3 拆除构件设计

结构抗连续倒塌的拆除构件设计，是按一定规则逐个拆除结构中的竖向构件，计算并保证剩余结构的跨越能力。基于本文作者根据我国混凝土结构的抗连续倒塌分析研究^{[16][18]}，建议的拆除构件设计方法介绍如下：

(1) 对结构的边柱、角柱及底层内柱，从顶层到底层逐个拆除，分析得到拆除后剩余结构的内力，并验算剩余结构各结构构件的是否失效。

(2) 剩余结构的内力可采用弹性静力分析，并考虑拆除竖向构件产生的动力效应，乘以动力放大系数 A 。当所验算的剩余结构构件直接与被拆除竖向构件相连或位于被拆除竖向构件正上方时，(1)式中的动力放大系数 A 取 2.0，其他位置动力放大系数 A 取 1.0。

(3) 剩余结构构件的抗力应满足下式，

$$R \geq \beta S \quad (4)$$

式中， S 为按(1)式荷载组合分析得到的剩余结构构件内力； R 为剩余结构构件的抗力，材料强度取标准值，钢筋抗拉强度可乘 1.25 的超强系数； β 为考虑水平构件塑性耗能的内力折减系数，水平构件两端均考虑出现塑性铰时，取 0.67，对角部和悬挑水平构件，取 1.0；当剩余结构内力采用弹塑性分析时，取 $\beta=1.0$ 。

当拆除构件后，相邻构件不满足(4)式要求时，则认为该相邻构件失效，将该相邻构件也拆除，按上述同样方法继续进行剩余结构的分析。按此步骤分析下去，如果所有失效面积不超过 70m^2 或楼面总面积的 15%，则认为满足抗连续倒塌的要求，否则首先被拆除的构件应被视为“关键构件”，应增强其安全储备。英国规范^[13]及欧洲规范^[11]规定，关键构件在原有荷载组合的基础上各个方向还应能承受额外的 34kN/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。对于有特殊要求的结构，可根据意外荷载的概率分析，确定合适的意外荷载值。

5.4 配筋构造要求

参照国外有关抗连续倒塌的配筋构造要求，建议：

(1) 各楼板支撑梁至少应有一根底部连续贯通的（或采用可靠连接）纵筋，并在非连续支座处可靠锚固，箍筋应对连续贯通纵筋有良好约束。当不满足以下第(3)项的箍筋构造要求时，至少 1/4 跨中正弯矩纵筋、且不少于 2 根纵筋应连续或在支座可靠连接。连续贯通纵筋的锚固构造应符合抗震结构的要求。

(2) 结构周边梁连续纵筋不少于 1/6 的支座负弯矩受力纵筋，也不少于 1/4 的跨中正弯矩受力纵筋，且不少于 2 根。

(3) 连续纵筋应尽量置于箍筋角部，箍筋弯钩不应小于 135° 。

(4) 楼板内钢筋宜适当贯通，增强楼面结构的拉结强度。

五、结语

结构设计规范仅是对结构设计方法和结构构造在一般正常使用情况下的设计规定，且大多是关于结构构件的具体设计规定。符合规范规定的设计并不能代替优秀的结构设计，只能保证设计的结构满足正常情况下所预期的安全度要求。对于结构可能遭遇意外荷载和作用下的结构连续性倒塌情况下，其结构安全要求和设计性能目标很难在规范中明确表述，这首先涉及到结构体系和结构方案的合理性，在此基础上，关键构件及其安全储备、结构构件的连续性、结构分区、构件连接构造、细部配筋构造、对结构冗余度的理解和把握、结构构件的延性等，需要综合考虑和利用结构知识和结构设计原理，是工程结构设计人员综合能力和水平的体现。设计人员应在充分理解结构传力机制、结构体系受力的层次性、连接构造细节与受力机理、结构体系的冗余度以及备用安全储备等结构设计原理的基础上，对潜在意外事件和灾害的估计及其可能造成损失有必要的评估，并借助先进的结构分析手段和方法，结合工程经验和规范规定，才能作出经济、合理、安全的优秀结构设计。除非特殊的工程要求，一般情况下不需采用十分复杂的结构分析方法进行专门的结构抗连续性倒塌分析。因此，对于一般的结构设计，可以说结构抗连续性倒塌设计是结构设计的一门艺术。本文介绍的结构抗连续性倒塌的措施和方法，供设计人员在工程结构设计中借鉴，其实际效果需要设计人员根据具体工程情况灵活运用，关键是要能够把握整个结构体系的安全性。同时，也要从各种工程结构事故中汲取教训，不断丰富抗连续倒塌的结构设计经验。

参考文献

- [1] 陈肇元. 室内燃气爆炸危害与房屋结构设计对策, 清华大学抗震抗爆工程研究室科学研究报告[R], 1991年9月
- [2] BS 8110-1: 1997. Structural use of concrete: Part 1: Code of practice for design and construction[S].
- [3] American Concrete Institute. Building code requirements for structural concrete (ACI 318m-02) and commentary (ACI 318mr-02) [S]. Farmington Hills, Mich. 2002
- [4] Department of Defense. Unified Facilities Criteria (UFC): Design of Structures to Resist Progressive Collapse[S], Washington, D.C. 2005
- [5] United States General Services Administration (GSA). Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects[S], Washington, D.C. 2003
- [6] 中华人民共和国建设部.GB50010-2002.混凝土结构设计规范[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [7] Osama A. Mohamed. Progressive Collapse of Structures: Annotated Bibliography and Comparison of Codes and Standards. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(4): 418-425
- [8] Bruce R. Ellingwood. Building Design for Abnormal Loads and Progressive Collapse[J], Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2005, 20(3): 194-205.
- [9] American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE-7, Reston, Va, 2005.
- [10] S. M. Marjanishvili. Progressive Analysis Procedure for Progressive Collapse[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2004, 18(2): 79-85.
- [11] European Committee for Standardization. EN 1991-1-7:2006, Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-7: General Actions - Accidental actions. Brussels; 2006.
- [12] Moore, D. B. The UK and European regulations for accidental actions[C]. Proceedings of Workshop on

Prevention of Progressive Collapse, National Institute of Building Sciences, Washington, D.C. 2002.

- [13]British Standard Institute, BS8110: Structural use of concrete: Part 1: Code of practice for design and construction, London, 1985.
- [14]胡晓斌,钱稼茹. 结构连续倒塌分析与设计方法综述[J], 建筑结构, 2006, 36(Sup): 79-83.
- [15]Bruce R. Ellingwood, Mitigating Risk from Abnormal Loads and Progressive Collapse. Journal of Performance of Constructed Facilities[J], 2006, 20(4):315-323.
- [16]陆新征, 李 易, 叶列平, 马一飞, 梁益, 钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌设计方法的研究[J], 工程力学, 2008, 25(Sup.2): 150-157.
- [17]李易, 陆新征, 叶列平, 马一飞, 梁益, 结构抗连续倒塌的拉接强度设计方法[C], 第十届全国混凝土结构基本理论及工程应用学术会议, 2008.8.1~4, 大连: 391-396.
- [18]梁益, 陆新征, 李易, 叶列平, 江见鲸, 3层 RC 框架的抗连续倒塌设计, 解放军理工大学学报(自然科学版) [J], 2007, 8(6): 659-664.
- [19]梁益, 陆新征, 缪志伟, 叶列平, 结构的连续倒塌: 规范介绍与比较[C], 第六届全国工程结构安全防护学术会议论文集, 洛阳, 2007.8, 195-200
- [20]Lu XZ, Li Y, Ye LP, Ma YF, Liang Y, Study on the design methods to resist progressive collapse for building structures[C], Proceedings of 10th International Symposium on Structural Engineering for Young Experts, Oct. 2008, Changsha: 478-483.
- [21]陆新征, 张炎圣, 江见鲸, 基于纤维模型的钢筋混凝土框架结构爆破倒塌破坏模拟[J], 爆破, 24(2), 2007, 1-6.