

文章编号: 1000-4750(2008)Sup.II-0150-08

# 钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌设计方法的研究

\*陆新征<sup>1,2</sup>, 李 易<sup>1,2</sup>, 叶列平<sup>1,2</sup>, 马一飞<sup>1,2</sup>, 梁 益<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 首先简要介绍了国外抗连续倒塌设计规范的主要设计方法和分类设计体系, 然后重点对钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌拆除构件设计法和拉结强度设计法进行较为深入的分析研究。在基于非线性动力分析的拆除构件设计法进行分析的基础上, 对基于线弹性静力分析的拆除构件法的原理和设计参数进行了分析和验算, 提出适合我国工程结构的设计参数。分析了国外规范拉结强度设计法应用于按我国规范设计的框架结构的不适用性及其原因, 并对国外规范拉结强度设计法中基本拉结强度的计算模型所存在的不足进行了改进, 提出了考虑空间传力路径等因素的拉结强度设计法。通过算例对该文建议的线弹性静力拆除构件设计法和拉结强度设计法进行了设计验证。

**关键词:** 钢筋混凝土框架结构; 抗连续倒塌设计; 非线性动力拆除构件法; 线性静力拆除构件法; 拉结强度法

**中图分类号:** TU375.4 **文献标识码:** A

## STUDY ON DESIGN METHOD TO RESIST PROGRESSIVE COLLAPSE FOR REINFORCED CONCRETE FRAMES

\*LU Xin-zheng<sup>1,2</sup>, LI Yi<sup>1,2</sup>, YE Lie-ping<sup>1,2</sup>, MA Yi-fei<sup>1,2</sup>, LIANG Yi<sup>1,2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This paper summarizes the major design methods and classification-design systems in foreign codes to resist progressive collapse. And then the alternate path (AP) method and tie force (TF) method in the progressive design for reinforced concrete (RC) frames are studied. Firstly, based on the analyzing the nonlinear dynamic AP method, the principle and design factors of the linear static AP method are analyzed, and moreover, design factors suitable for Chinese structures are suggested. Secondly, the inapplicability of the TF method in foreign codes to enhance Chinese RC frames is studied. The calculating model of foreign TF method is improved and a TF method considering space load paths is suggested. Both the linear static AP method and the TF method suggested by this paper are verified by design.

**Key words:** reinforced concrete frame; progressive collapse design; nonlinear dynamic alternate path method; linear static alternate path method; tie force method

结构的连续倒塌是指由于偶然意外荷载和作用造成结构的局部破坏, 并导致结构产生非稳定的连续性破坏发展。结构一旦发生连续倒塌, 会造成很严重的生命财产损失, 并产生重大社会影响, 因

收稿日期: 2008-03-20; 修改日期: 2008-11-20

基金项目: 国家十一五科技支撑计划项目(2006BAJ03A02); 国家自然科学基金项目(50808106)

作者简介: \*陆新征(1978—), 男, 安徽芜湖人, 副教授, 博士, 副所长, 主要从事结构非线性计算和仿真研究(E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn);

李 易(1981—), 男, 湖北襄樊人, 博士生, 主要从事结构抗连续倒塌研究(E-mail: yili07@mails.tsinghua.edu.cn);

叶列平(1960—), 男, 江苏扬州人, 教授, 博士, 主要从事混凝土结构, 地震工程研究(E-mail: ylp@tsinghua.edu.cn);

马一飞(1985—), 男, 北京密云人, 学士, 主要从事结构抗连续倒塌研究(E-mail: fiodove@163.com);

梁 益(1985—), 男, 湖南安化人, 学士, 主要从事结构抗连续倒塌研究(E-mail: liangyi1985@gmail.com).

而日益受到公众的关注和研究者的重视。

自 1968 年英国 Ronan Point 的 18 层装配式大板结构公寓因煤气爆炸造成连续倒塌事件发生以来, 国外对该问题已经进行了多年的研究, 其间经历了 1995 年美国 Alfred P Murrah 联邦政府办公楼和 2001 年世贸双塔等多起重大连续性倒塌事件。目前, 国外一些规范中均有关于改善结构抗连续倒塌能力的具体规定。在我国, 结构连续性倒塌事故也时有发生, 1990 年辽宁盘锦发生由于燃气爆炸导致主体结构倒塌的事故, 2007 年山西大同发生一起同样是由于燃气爆炸导致的某居民楼部分坍塌事件。但我国在结构抗连续倒塌的研究和实践上, 已有成果还比较有限<sup>[1]</sup>。我国《混凝土结构设计规范 GB50010-2002》仅在第 3.1.6 条规定<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。规范说明中只对该条款作了简单的概念性补充, 没有提出的具体设计方法和准则, 缺乏可操作性。

本文介绍了清华大学土木工程系近年来在钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌设计方面的一些主要研究成果, 并给出了相应的工程设计建议。

## 1 结构抗连续倒塌设计方法概述

结构抗连续倒塌设计与一般结构设计不同。一般结构抗风、抗震等防灾设计中, 考察的是整个完好结构抵御灾害荷载的能力。而结构抗连续倒塌设计中考察的是因意外事件导致部分构件失效退出工作后, 剩余结构的抗倒塌能力, 其设计目标和计算模型与一般结构设计情况有所不同。目前世界各国提出的结构抗连续设计方法, 主要包括: 概念设计、拉结强度设计和拆除构件设计, 以下简要介绍。

### 1) 概念设计。

概念设计主要从结构的整体性、延性、冗余度和构造措施等结构设计概念, 来改善结构的抗连续倒塌能力。各国规范和设计指南均强调了抗连续倒塌概念设计的重要性。研究表明: 对于充分考虑地震作用进行设计的结构, 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>[3]</sup>。在此基础上, 针对结构可能发生的连续倒塌工况, 采取一些概念性的设计措施, 一般情况下可取得良好的效果, 也不会过多的增加造价。概念设计一般

包括以下几个方面<sup>[4-5]</sup>: ① 合理的结构方案和结构布置, 避免存在可能引发连续性倒塌的薄弱部位; ② 加强构件间的连接构造, 增强结构的整体性和连续性; ③ 增加结构的冗余度, 使结构具有多个荷载传递路径及其传递能力; ④ 采用延性构造措施, 使可能发生失效破坏部位具有足够的延性; ⑤ 考虑反向荷载作用; ⑥ 采用连续性配筋, 使楼板和梁在达到承载力极限状态时能够发挥悬链线作用; ⑦ 墙和柱能承受一定的横向荷载。概念设计的缺点是难以量化, 依赖于设计人员的水平和经验。

### 2) 拉结强度设计。

拉结强度设计是对结构构件之间的连接强度进行验算, 使其满足一定的强度要求, 以保证结构的整体性和备用荷载传递路径及其传递能力。拉结强度设计一般通过将实际超静定结构简化为静定悬链线构件, 来近似得到构件之间连接所需的最小强度。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, 其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。

### 3) 拆除构件设计。

拆除构件设计将结构中的部分构件拆除, 模拟结构的初始破坏, 通过有限元法分析结构中部分构件拆除后剩余结构的强度, 判断结构是否会发生连续倒塌。如果结构发生连续倒塌, 则通过增强拆除后的剩余构件来避免连续倒塌, 这种方法的实质是增强结构的冗余度, 提供有效的备用传力路径, 因此又可称为“替代路径设计法”(Alternate Path Method)。如果一个构件无法找到替代路径, 则该构件应被视为“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。如英国<sup>[6]</sup>及欧洲<sup>[7]</sup>规范规定, 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  $34\text{kN/m}^2$  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。

上述三个方法设计结果的可靠度依次提高, 但是设计计算的工作量也随之大幅增加。因此, 国外规范通行的处理方法是根据建筑物的重要性来进行安全分级, 对于不同安全等级的建筑采用不同设计方法, 如 Eurocode 1<sup>[7]</sup>和 DoD 2005<sup>[4]</sup>(表 1)。

表 1 Eurocode 1 和 DoD 2005 的抗连续倒塌分类设计  
Table 1 Classification design of Eurocode 1 and DoD 2005 for progressive collapse resistance

	安全等级	1	2(低风险)	2(高风险)	3
Eurocode 1 <sup>[7]</sup>	设计方法	无需特别设计	水平拉结设计	(1) 水平竖向拉结设计 (2) 拆除构件法 (3) 关键构件法	需倒塌风险评估
	安全等级	非常低	低	中和高	
DoD 2005 <sup>[4]</sup>	设计方法	水平拉结设计	(1) 水平拉结设计 (2) 竖向拉结设计(若不满足竖向拉结要求, 则应用拆除构件设计)	(1) 拉结设计 (2) 拆除构件设计 (3) 满足延性需求	

## 2 荷载取值和材料强度取值

结构连续倒塌属于极小概率事件时, 荷载组合可仅考虑永久荷载和准永久荷载, 本文建议荷载组合设计值可按式计算:

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

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;  $S_{qwk}$  为风荷载标准值;  $\psi_{qi}$  为可变荷载的准永久值系数;  $\psi_{cw}$  为风荷载组合值系数, 取 0.2;  $A$  为动力放大系数, 采用静力方法计算结构内力时, 需考虑倒塌过程中的动力效应的影响。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, 荷载动力放大系数  $A$  取 2.0, 其他位置  $A$  取 1.0。采用动力计算则不必考虑动力放大系数, 即  $A$  取 1.0。关于动力放大系数的取值将在下文讨论。

抗连续倒塌设计时, 考虑到连续倒塌是小概率事件, 构件材料强度取标准值。

## 3 拆除构件设计法

在现有抗连续倒塌设计方法中, 拆除构件设计方法是最为准确可靠的设计方法。为准确的确定结构的抗连续倒塌能力, 拆除构件设计方法有两个关键问题需要解决。

### 1) 结构倒塌过程的复杂性。

结构的倒塌破坏是一个非常复杂的非线性动力过程, 而非结构的非线性动力计算代价高昂且对设计人员也有很高要求。故目前较为先进的规范都根据建筑物的复杂程度和重要性等级建议了不同的倒塌过程模拟方法。对于特别复杂或特别重要的建筑物, 需要采取非线性动力计算。而对于其他建筑物, 可以采用线弹性静力、线弹性动力、非线性静力等近似计算方法。并通过引入动力放大系数、强度折减系数等经验系数来近似考虑结构倒塌的动

力过程和弹塑性影响。就我国目前工程实践情况而言, 宜可参考此类做法。故本文重点研究了拆除构件分析的非线性动力计算, 并以此分析结果为依据, 给出线弹性静力计算模型和设计方法。

### 2) 初始破坏构件的不确定性。

实际结构的构件众多, 如果再考虑多个构件组合, 则构件失效的工况数将非常庞大, 对所有工况逐个进行分析实际上难以承受。目前各国规范通行方法是, 每次分析只考虑一个构件退出工作, 且只考虑易遭受破坏的竖向受力构件。同时允许设计人员根据工程具体情况判断易遭受破坏构件的风险, 增加分析工况。在没有更充分依据的情况下, 本文也参照此做法, 按照国外规范<sup>[4]</sup>通行的拆除构件顺序, 从顶层到底层, 依次拆除每层的长边短边中柱和角柱以及底层的中间柱。

## 3.1 基于非线性动力时程计算的拆除构件设计

### 3.1.1 有限元分析工具

非线性动力时程计算是目前模拟结构连续倒塌全过程最合理的计算方法。为了实现倒塌模拟的目标, 要求计算程序能够考虑倒塌过程中构件大变形的强几何非线性, 构件屈服、破坏失效和断裂的强材料非线性, 甚至结构倒塌、碰撞过程中的强接触非线性问题。而现有各种结构计算程序, 在解决上述问题时都存在一定困难, 特别是对钢筋混凝土结构的倒塌全过程模拟。为此, 本文作者开发了以纤维梁模型和分层壳模型为代表的新型结构单元模型, 以及以混凝土微平面模型为代表的材料本构模型, 较好的实现了对钢筋混凝土结构倒塌过程的模拟。图 1 所示为湖南大学进行的钢筋混凝土平面框架倒塌试验<sup>[8]</sup>, 图 2 所示为本文作者开发的钢筋混凝土纤维梁模型计算程序 THUFIBER 对该试验结果的对比, 可见与试验结果吻合良好。故可基于该数值模型, 模拟结构的连续倒塌过程, 进而提出相应的设计建议。



图1 湖南大学平面框架倒塌试验

Fig.1 Collapse test of plane frame in Hunan university

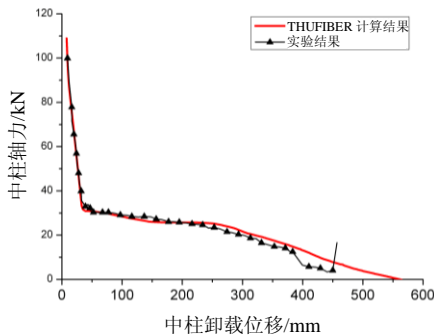


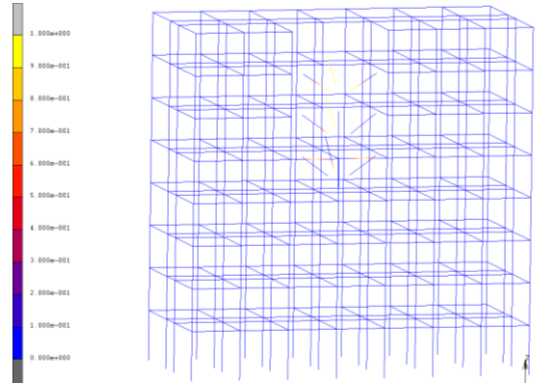
图2 THUFIBER 对试验拆除柱的轴力和位移的计算

Fig.2 Calculation of THUFIBER for axial force and displacement of removed column in test

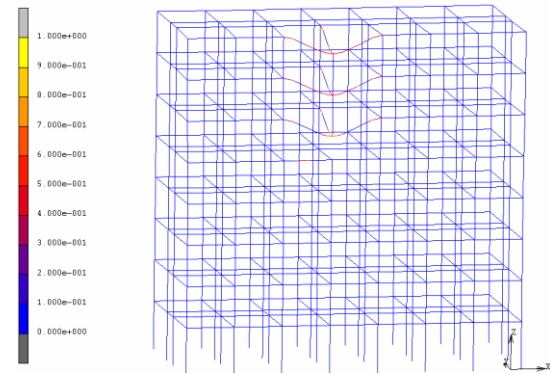
3.1.2 基于非线性动力分析方法的设计与研究

对两座我国典型钢筋混凝土框架结构进行了分析，两个框架的层数分别为3层和8层。3层框架结果见文献[9]，图3为8层混凝土框架在应用非线性动力拆除构件法进行抗连续倒塌设计前后，计算模拟的破坏情况。表2所示为8层框架进行抗连

续倒塌设计后的梁主筋用量的变化。分析结果表明：我国钢筋混凝土多层框架结构的抗连续倒塌能力存在不足。除此以外，由于非线性动力拆除构件分析计算结果最准确，因此本文用非线性动力拆除构件法来检验各种设计方法的设计结果可靠性。



(a) 设计前，拆除第6层长边中柱后，结构发生倒塌



(b) 设计后，拆除第6层长边中柱，结构未倒塌

图3 8层混凝土框架结构的非线性动力拆除构件设计

Fig.3 Nonlinear dynamic alternate path design for 8-storeys concrete frame

表2 8层框架梁纵筋用量比较

Table 2 Comparison for consumption of longitudinal reinforcement in beams of 8-storeys frame

层数	原始结构		拆除构件法设计				拉结强度法设计			
			本文非线性动力法		本文线性静力法		国外拉结强度法设计		本文拉结强度法设计	
	纵筋用量/t	纵筋用量/t	比原始结构增加/(%)	纵筋用量/t	比原始结构增加/(%)	纵筋用量/t	比原始结构增加/(%)	纵筋用量/t	比原始结构增加/(%)	
1	5.43	5.43	0.00	5.51	1.41	5.57	2.5	5.52	1.66	
2	5.36	5.36	0.00	5.40	0.75	5.50	2.6	5.43	1.31	
3	4.87	4.87	0.00	4.89	0.36	5.00	2.8	4.99	2.46	
4	4.26	4.26	0.00	4.36	2.36	4.39	3.2	4.27	0.23	
5	3.64	3.64	0.00	3.75	3.02	3.78	3.8	3.77	3.57	
6	2.91	3.09	6.04	3.18	9.32	3.04	4.8	3.14	7.90	
7	2.33	2.64	13.50	2.75	17.99	2.48	6.4	2.86	22.75	
8	2.00	2.27	13.46	2.36	18.20	2.24	12.1	2.83	41.50	
总计	30.80	31.56	2.47	32.20	4.54	32.00	4.0	32.81	6.53	

3.2 基于线弹性静力计算的拆除构件设计

非线性动力方法虽然具有准确模拟结构倒塌

的优点，但其计算难度大，对操作人员要求高。故一些国外规范在非线形动力分析的基础上，提出了

基于线弹性静力计算的拆除构件的简化设计方法。本文作者通过研究国外规范中线弹性静力设计方法的原理,提出了适合我国工程结构基于线弹性静力计算方法的有关设计参数。

### 3.2.1 线弹性静力设计流程

线弹性静力设计法通过动力放大系数  $A$  和构件强度折减系数  $\beta$  近似考虑了线弹性静力计算和非线性动力计算之间的差异,其设计计算流程如下:

1) 建立结构的线弹性计算模型,并按照公认的拆除构件顺序,逐一拆除竖向构件。

2) 对拆除构件后的结构模型施加静力荷载,通过静力分析获得各构件内力设计值,并通过动力放大系数  $A$  来考虑拆除构件的动力作用,近似得到线性动力计算的各构件近似内力设计值  $S_{\text{动力}}$ 。

3) 将计算得到的剩余结构构件线性动力分析内力结果乘以相应的强度折减系数  $\beta$ ,近似得到实际构件中需要的非线性动力抗力,即:

$$R \geq \beta S_{\text{动力}} \quad (2)$$

其中:  $R$  为设计抗力;  $\beta$  为考虑构件塑性变形影响对构件强度需求的折减系数。

### 3.2.2 设计参数研究

美国 GSA2003<sup>[10]</sup> 和 DoD2005<sup>[4]</sup> 规范中,对弹性静力设计方法有较为详细的规定,本文对其有关参数的取值进行研究。GSA2003<sup>[10]</sup> 和 DoD2005<sup>[4]</sup> 的动力方法系数  $A$  均取 2。强度折减系数  $\beta$  的取值有所不同, GSA2003<sup>[10]</sup> 对于规则结构取 0.5, 不规则结构取 0.67; 而 DoD2005<sup>[4]</sup> 在计算内力时不考虑强度折减,其原因是 DoD2005<sup>[4]</sup> 设计的对象是国防部门的建筑结构,对抗连续倒塌要求较高。

通过分析前述按我国规范设计的 3 层典型框架结构的线弹性动力、线弹性静力和非线性动力计算结果(见图 4 和图 5),得到以下结论。

1) 对于我国工程结构,动力放大系数  $A$  取 2 是合理的,同时考虑到局部初始倒塌时,动力作用的局部特性,建议在具体计算时可取为:当构件直接与拆除构件相连或位于被拆除构件正上方时,荷载动力放大系数取  $A=2.0$ ,其他位置取  $A=1.0$ 。

2) DoD2005<sup>[4]</sup> 对于结构抗连续倒塌的要求明显偏高,而 GSA2003<sup>[10]</sup> 中不规则结构的强度折减系数对我国规范设计的框架基本是合适的。

为进一步验证动力放大系数  $A$  和强度折减系数  $\beta$  的合理性,对上文中的 8 层框架进行弹性静力拆除构件设计,通过调整获得线弹性静力拆除构件的

最小配筋。其中,动力放大系数  $A$  取 2,强度折减系数  $\beta$  对与角柱相连的梁取 0.65,对其他梁取 0.60。得到配筋指标变化如表 2 所示,通过非线性动力验算,说明对于按我国规范设计的框架结构,强度折减系数  $\beta$  按 GSA2003<sup>[10]</sup> 中不规则结构取 0.67 可以满足抗连续倒塌要求,同时强度折减系数  $\beta$  可以根据构件位置作适当调整。

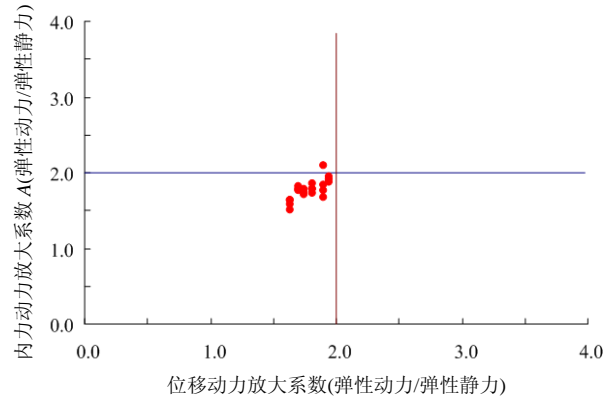


图 4 3 层框架各除构件工况的动力放大系数

Fig.4 Dynamic amplification coefficients of structure under different alternate path conditions for 3 story frame

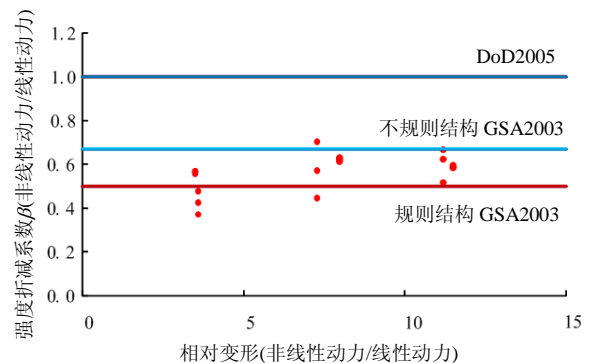


图 5 3 层框架各拆除构件工况的强度折减系数

Fig.5 Strength reduce factors of structure under different alternate path conditions for 3 story frame

## 4 拉结强度设计法

拉结强度设计法通过控制最小配筋率,在结构中对构件和连接进行拉结,可提高结构的整体性和备用荷载传递路径的能力。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>[6]</sup>。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。本文仅讨论钢筋混凝土框架的拉结设计。

目前,国外规范中的拉结设计方法主要基于英国规范的方法。但是,通过对我国 3 层和 8 层框架结构分析,发现由于我国与国外结构安全储备程度的差异,国外拉结设计法不能保证按我国规范设计

的框架结构的抗连续倒塌安全，倒塌模拟结果见文献[10]和表 3，框架梁钢筋用量见表 2。国外规范的拉结强度法基于的工程背景与我国不同，在材料参数、可靠度、设计方法等方面均有差异，因此将其应用在我国工程结构上将不能满足抗连续倒塌要求。除此以外，其方法本身也有不足之处，有些研究发现即使满足现行拉结强度规定，结构在抵御连续倒塌方面仍然具有明显的弱点<sup>[11]</sup>。因此有必要对国外规范拉结强度设计法的基本原理及其不足进行分析。

表 3 8 层框架原始结构和国外拉结强度法设计后结构的倒塌模拟结果

Table 3 Result of collapse simulations of 8-storeys frame after normal design and foreign TF design

		角柱	长边中柱	短边中柱	内柱
首层	原始结构	不倒塌	不倒塌	不倒塌	不倒塌
	拉结设计后结构	不倒塌	不倒塌	不倒塌	不倒塌
第 2 层	原始结构	不倒塌	不倒塌	不倒塌	不需设计
	拉结设计后结构	不倒塌	不倒塌	不倒塌	不需设计
第 3 层一	原始结构	倒塌	不倒塌	不倒塌	不需设计
第 4 层	拉结设计后结构	倒塌	不倒塌	不倒塌	不需设计
第 5 层一	原始结构	倒塌	倒塌	不倒塌	不需设计
第 8 层	拉结设计后结构	倒塌	倒塌	不倒塌	不需设计

4.1 国外拉结强度设计法的原理和不足

为较为简便的获得构件在极限状态下所需的基本拉结强度，国外规范假设结构抗连续倒塌的极限破坏模式的悬链线模型，即认为水平构件能够通过发挥出悬链线作用来避免本层构件坠落破坏，从而将复杂的超静定结构转化为一个静定结构来进行分析，其计算简图如图 6 所示。

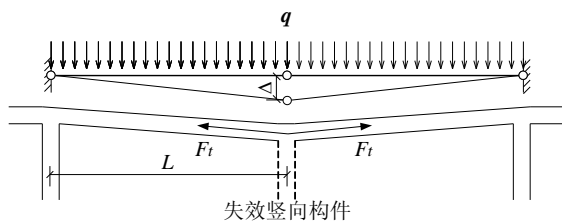


图 6 国外规范基本拉结强度计算简图

Fig.6 Calculating diagram for basic tie strength in foreign codes

在英国规范<sup>[6]</sup>中，用几个代表性值获得了基本拉结强度，其中楼面恒载取  $3.6\text{kN/m}^2$ ，活载取  $1.2\text{kN/m}^2$ ，跨度为  $5\text{m}$ ，挠度取  $L/5$ ，这样得到基本拉结力为  $F_t=60\text{kN}$ 。

通过国外规范的基本拉结强度推导，可以发现其存在以下主要问题。

- 1) 未考虑集中荷载和梁端塑性弯矩的影响。

国外基本拉结强度的计算模型只考虑了均布荷载，未考虑集中荷载的作用，可能会导致偏于不安全。在具体工程实践中，次梁的存在、上层柱的轴力和不规则的结构布置也会产生集中力。考虑集中力作用的计算简图如图 7 所示， $F_c$  为集中力， $L_i$  为集中力的作用位置。

国外基本拉结强度的悬链线模型，只考虑了梁的轴向拉结力，实际上对于钢筋混凝土梁而言，破坏极限状态并非完全的悬链线机构，梁端还有塑性弯矩存在。特别是我国很多地区都有抗震设防要求，其梁端上部钢筋配置较多，能够提供较大的梁端负弯矩，如图 7 所示， $M_u$  为梁端负弯矩的极限塑性弯矩。如不加以合理考虑，可能会造成浪费。

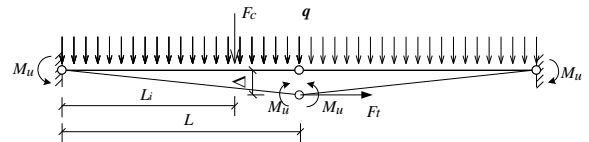


图 7 实际工程中梁在拉结时的受力情况

Fig.7 Force condition of tie beams in practical engineering

2) 未考虑荷载的空间传力。

实际结构是一个空间传力体系，国外拉结强度设计法在计算基本拉结强度时并没有考虑不同位置处的空间传力特点，也未考虑竖向承重构件破坏后，与竖向承重构件相连的梁之间长度、刚度不同的影响，使得计算模型不够合理。因此应该对不同位置处的基本拉结强度分类计算如图 8 所示。

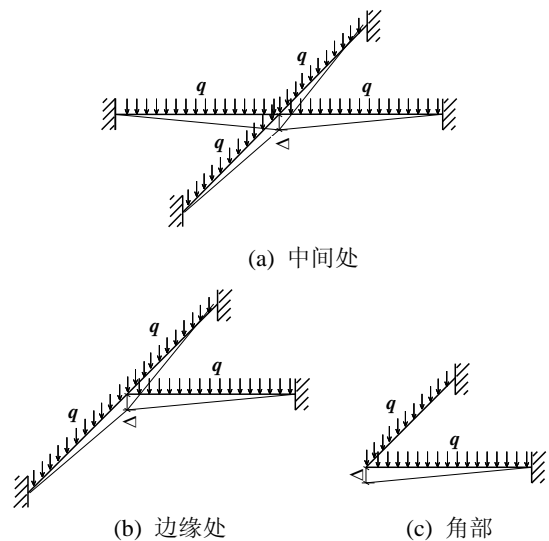


图 8 不同位置处的基本拉结强度计算简图

Fig.8 Calculating diagram for basic tie strength in different locations

不同位置处的梁所能容许的最大挠度也不同，中间位置处(图 8(a))超静定次数较高，塑性内力重

分布能力较大, 容许挠度可以大一些。而角柱(图 8(c))超静定次数少, 塑性内力重分布能力差, 容许挠度应限制得更为严格。国外规范规定所有梁的最大容许挠度均取 1/5 跨度是不合理的。

3) 楼层高度超静定次数影响考虑不合理。

在国外基本拉结强度取  $(20+4n_0)\text{kN}$  和  $60\text{kN}$  的较小值( $n_0$  表示建筑的总层数)。这意味着对于层数较低的结构需要的拉结力较小, 而事实上, 层数较高的结构由于其超静定次数较高, 结构在局部发生初始破坏后, 剩余结构中参与分担不平衡荷载的构件较多, 抵御抗连续倒塌的能力也强一些, 所需要的拉结力相应就小一些。

4) 未考虑动力效应和强度折减。

拉结强度法是一个静力设计方法, 对构件的弹塑性的考虑也很有限。由 3.2 节的讨论可知, 竖向构件的瞬时初始破坏造成的动力效应, 以及构件的弹塑性造成线性静力计算结果和实际相差很大。因此不考虑这两个因素的影响也是不合适的。

## 4.2 本文建议的拉结强度设计方法

### 4.2.1 基本原则与假定

综合 3.1 节的讨论, 本文建议的拉结设计法基本原则如下:

1) 拆除柱子后, 与其相连的梁构件的跨越能力同时存在梁机制(即利用梁端塑性铰抗弯强度)和悬链线机制(即利用贯穿梁纵筋的抗拉强度)。

2) 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。

3) 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(如与角柱相连的梁就不宜考虑悬链线作用)。

4) 拉结构件应具有足够的变形能力和抗剪强度。

### 4.2.2 计算方法和步骤

1) 将每个竖向承重构件周围的承载力单元单独取出, 其计算模型如图 8 所示, 按照梁是否贯通判断每个梁所能提供的承载力机制。

2) 将每个梁上均布荷载和集中荷载按照支座处弯矩等效的原则, 计算作用在原竖向承重构件支撑位置处的等效集中荷载, 计算模型取悬臂梁。将每个梁上的等效集中荷载相加得到整个计算单元的总集中荷载  $N$ , 荷载组合按式(1)确定。

3) 当偶然作用导致竖向构件失效后, 该竖向构

件所支撑的水平构件通过梁机制和悬链线组合机制避免连续倒塌所需的基本水平拉结力为:

$$F_{Ti} = 5\lambda_i(\beta N - \sum F_{Pi}) \quad (3)$$

式中:  $N$  为按式(1)计算得到失效竖向构件所承担的本层竖向荷载;  $F_{Pi}$  为由失效竖向构件直接支撑的水平构件  $i$  按梁机制所能提供的最大竖向反力, 可取  $F_{Pi} = M_i^u / L_i$ ,  $M_i^u$  为水平构件  $i$  支座处能提供最大负弯矩,  $L_i$  为水平构件  $i$  节点到支座距离;  $\lambda_i$  为水平构件  $i$  拉结力分担系数,  $\lambda_i = 1/n$ ,  $n$  为可提供悬链线拉结作用的构件数量。对于中间节点  $n=4$ , 如图 8(a); 对于边节点偏于安全取  $n=2$ , 如图 8(b); 对于角节点偏于安全取  $n=1$ , 如图 8(c)。当不同方向贯通构件跨度和截面刚度差异较大时, 构件分担比例可按线刚度总和的比例确定;  $\beta$  为考虑水平构件端部塑性耗能后强度折减系数, 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。

4) 参照国外规范的建议, 拉结设计应包括内部拉结, 周边拉结, 墙/柱拉结和竖向拉结。

内部拉结: 结构内部各水平构件的拉结力不小于按式(3)计算得到的基本拉结力。

周边拉结: 每一层沿结构周边的水平构件的拉结力不小于同方向相邻内部构件拉结力。对于角柱、悬挑部位, 应适当增大拉结力。

墙/柱拉结: 对于结构的外围柱或墙必须进行水平拉结, 对于结构的角柱则须在两个方向均进行水平拉结, 拉结力取下列两者的较大值: a) 与该墙/柱相连水平构件最大拉结力的 2.0 倍; b) 该墙/柱承受的楼面荷载标准值的 3%。

当结构层高较高时, 应适当提高墙/柱的拉结力。

竖向拉结: 每一根柱/墙均须从基础到结构顶部进行连续的拉结, 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) 结构构件之间拉结所需的连续贯通的最小配筋面积按下式确定:

$$A_s \geq F_T / f_{yk} \quad (4)$$

式中:  $A_s$  为结构构件之间拉结所需的连续贯通的最小配筋面积;  $F_T$  为步骤 4) 计算得到的构件所需基本拉结力;  $f_{yk}$  为钢筋的屈服强度标准值。

### 4.2.3 本文方法的应用

以上文中研究过的 8 层框架结构为例, 验算本

文方法。通过非线性动力拆除构件法验证表明结构满足抗连续倒塌要求,配筋结果如表 2 所示。可见本文建议的拉结强度设计方法是有效的。

## 5 结论

拆除构件法和拉结强度法是抗连续倒塌设计中可操作的工程设计方法。其中,非线性动力拆除构件法计算最准确,但是难度和复杂度较大;线性静力拆除构件法计算简单,其安全性可以通过选取适当的设计参数来保证;拉结强度计算也很简便,但是其计算模型的选取对设计效果的影响较大。非线性动力拆除构件法一般用于复杂结构和高安全等级结构的抗连续倒塌设计,该方法除了对拆除构件的位置和次序有规定以外没有其他具体的要求,但是对设计人员水平有很高的要求。因此,后两种设计应用于一般重要建筑,其设计效果可以通过严密的流程和设计方法来进行控制。本文对国外规范中的这两个方法进行了研究,并根据按我国规范设计的算例分析研究,分别提出了适合我国工程结构的设计方法、设计流程和设计参数。

### 参考文献:

- [1] 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(增刊): 79—83.  
Hu Xiaobin, Qian Jiaru. Overview of analysis and design approaches for progressive collapse of structures [J]. Building Structure, 2006, 36(Sup.): 79—83. (in Chinese)
- [2] GB50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.  
GB50010-2002, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [3] Hayes J R, Woodson S C, Pekelnicky R G. Can strengthening for earthquake improve blast and progressive collapse resistance [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2006, 131(8): 1157—1177.
- [4] UFC 4-023-03, Design of structures to resist progressive collapse [S]. Washington D C: Department of Defense, USA, 2005.
- [5] Liu Y. Failure analysis of building structures under abnormal loads [D]. Canada: University of Waterloo, 2004.
- [6] BS 8110-1: 1997, Structural use of concrete: Part 1: Code of practice for design and construction [S]. London: British Standards Institution, 2002.
- [7] Draft prEN 1991-1-7, Eurocode 1-Actions on structures, Part 1-7: General Actions - Accidental actions [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [8] 易伟建, 何庆锋, 肖岩. 钢筋混凝土框架结构抗倒塌性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5): 104—109.  
Yi Weijian, He Qingfeng, Xiao Yan. Collapse performance of RC frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5): 104—109. (in Chinese)
- [9] 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[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2007, 8(6): 659—664.  
Liang Yi, Lu Xinzhen, Li Yi, Ye Lieping, Jiang Jianjing. Design method to resist progressive collapse for a three story RC frame [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 8(6): 659—664. (in Chinese)
- [10] GSA2005, Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization project [S]. Washington D C: the U.S. General Services Administration, 2005.
- [11] 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, 2006, 20(4): 384—390.