

国外 RC 框架抗连续倒塌设计方法的检验与分析*

梁 益, 陆新征, 李 易, 叶列平

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

[摘要] 建筑结构在意外事件时的连续倒塌已成为严重威胁公共安全的重要问题。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 40 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的连续倒塌设计方法。参考美国国防部编制的《结构抗连续倒塌设计》(DoD 2005) 提供的设计流程, 对按照我国现行规范设计的八层钢筋混凝土框架进行了连续倒塌仿真分析, 研究了其抗连续倒塌能力。并应用拉结强度法和拆除构件法, 对该框架进行了抗连续倒塌设计, 建立了将国外规范中的抗连续倒塌设计方法应用于我国框架结构的设计实例, 并指出了其中存在的一些问题。

[关键词] 连续倒塌; 混凝土框架; 拉结强度法; 拆除构件法

Verification and analysis on foreign progressive collapse prevention design methods of RC frame structures

Liang Yi, Lu Xinzheng, Li Yi, Ye Lieping

(Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: Currently, the progressive collapse of the building structures due to accidents 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 40 years of research to this issue and developed corresponding design codes and design guides, such as GSA 2003, DoD 2005 and EuroCode 1. However, codes in China have not yet provided details on the resistance of progressive collapse. Mainly referring to the design process proposed in DoD 2005, the capacity to resist progressive collapse of a typical Chinese 8-story reinforced concrete (RC) frame is analyzed. Then the frame is redesigned with the tie force method and the alternate path method proposed in DoD 2005 to provide examples for the progressive collapse prevention design for Chinese engineers. And some problems when applying foreign codes to Chinese buildings are pointed out.

Keywords: progressive collapse; concrete frame; tie force method; alternate path method

0 引言¹

建筑结构的连续倒塌是由于意外事件(如煤气爆炸、炸弹袭击、车辆撞击、火灾等)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的规模与初始破坏的不成比例, 即可称之为连续倒塌^[1]。连续倒塌一旦发生, 一般造成很严重的生命财产损失。近年来由于各种意外事件造成的建筑结构连续性倒塌事故, 使得该问题日益受到公众的关注和研究者的重视^[2]。

由于多层或高层建筑结构一般同时存在水平和竖向连续倒塌, 而竖向连续倒塌难以通过分区隔离的方法加以避免, 故目前比较行之有效的建筑连续倒塌措施主要是提高结构的整体性。我国现行《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)^[3](简称混凝土规范)仅对抗连续倒塌作了简单的说明, 没有提出设计的具体方法和准则, 缺乏可操作性。目前, 国外的一些主要规范中均有关于如何改善结构抗连续倒塌能力的规定^[2], 如英国的 British Standard^[4]、欧洲的 Eurocode 1^[5]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)^[6]和美国国防部编制的《建筑抗连续倒塌设计》(DoD2005)^[7]则较为详细地阐述了结构抗连续倒塌的设计方法及流程。

文中简单的总结了这些国外规范中的设计方法, 并对其中可以进行定量设计的拉结强度法和拆除构件法进行了算例检验。首先, 参考 DoD 2005 规范提供的设计流程, 基于清华大学开发的框架结构纤维模型分析程序 THUFIBER, 对按照我国现行混凝土规范设计的八层钢筋混凝土框架进行了连续倒塌仿真分析, 研究了其抗连续倒塌能力。在此基础上, 根据现有规范中的拉结强度法和拆除构件法, 对该框架进行了抗连续倒塌设计, 建立了将国外规范中的抗连续倒塌设计方法应用于我国框架结构的设计实例, 发现按我国现行规范设计的框架结构抗连续倒塌能力可能不满足要求, 直接套用国外拉接设计法不能明显改善我国框架结构的抗连续倒塌能力, 而采用基于非线性动力分析的拆除构件法可以有效地保证结构的抗连续倒塌能力。

1 国外抗连续倒塌规范设计方法简介

现有国外规范中提高结构抗连续倒塌能力的方法主要可以归纳为四种: 概念设计法、拉结强度设计法、拆除构件设计法和局部加强设计法。

概念设计法主要从结构的整体性、延性、冗余度

*国家科技支撑计划项目(2006BAJ06B06 和 2006BAJ03A02-01)
作者简介: 梁益, 硕士研究生, Email: liangyi1985@gmail.com.

和构造措施等结构概念设计, 来改善结构的抗连续倒塌能力。概念设计是最简单易行的方法, 但是该方法难以量化, 依赖于设计人员的水平和经验。

拉结强度设计法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。拉结强度设计无需对整个结构进行受力分析, 比较简便易行, 但过于简化, 经验成分较多。对于复杂结构, 其可靠性可能存在问题。

拆除构件设计法将结构中的部分构件拆除, 通过整体受力分析来预测结构是否会发生连续倒塌。如果结构可能发生连续倒塌, 则通过增强拆除后的剩余结构来避免连续倒塌, 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”。拆除构件设计需要多次的整体结构分析以检验结构防倒塌能力, 有时根据需要还要考虑几何和材料的非线性, 其设计过程较为复杂和耗时, 但是其精度较高。

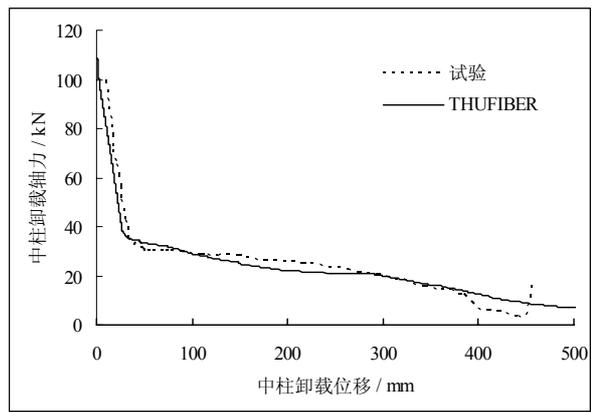
局部加强设计法, 对于破坏后容易引发连续倒塌的主要承重构件, 如果难以通过改善结构布置或拆除构件设计增强其防连续倒塌能力, 则将其视为关键构件进行局部加强设计。

以上四种方法中, 概念设计法是定性设计方法, 而拉结强度设计法和拆除构件设计法是具有系统流程的定量设计方法, 也是应用得最为广泛的设计方法。局部加强设计法往往作为前三个方法的补充设计方法。故本文针对国外规范中建议的拉结强度设计法和拆除构件设计法进行研究。

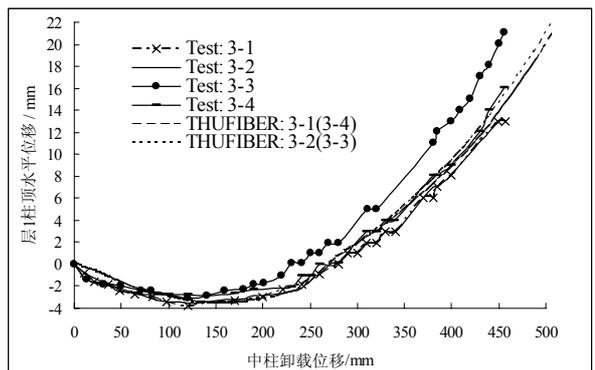
目前各国规范所采用的设计方法和设计理念基本相同, 只是设计的参数和流程上略有一些差别。这些规范中以 DoD2005 规范^[7]的规定最为详细和完备。故文中主要参考 DoD2005 规范^[7]的抗连续倒塌设计方法, 研究按我国规范设计的钢筋混凝土框架结构的抗连续倒塌能力及其存在的问题。

2 THUFIBER 程序简介

要进行结构抗连续倒塌能力分析, 首先要对结构的倒塌破坏过程进行准确的仿真模拟。清华大学在通用有限元软件 MSC.MARC 的基础上, 利用其二次开发功能, 开发了适用于钢筋混凝土杆系结构的 THUFIBER 程序^[8]。在 THUFIBER 程序中, 每根钢筋混凝土杆件的截面被划分成若干个混凝土纤维和钢筋纤维。用户可以分别定义每个纤维的位置、截面积和本构关系。程序自动根据平截面假定得到每个纤维的应变, 并迭代计算确保截面受力平衡。由于采用了合适的材料本构模型, 并可考虑杆件的剪切破坏^[8], 再利用 MSC.MARC 2005 的非线性分析能力, 故在结构抗震和抗倒塌分析方面有着成功的应用^[8-10]。图 1 所示为采用该程序对湖南大学混凝土框架倒塌试验^[11]的模拟, 结果显示该程序在模拟混凝土框架结构倒塌方面具有很高的精确性。



(a) 卸载位移和轴力的关系



(b) 卸载位移和层1柱顶水平位移的关系

图 1 THUFIBER 程序对 RC 框架倒塌试验的模拟

3 结构模型设计

首先基于我国现行规范采用 PKPM 设计软件建立一个八层框架结构模型, 并计算得到配筋结果。在此基础上采用 THUFIBER 程序建立有限元模型, 以进行连续倒塌仿真分析。

3.1 设计参数

总信息: 首层层高 4.2m, 其余层高 3.6m, 柱网尺寸见图 2。框架梁、柱和楼板均为现浇, 柱截面尺寸 550×550, 纵梁截面尺寸 300×550, 横梁截面尺寸 300×500, 楼板厚度 120。房屋内外隔墙均为轻质墙。柱脚假设理想固接于地面。

材料信息: 梁、板、柱混凝土强度等级均采用 C30, 纵向受力钢筋选用 HRB335, 箍筋选用 HPB235。

恒/活荷载信息^[12]: 楼面恒载为 5.0kN/m², 活载为 2.0kN/m², 屋面恒载为 7.5kN/m², 活载为 0.5kN/m²。

地震信息: 建筑场地土类型为 II 类, 抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度值为 0.20g, 设计地震分组为第一组。框架抗震等级为二级, 周期折减系数取 0.75。

风荷载信息^[12]: 基本风压 $w_0=0.45\text{kN/m}^2$, 地面粗糙度为 C 类。

荷载组合^[12]: 恒荷载分项系数 γ_G 为 1.2, 活荷载分项系数 γ_L 为 1.4, 活荷载组合系数 ψ_L 为 0.7, 风荷载分项系数 γ_W 为 1.4, 风荷载组合系数 ψ_W 为 0.6, 水平和竖向地震荷载分项系数 γ_{EH} , γ_{EV} 分别为 1.3、0.5。具体组合方法参见 PKPM 相关资料说明。

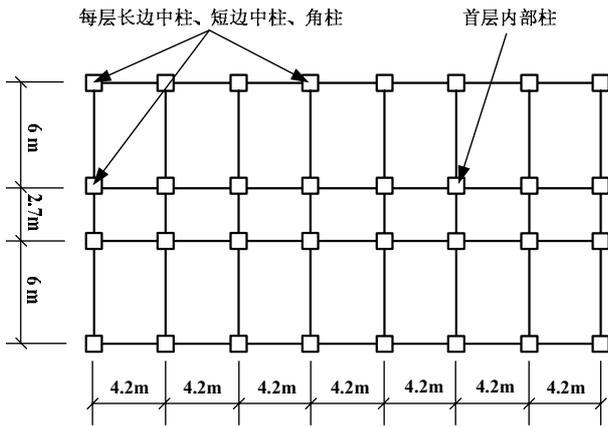


图2 结构标准层平面图及拆除构件法所拆除柱的位置

3.2 有限元模型

3.2.1 配筋和材料参数

在 PKPM 软件给出的配筋图中, 框架梁的配筋分为三段, 在 THUFIBER 模型中, 相应的将每根框架梁分为三个部分, 按照 PKPM 的配筋结果分别赋予材料属性, 以模拟不同配筋的梁段。对于 PKPM 配筋量为零处 (如梁跨中顶部), 按照构造要求配置 2Φ14。

由于连续倒塌为小概率事件, 可适当降低构件材料强度的保证率, 故在连续倒塌仿真分析时材料强度均采用标准值。

3.2.2 荷载组合

按照 DoD2005 的规定, 在进行拆除构件法的非线性动力分析时, 应对整个结构施加如下荷载组合^[7]:

$$(0.9 \text{ or } 1.2)D + (0.5L \text{ or } 0.2S) + 0.2W \quad (1)$$

式中: D 为恒荷载/ kN/m^2 ; L 为活荷载/ kN/m^2 ; S 为雪荷载/ kN/m^2 ; W 为风荷载/ kN/m^2 。

根据上述规定, 对于本结构进行连续倒塌分析时荷载组合取为:

$$1.2 D + 0.5L + 0.2W \quad (2)$$

对于风荷载的施加, DoD2005 规范中要求考虑八个风向并分别进行拆除构件分析^[7], 由于本结构高度不大, 风荷载较小, 同时考虑结构的对称性, 分析中将只考虑一个风向, 即沿结构的横向方向。当进行拆除构件分析时, 拆除的长边中柱均位于结构的背风面。

3.2.3 楼板等效方案

考虑到在倒塌分析时楼板计算比较困难, DoD 2005 规范附录算例采取了将楼板荷载和钢筋折算到梁内的方法^[7]。本文也遵照这一原则, 楼板的重量按照双向板传力的方法传递至相应的框架梁, 通过弯矩等效的方法折算成均布于该梁上的荷载^[13]。

4 原始结构拆除构件分析

将按照我国混凝土规范设计的框架有限元模型作为原始结构, 对该结构模型按 DoD2005 规定依次拆除有关构件后分别进行非线性动力时程分析, 根据计算结果评估该结构模型的抗连续倒塌能力。

4.1 柱的拆除位置

参考 DoD2005 建议的拆除构件法^[7], 倒塌分析采用从整体结构中瞬间移除一个竖向承载构件, 对剩余结构进行弹塑性动力分析的方式来评估整体结构在该初始局部破坏发生后的抗连续倒塌能力。DoD2005 对拆除构件的部位做了规定, 分别考察不同部位的初始局部破坏所引起的连续倒塌后果。对于框架结构, 处于结构外围的每层长边中柱、短边中柱及角柱均须逐一拆除进行倒塌分析。此外, 对于结构的地下停车场和首层, 即难以进行安全控制的区域, 还应拆除该层内部柱进行分析。鉴于本框架结构形式较为简单规整, 对于不同部位的柱, 代表性的选择一根柱进行拆除构件分析。参考 DoD2005 附录 C 中的算例^[7], 每层柱的拆除位置如图 2 所示。

4.2 破坏准则

同时采用强度准则和变形准则进行构件失效判断。在本文分析中, 以钢筋屈服后伸长率超过 10% 认为钢筋发生断裂^[8], 并认为构件破坏失效。另外, 按照 DoD2005 附录 B 的说明^[7], 当框架梁在失去其支撑柱后, 若支承点处的挠度超过梁跨度的 10%, 亦作为构件的失效判别准则。

4.3 破坏范围限制

DoD2005 规定^[7], 对于外围柱的拆除, 直接位于拆除构件上部的楼板的坍塌面积不得大于 70m^2 和 15% 楼面总面积的较小值; 对于内部柱的拆除, 直接位于拆除构件上部的楼板的坍塌面积不得大于 140m^2 和 30% 楼面总面积的较小值; 拆除构件以下的楼板以及与该拆除构件无直接连接的结构不得出现坍塌。DoD2005^[7]认为不能同时满足上述条件就认为结构产生与初始破坏不成比例的连续性倒塌, 本文也以此作为连续倒塌的判据。

4.4 分析步骤

参考 DoD2005 中的规定^[7], 按照以下步骤进行非线性动力分析: 1) 拆除构件前, 结构在竖向荷载作用下达至静力平衡状态; 2) 迅速拆除构件 (即在有限元模型中瞬间“杀死”相应单元); 3) 进行动力分析直至结构破坏或达到一个稳定状态 (文中八层框架分析的结束时间为第 3s 末)。

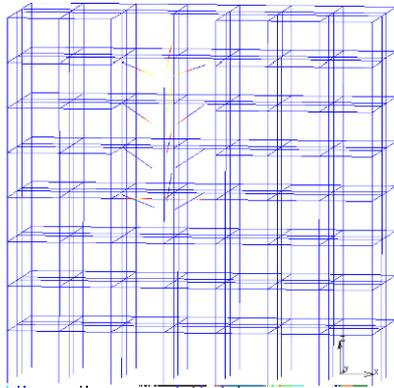
4.5 破坏状况

对于按我国现行规范设计的原始结构, 分别按 4.1 节所述拆除框架柱, 并按 4.4 节的步骤进行分析, 可得到各种拆除工况的分析结果如表 1 所示, 表中满足破坏范围限制要求的称为“不倒塌”, 反之称为“倒塌”。部分柱拆除后结构典型倒塌或变形模式见图 3。

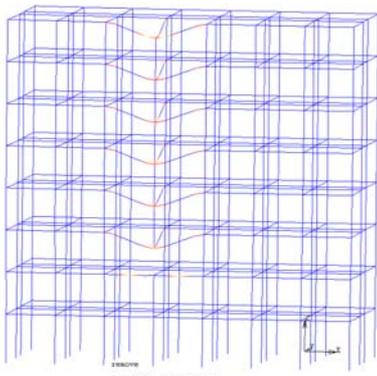
原始结构和拉结设计后结构的倒塌模拟分析结果 表 1

楼层	设计方法	角柱	长边中柱	短边中柱	内柱
1	常规设计	未倒塌	未倒塌	未倒塌	未倒塌

	拉结设计	未倒塌	未倒塌	未倒塌	未倒塌
2	常规设计	未倒塌	未倒塌	未倒塌	—
	拉结设计	未倒塌	未倒塌	未倒塌	—
3-4	常规设计	倒塌	未倒塌	未倒塌	—
	拉结设计	倒塌	未倒塌	未倒塌	—
5-8	常规设计	倒塌	倒塌	未倒塌	—
	拉结设计	倒塌	倒塌	未倒塌	—



(a)层5长边中柱拆除后结构发生倒塌破坏



(b)层3长边中柱拆除后结构未发生倒塌破坏

图3 结构在柱构件拆除后的典型倒塌和变形模式

从表1可以看出,层3以上角柱和层5以上长边中柱在拆除后结构发生倒塌,发生倒塌破坏的主要原因是冗余承载力不足,以及部分内力反向作用,如拆除角柱时跨中正弯矩变为负弯矩。其他相同位置处较低楼层的柱拆除后未发生倒塌,这是因为其上部结构超静定次数较大,更多的框架梁分担并承受原本由被拆除柱所承受的荷载,抵抗连续倒塌的能力增强。与此类似,底层内部柱上方的结构也具有较高超静定次数,拆除后也未发生倒塌。可见冗余度的增大可以改善结构的整体牢固性。

在算例中,各层短边中柱拆除后,均未发生倒塌。这是由于短边中柱的柱距较小,梁的刚度较大,地震作用效应也比较大,故配筋较多,所以相对不易发生倒塌破坏。因此,从本算例分析结果来看,按我国规范设计的钢筋混凝土框架结构具有一定的抗连续倒塌能力,其力学机理和实际利用需要进一步的研究。

5 采用拉结强度法进行设计

拉结强度法是一种简单的增强结构整体牢固性的

措施,一些国外规范均有较为详细的规定。拉结强度法通过规定构件的最小配筋率,保证构件在发生倒塌破坏时能提供一定的拉力,从而提高结构的整体牢固性。本节将主要参照 DoD2005 规范^[7]中提供的拉结强度法设计流程,在前述按我国规范设计的原始结构基础上进行拉结加强,然后再采用第4节拆除构件法进行分析,并与原始结构的拆除构件法分析结果进行比较。

5.1 设计方法

在 DoD2005 规范^[7]中,拉结分为内部拉结、周边拉结、对墙/柱的拉结以及竖向拉结,对于钢筋混凝土结构,各种类型的拉结设计要求均有详细规定。

5.1.1 内部拉结

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,拉结强度应取下列两者的较大值: $1.0F_t$;

$$\frac{1.0D+1.0L}{7.5} \frac{I_r}{5} F_t$$

其中: D 和 L 的取值同(1)式;

I_r 表示该拉结方向柱距的最大值/m; F_t 为基本拉结强度/kN,取 $(20+4n_0)$ 和 60 的较小值; n_0 表示建筑的层数。

5.1.2 周边拉结

在结构的每一层均须提供沿结构周边的有效拉结,拉结强度必须大于 $1.0F_t$ 。

5.1.3 对墙/柱的拉结

对于结构的外围柱或墙必须进行水平拉结使其嵌入结构整体,对于结构的角柱则须在两个方向均进行

拉结,拉结强度取下列两者的较大值: $2.0F_t$ 和 $\frac{I_s}{2.5} F_t$

的较小值;该墙/柱承受的荷载标准值的 3%。其中, I_s 表示层高/m,其他符号含义与前述相同。

5.1.4 竖向拉结

每一根柱/墙均必须从基础到结构顶部进行连续的拉结,拉结强度必须大于该柱/墙承受的最大楼层荷载标准值,并且柱的钢筋连接不应设置在与楼层交界处以及楼层柱的中点处。

在本文算例中,对于不满足拉结要求的部位,按照拉结要求重新配筋。由于本框架地震设防烈度较高,经计算分析,框架柱以及框架梁端区域的原有配筋均满足拉结要求,但框架梁跨中顶部的配筋不满足拉结要求。

5.2 破坏状况比较

按前述同样方法对拉结加强后的结构进行拆除构件分析,并将分析结果与拉结加强前原始结构的分析结果进行对比,如表1所示。由表可见对于本结构而言,采取拉结法并未显著改善结构的抗连续倒塌能力。原因可能是拉结强度法应用于我国结构设计的适用性

问题, 因为从 DoD2005 附录 B^[7]对拉结强度法的说明可以看到, 该方法源于英国规范, 其中的设计要求与结构的恒活载取值、跨度等因素有关, 适用于英国的典型结构以及与之类似的美国的建筑结构, 应用于我国的结构设计时需要进行改进。另外, 在 Abruzzo 等人的研究中, 也发现类似问题^[14], 即按拉结法设计的结构, 其抗连续倒塌仍然存在不足。

6 采用拆除构件法进行设计

6.1 设计方法

在拉结加强后结构的基础上, 采用拆除构件法对其进行设计, 使其满足抗连续倒塌的要求。对于本文简单规整的框架结构形式, 设计过程比较简单, 基本设计流程如下:

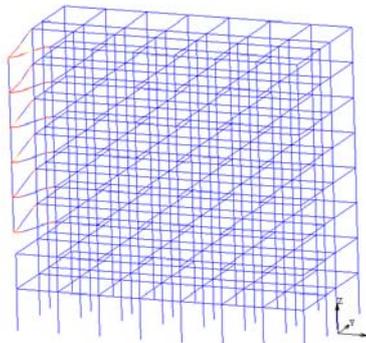
(1) 首先设计结构层 8: 1) 首先拆除短边中柱, 逐步增加该柱直接支承的梁的配筋, 使该柱拆除后, 上部结构不发生坍塌, 再根据结构对称性, 将该柱直接支承的梁的配筋结果应用于其他相似位置的梁; 2) 然后拆除长边中柱, 逐步增加该柱直接支承的梁的配筋, 使该柱拆除后, 上部结构不发生坍塌, 再根据结构对称性, 将该柱直接支承的梁的配筋结果应用于其他相似位置的梁; 3) 最后拆除角柱, 逐步增加该柱直接支承的梁的配筋, 使该柱拆除后, 上部结构不发生坍塌, 再根据结构对称性, 将该柱直接支承的梁的配筋结果应用于其他相似位置的梁。

(2) 按照层 8 中的方法依次设计结构层 7 到层 2。

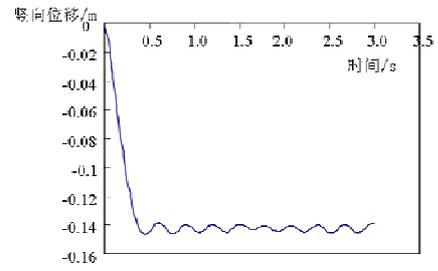
(3) 设计结构首层, 设计方法参照层 8, 另外还需对内部柱的拆除进行设计。

6.2 结果比较

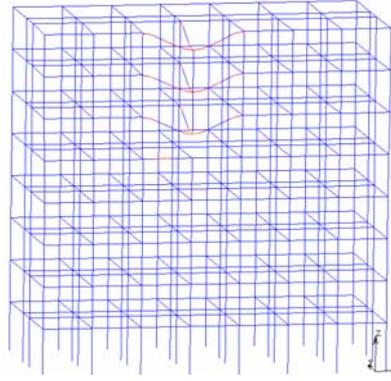
图 4 列出了采用拆除构件法重新设计后的结构在分别拆除相应典型柱后的倒塌验算结果, 其中图 6 中的 (b), (d) 分别列出了拆除柱相应支撑点的挠度时程曲线, 对比 4.2 节给出的破坏准则, 可以判定柱的拆除未引起结构的连续倒塌。这说明在相应柱拆除后, 经过拆除构件法重新设计的结构发挥了整体作用, 剩余结构承担了拆除柱原来承受的荷载, 起到了抵抗连续倒塌的作用。经过验算证明其他层均可满足倒塌验算, 限于篇幅, 相关图表未一一列出。



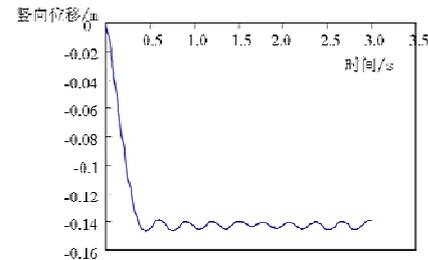
(a)层 3 角柱拆除后, 其支承的上部结构未发生倒塌



(b)层 3 角柱拆除后, 柱顶相应支承点的挠度时程曲线 (破坏挠度限值为 0.6m)



(c)层 6 长边中柱拆除后, 其支承的上部结构未发生倒塌



(d)层 6 长边中柱拆除后, 柱顶相应支承点的挠度时程曲线 (破坏挠度限值为 0.84m)

图 4 拆除构件法设计后八层框架的倒塌验算

7 几种设计方法配筋情况比较

表 2 为原始结构、拉结加强结构和满足抗倒塌要求结构的主梁纵筋用钢量比较。从理论上讲, 在下部支承结构发生破坏后, 上部结构应具有足够的跨越能力以避免连续性倒塌。

对比原始结构配筋可以发现, 拉结加强结构框架柱的配筋量没有发生变化, 框架梁的配筋略有增加, 且各层配筋增加比例差不多, 只是层 8 梁的配筋有一定的增加。拉结加强结构的配筋和满足抗倒塌要求结构比, 钢筋增加的位置相同, 都是层 7 和层 8 的钢筋量增加较多, 这说明拉结强度法有一定的合理性。但是拉结加强结构的钢筋增加量少于满足抗倒塌要求的结构, 如 5.2 节所述, 造成这种结果的原因可能是拉结强度法应用于我国结构设计的适用性问题, 也有可能是其本身存在不足。

对于满足抗倒塌要求的结构, 框架柱的配筋量也没有发生变化, 层 1 到层 6 的梁配筋均没有变化。只有层 7 和层 8 边梁的配筋量有所增加 (表 2)。这说明, 对于结构来说, 顶部结构的强度对框架结构抗倒塌能力的贡献较大, 其原因有以下两点: 1) 屋面荷载远大

于楼面荷载, 顶部梁配筋过少, 跨越能力不足; 2) 上部梁的桥接跨越作用对改善整体结构抗连续倒塌能力有重要贡献。需要强调的是, 在增加了框架梁配筋后, 仍要进行相应的抗震验算以保证能够满足地震时“强柱弱梁”屈服机制的要求。

表 2 框架梁主纵筋用量比较/t

楼层	原始结构	拉结设计	拆除构件设计
1	5.43	5.57 (2.5%)	5.57 (2.5%)
2	5.36	5.50 (2.6%)	5.50 (2.6%)
3	4.87	5.00 (2.8%)	5.00 (2.8%)
4	4.26	4.39 (3.2%)	4.39 (3.2%)
5	3.64	3.78 (3.8%)	3.78 (3.8%)
6	2.91	3.04 (4.8%)	3.04 (4.8%)
7	2.33	2.48 (6.4%)	2.75 (17.8%)
8	2.00	2.24 (12.1%)	2.64 (31.9%)
总计	30.8	32.00 (4.0%)	32.67 (6.1%)

注: 表中括号内的数字表示在原始结构基础上配筋量增加百分比。

8 结论

(1) 完全按照我国现行规范进行所设计的钢筋混凝土八层框架结构, 不满足抗连续倒塌的要求。

(2) 相同位置的柱(比如角柱、长边中柱)发生破坏时, 所在楼层越高越容易发生倒塌, 楼层越低结构表现出的抗倒塌能力越好。

(3) 在按照我国现行规范设计的基础上, 参照美国国防部 DoD2005 对结构进行拉结加强设计后, 没有明显改善结构的抗连续倒塌能力。

(4) 对于文中按照八度抗震设防烈度设计的八层框架结构, 按结构满足抗连续倒塌要求进行设计后发现, 柱的钢筋配筋量没有变化, 只有顶部的层 7 和层 8 楼层框架梁的配筋量显著增加, 框架梁主筋总用量比原始结构增加 6.1%, 工程造价上是可行的。

(5) 提高结构抗连续倒塌的能力的实质在于提高结构的冗余承载力, 增加备用荷载传递路径的能力, 使结构在发生局部构件破坏时剩余结构有足够的抵抗抗连续倒塌。通过文中算例说明, 通过基于拆除构件法的非线性动力分析进行抗连续倒塌设计, 可以合理的提高结构的冗余承载力, 使结构具备抗连续倒塌的能力。但该方法需要借助复杂的非线性动力分析, 有关简化实用的方法有待进一步研究。

参考文献

[1] ELLINGWOOD B R. Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2006, 20(4): 315-323.

[2] 叶列平, 陆新征, 李易, 梁益, 马一飞. 混凝土框架结构的抗连续性倒塌设计方法研究[J]. 建筑结构

[3] GB50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

[4] BS8110-1 Structural Use of Concrete: Part 1: Code of Practice for Design and Construction[S]. 1997.

[5] EN 1991-1—7. Eurocode 1-Actions on Structures, Part 1-7: General Actions - Accidental Actions[S]. 2006

[6] GSA2003 Progressive Collapse Analysis and design guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Project [S]. 2003.

[7] DoD2005 (UFC4-023—03) Design of Structures to Resist Progressive Collapse[S]. 2005.

[8] 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, 2007, 24(2): 1-6.

[9] 陆新征, 缪志伟, 江见鲸, 等. 静力和动力荷载作用下混凝土高层结构的倒塌模拟[J]. 山西地震, 2006, 126(2): 7-11.

[10] 陆新征. 倒塌分析中框架及土体模型研究[J]. 计算机辅助工程, 2006, 15(Sup): 417-420.

[11] 易伟建, 何庆峰, 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.

[12] GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

[13] 叶列平, 赵作周. 混凝土结构(下册)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[14] ABRUZZO J, MATTA A, PANARIELLO G. 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.