

高温剥落对混凝土框架抗连续倒塌性能的影响¹

李 易¹, 陆新征¹, 叶列平¹, 陈适才²

(1. 清华大学土木工程系, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084;

2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京, 100022)

摘 要: 为了认识混凝土高温剥落对混凝土框架结构抗倒塌性能的影响程度, 在整体结构火灾倒塌数值分析模型中引入了文献建议的混凝土剥落简化计算模型, 对一栋八层框架结构的火灾倒塌过程进行了模拟。结果表明, 当受火区域面积不大时, 混凝土剥落对整体结构体系的抗连续倒塌能力影响有限。基于这些结论, 对火灾下的整体结构倒塌模拟提出了建议。

关键词: 混凝土框架结构, 高温剥落, 火灾倒塌

EFFECT OF SPALLING ON THE PROGRESSIVE COLLAPSE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES

LI Yi¹, LU Xinzhen¹, YE Lieping¹, Chen Shicai²

(1. Key Laboratory of Safety and Durability for Civil Engineering of Ministry of Education, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing

100084; 2. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: In order to understand the effect of spalling on the progressive collapse resistance of reinforced concrete frame structures, an existing simplified spalling model is employed in the numerical model for collapse analysis of whole structures in fire. And then the collapse process of an 8-storey frame structure is simulated. The result indicates that the influence of spalling is unremarkable on collapse resistance of the whole structure when fire area is small. Base on the conclusion, some advices for the simulation of whole structure in fire are proposed.

Keywords: concrete frame structure, spalling, fire-induced collapse

¹基金项目: 国家科技支撑计划项目(2006BAJ06B06, 2006BAJ03A02-01)“城市与工程安全减灾教育部重点实验室开放基金项目、北京市重点实验室开放基金项目”(编号: EESR2010-03), 长江学者和创新团队发展计划资助

1 概述

剥落是混凝土材料在高温作用下表现出的重要特性。混凝土的高温剥落有两种形式, 一种形式是爆裂剥落, 另一种形式是退化剥落^[1]。爆裂剥落发生在受火初期, 现有两种理论进行描述: ①混凝土内的水份受热气化导致孔隙压力超过混凝土抗拉强度而发生的脆性破坏; ②构件表面的高温混凝土的热膨胀受到约束而产生的受压破坏^{[2][3]}。退化剥落发生在受火后期, 是由于混凝土达到较高温度后的材料强度和粘结强度降低所导致的^[1]。剥落会导致构件截面的削弱以及钢筋保护层的丧失, 加速钢筋和内部混凝土的升温速度, 最终导致构件承载力和抗火时间的降低^[4]。

混凝土高温剥落的准确机理目前还没有得到完全的认识, 仍处于研究阶段^[1]。通常认为, 混凝土的剥落至少跟以下因素有关: 混凝土的湿度、空隙率、渗透性、应力状态、骨料类型、抗拉强度、升温速度、钢筋构造措施和构件尺寸^[1]。2004年 Kodur 提出了一个考虑混凝土高温剥落的简化方法, 并在构件的抗火性能分析中进行了应用^[5]。随后 2009年 Kodur 又提出了一个精确分析方法, 通过求解空隙内水蒸气压应力, 并与混凝土抗拉强度比较来判定混凝土的剥落^[3], 这种方法需要借助有限差分法在时间和空间上求解, 此外, 该方法仅能解决楼板和墙这类的一维传热问题, 其他学者也提出较为精细的计算方法^[6], 但是由于这些模型太过复杂且具有各自的局限性, 因此在结构整体的抗火性能研究中尚难以应用。

由于混凝土高温爆裂剥落理论研究的滞后, 目前的研究还主要集中在材料层次, 而在高温剥落对构件和结构的抗火性能的研究较少, Huang 采用预设剥落时间和深度的方法, 估计了剥落对高强混凝土柱抗火性能的影响^[7]。为了对混凝土高温剥落在下整体结构抗火灾倒塌性能中的影响程度进行了解, 本文采用 Kodur 提出的简化分析方法, 对框架结构的抗火灾倒塌性能进行了模拟和对比, 并对火灾下混凝土框架结构的倒塌模拟提出了建议。

2 混凝土框架结构倒塌分析模型简介

混凝土框架整体结构的火灾倒塌分析需要采用高效的分析单元, 陈适才采用纤维梁单元准确、高效的模拟了混凝土梁/柱构件在火灾下的反应^[8]。本文基于纤维梁的基本原理建立了混凝土框架结

构火灾倒塌分析的数值模型 THUFIBER-T。应用该模型对钢筋混凝土轴压长柱试验^[10]进行了模拟, 获得了较好的计算结果, 如图 1 所示。

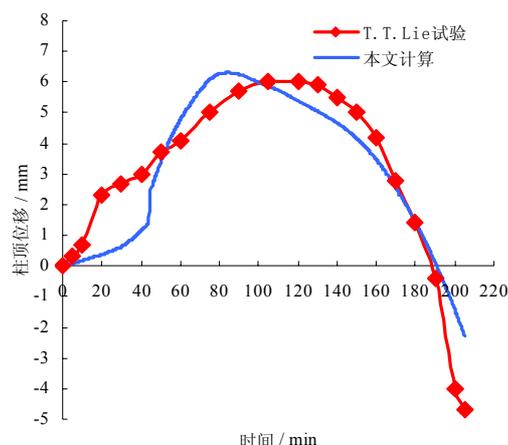


图 1 钢筋混凝土轴压柱模拟

Fig.1 Simulation of axial compressed RC column

传统的纤维梁模型可以很好的模拟大变形状态下的钢筋混凝土梁柱构件的力学行为, 但是不能处理结构倒塌过程中的破坏与断裂这类不连续位移场问题。为此, 在 THUFIBER-T 中引入“生死”单元技术来处理这类问题, 使得结构的破坏过程更加符合实际情况。在分析模型中设定了构件破坏失效准则, 当梁柱构件截面达到破坏失效准则时, 构件截面所在单元被删除, 单元内力被释放。钢筋和混凝土在高温下的极限应变按照文献^[9]的试验拟合公式进行取值。

3 混凝土高温剥落简化模型^[8]

本文采用 Kodur 提出的简化模型来考虑混凝土高温剥落的影响。Kodur 模型是根据高强混凝土试验现象提出的, 模型中假设条件如下:

- ① 混凝土达到 350℃ 后将会剥落;
- ② 箍筋采用 90 度弯钩时, 不能有效约束混凝土的高温爆裂, 核心区混凝土发生剥落; 箍筋采用 135 度弯钩时, 可以有效约束混凝土的高温爆裂, 仅混凝土保护层发生剥落, 如图 2 所示;

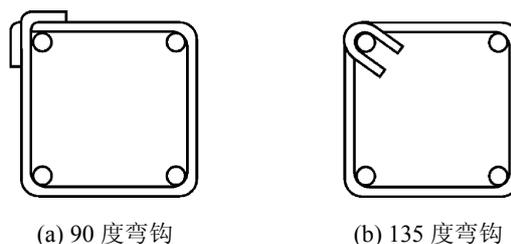


图 2 箍筋形式

Fig.2 Tie configuration

4 高温剥落对混凝土框架结构的影响

采用纤维梁模型建立了一栋典型的八层框架的火灾倒塌情况进行了模拟与分析, 其结构的平面布置情况和相关构件的编号如图 3 所示, 详细的模型信息见文献^[1]。火灾地点设定发生在第 5 层的角部的①、②两个开间 (如图 3 所示), 假设有防火分区, 火灾不发生蔓延。

分别建立以下三个对比分析模型:

模型 A: 不考虑剥落;

模型 B: 考虑剥落但不考虑箍筋有效约束;

模型 C: 考虑剥落和箍筋有效约束

图 4 和图 5 分别给出了模型 A 和模型 B 的破坏过程。可以看到, 破坏过程基本相同。柱的破坏次序都是轴力最大的 C7 柱先破坏, 然后内力重分布导致 C3 柱破坏, 造成开间①的倒塌而最终引起连续倒塌的发生。

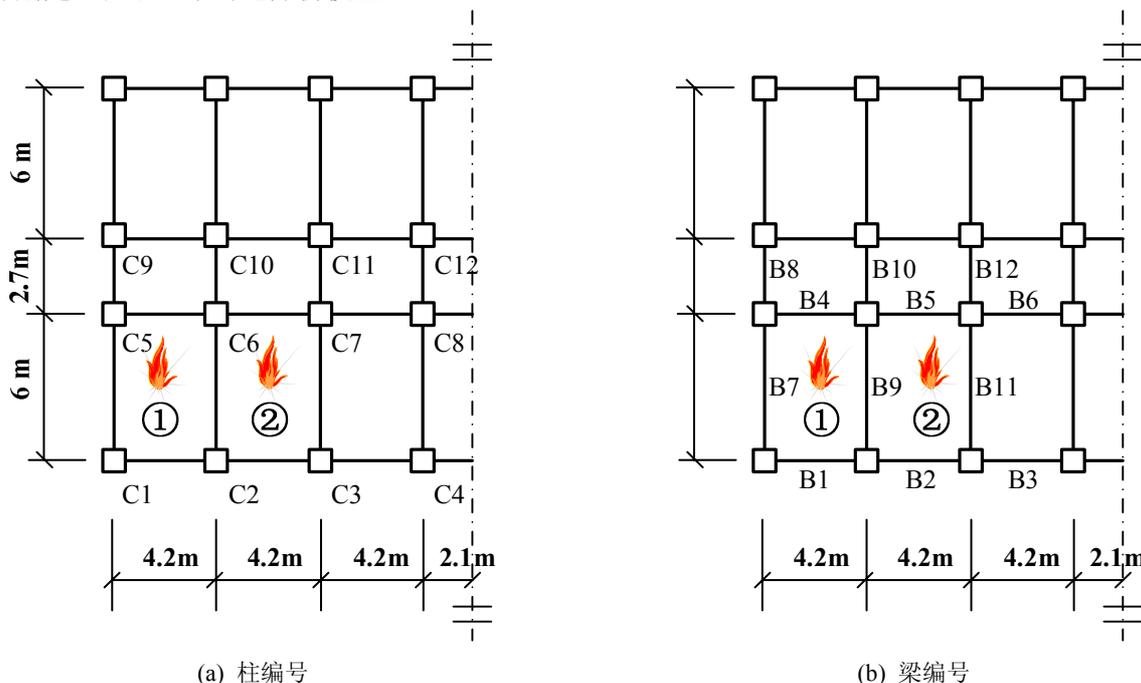
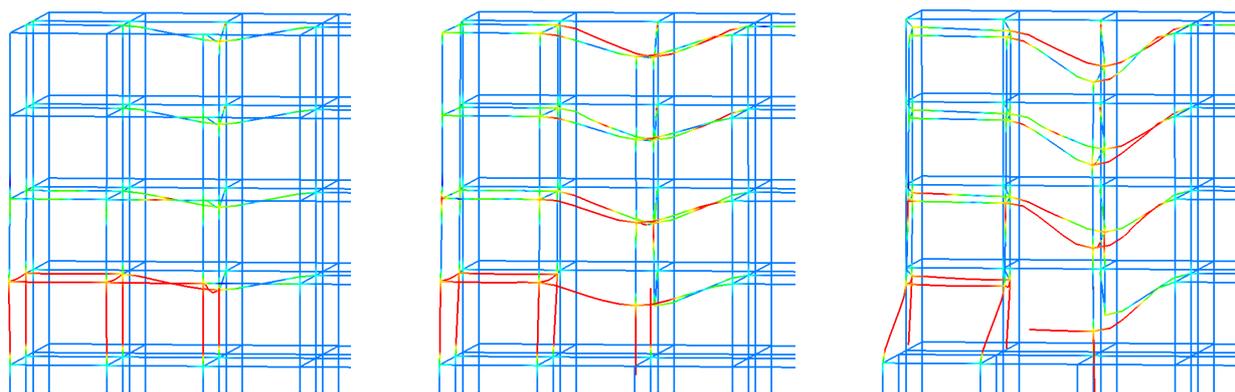


图 3 八层框架平面布置

Fig.3 Plan view of 8-storey frame



(a) C7 柱破坏 (155min)

(b) B5 梁、B11 梁、C3 柱破坏 (155min)

(c) B2 梁、C5 和 C6 柱破坏 (155min)

图 4 不考虑剥落的结构倒塌过程 (模型 A, 变形显示比例 1:1)

Fig.4 Collapse process of frame without spalling (Model A, Displacement display scale 1:1)

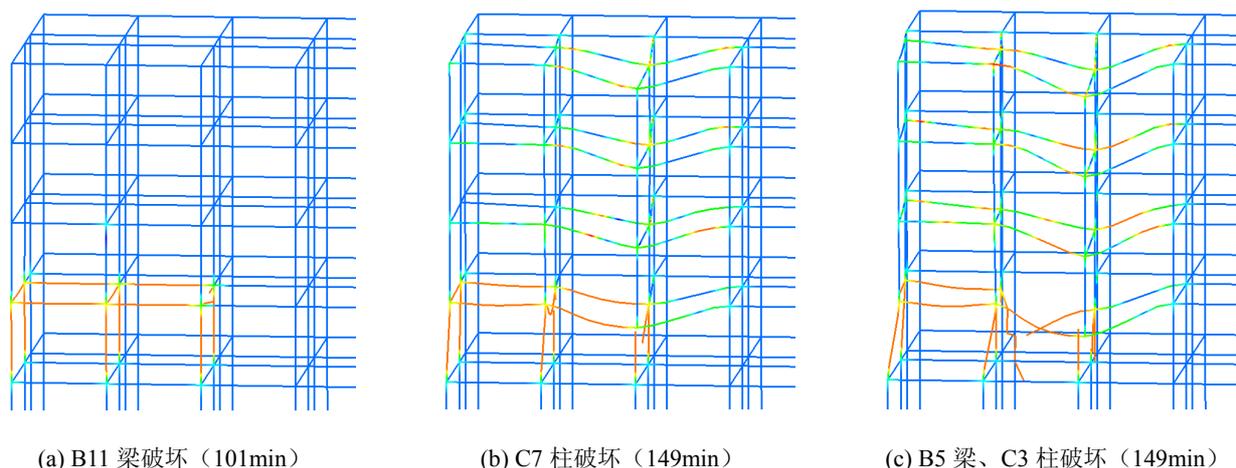


图 5 考虑剥落的结构倒塌过程 (模型 B, 变形显示比例 1:1)

Fig.5 Collapse process of frame with spalling (Model B, Displacement display scale 1:1)

模型 A 和模型 B 的区别是: B11 梁先于柱 C7 发生破坏, 这是因为考虑剥落的情况下, 梁构件尺寸小于柱构件, 因此梁的温度上升较快, 产生较严重的剥落, 因此部分梁先于柱发生破坏。但是倒塌最终是由柱的破坏决定, 因此梁的破坏对倒塌时间的影响不大。

模型 C 获得的结果类似于模型 A, 这是因为仅混凝土保护层发生剥落, 而混凝土保护层对构件承载力影响很小。

图 6 给出了最先发生破坏的框架柱 C7 的轴力变化情况。可以看到, 火灾刚发生时, 三个模型中 C7 柱的轴力相同, 随着火灾的进行, 模型 B 由于剥落的发生, 承载力降低, 但是结构的内力重分布分担了 C7 柱的部分荷载, 避免了 C7 柱的提前破坏。模型 C 的轴力情况和模型 A 接近, 也是由于保护层承载力贡献较小的原因。

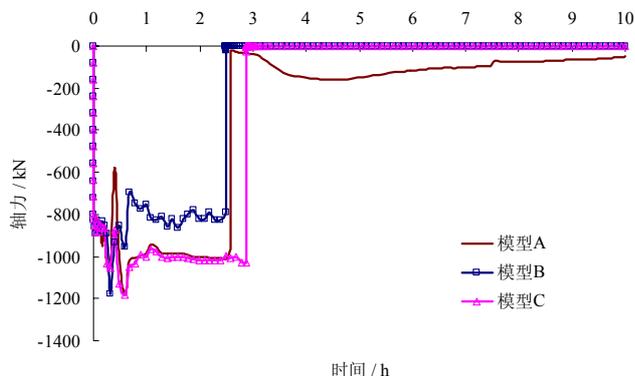


图 6 柱 C7 的轴力

Fig.6 Axial force of column C7

抗连续倒塌承载力是由受火区域的结构和未受火的剩余结构共同提供的。对于这种两开间的小范围火灾的情况, 剩余结构的承载力贡献占支配地

位, 因此结构的抗倒塌承载力对剥落并不敏感, 三个模型的倒塌时间非常接近 (如图 6)。

5 结论

本文通过一栋八层混凝土框架结构的连续倒塌过程模拟表明, 在小范围的火灾的情况下, 混凝土的高温剥落对结构系统的抗连续倒塌承载力影响较小。

连续倒塌问题主要研究的是局部小范围的初始破坏引发结构系统内大范围或不成比例的破坏。因此火灾引起的连续倒塌问题中火灾的作用范围相对较小, 研究中可以忽略高温剥落的影响。而对于大范围火灾作用的情况, 这种破坏模式属于整体性破坏, 受火区域的结构承载力对整体结构的抗倒塌能力影响较大, 剥落的影响则需要进一步研究。

参考文献

- [1] John A, Purkiss. Fire safety engineering design of structures(Second Edition)[M]. Elsevier Ltd. 2007.
- [2] Y. Msaad. Comparison between Hydraulic and Thermal Spalling in Heated Concrete Based on Numerical Modeling[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE. 2007. 133(6): 608-615
- [3] M.B. Dwaikat, V.K.R.Kodur Hydrothermal model for predicting fire-induced spalling in concrete structural systems[J]. Fire Safety Journal. 2009. 44(3): 425-434
- [4] V.K.R.Kodur, Spalling in high strength concrete exposed to fire-concerns, causes, critical parameters and cures[C], ASCE Structures Congress Proceedings, Philadelphia, USA, 2000, 1-8.
- [5] V.K.R.Kodur, T.Wang, F.Cheng, Predicting the fire

- resistance behavior of high strength concrete columns[J], *Cement & Concrete Composites*, 2004, 26(2): 141-153.
- [6] D. Gawin, F. Pesavento, B.A. Schrefler. Towards prediction of the thermal spalling risk through a multi-phase porous media model of concrete[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, 195(41-43): 5707-5729.
- [7] Z.H.Huang, I.W.Burgess, R.J.Plank. Three-Dimensional Analysis of Reinforced Concrete Beam-Column Structures in Fire[J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2009, 135(10): 1201-1212
- [8] 陈适才, 陆新征, 任爱珠, 江见鲸. 火灾下混凝土结构破坏模拟的纤维梁单元模型[J]. *计算力学学报*, 2009, 26(1): 72-79.
- Chen Shicai, Lu Xinzhen, Ren Aizhu, Jiang Jianjing. Fiber beam element model for the collapse simulation of concrete structures under fire[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, 26(1): 72-79.
- [9] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- Guo zhenhai, Shi Xudong. Behaviour of reinforced concrete at elevated temperature and its calculation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003
- [10] T.T.Lie, J.L.Woollerton. Fire resistance of reinforced concrete columns: test results[R]. Internal Report No.569. National Research Council Canada. 1988
- [11] 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.
- Lu Xinzhen, Li Yi, Ye Lieping, Ma Yifei, Liang Yi. Study on design method to resist progressive collapse for reinforced concrete frames[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(Sup.2): 150-157.