

火灾下工程结构连续性倒塌分析与设计方法探讨*

李耀庄, 苏玲红, 吴小华

(中南大学 防灾科学与技术研究所, 湖南 长沙 410075)

摘要: 给出了火灾下工程结构连续性倒塌的定义, 分析了工程结构在火灾作用下的特点, 并给出了火灾连续性倒塌判断流程。在介绍目前常用的工程结构抗连续性倒塌分析设计方法的基础上, 提出了采用替代路径法中的非线性静力分析方法对建筑结构进行火灾作用下抗连续性倒塌设计的思路。

关键词: 火灾作用; 连续性倒塌; 替代路径法; 非线性静力分析

中图分类号: TU312+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2010)01-0089-04

0 引言

火灾给人类的生命财产造成极大的损失, 火灾造成的经济损失仅次于干旱和洪涝, 而发生的频率则位居各种灾种之首^[1]。火灾损失统计表明, 发生次数最多、损失最严重的是建筑火灾^[2]。近年来, 随着高层建筑不断涌现, 房屋密度加大, 大量新型材料广泛应用于建筑业以及燃气、电器的普遍使用, 大大增加了建筑物发生火灾的可能性。人们把目光越来越多地投向了火灾下结构的力学反应。

1968年, 在英国伦敦, 由于局部破坏导致一种链式反应的罗兰点单元建筑倒塌, 引起了对建筑结构连续性倒塌破坏的广泛关注^[3]。2001年“9·11事件”中纽约世贸中心两座110层411 m高的钢结构大楼因飞机撞击后发生火灾而倒塌, 造成2 830人死亡。近年来, 国内也多次发生建筑结构在火灾作用下倒塌的恶性事件, 包括湖南衡阳“11·3”特大火灾造成20名消防官兵的牺牲等。建筑结构在火灾作用下的抗连续性倒塌越来越受到工程界的关注, 并成为研究热点。

1 连续性倒塌的定义和机理

关于连续性倒塌(progressive collapse), 美国土木工程协会在ASCE7-05中定义为: 在正常使用

条件下, 由于突发事件结构发生局部破坏, 这种破坏从结构初始破坏位置沿构件进行传递, 最终导致整个建筑物倒塌或者造成与初始破坏部分不成比例的倒塌。英国设计规范提供的定义为: 在突发事件中, 结构局部破坏导致相邻构件的失效, 这种失效因发生连锁反应而持续下去, 最后导致整个结构的倒塌或者造成与初始破坏原因不成比例的局部倒塌^[4-5]。

根据上述分析, 火灾连续性倒塌可以定义为: 在局部或全面火灾作用下, 在高温和荷载的共同作用下, 结构发生局部承载力不足而破坏, 这种破坏从结构初始破坏位置沿构件进行传递, 最终导致整个建筑物倒塌或造成与初始破坏部分不成比例的倒塌。

现有研究表明, 工程结构在高温下和常温下的力学性能差别很大。受到材料热传导的影响, 结构构件受火后表面温度的增长速度远远大于构件内部的温度增长速度, 从而在构件内部形成不均匀温度场, 且温度场随燃烧过程逐渐发生变化。材料的强度和弹性模量随着温度的变化而锐减, 变形随温度的升高迅速增长, 严重影响高温下结构的承载能力和耐火极限。当构件的承载能力下降到不能抵抗荷载作用时就会发生破坏, 原来作用于构件上的荷载会在周围其它结构上进行荷载重分布, 直到找到新的平衡状态为止。若此时火灾还没有结束, 又会对新的平衡状态产生影响, 导致新一轮的构件破坏和荷载重分布。直到火灾

* 收稿日期: 2009-07-05

基金项目: 湖南省科技计划重点项目(06FJ2002)

作者简介: 李耀庄(1970-), 男, 湖南双峰人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构抗火、抗震教学和科研工作。

E-mail: liyz@mail.csu.edu.cn

结束, 剩余结构达到最终平衡。根据火灾作用的特点, 判断火灾下工程结构连续性倒塌流程如图 1 所示。

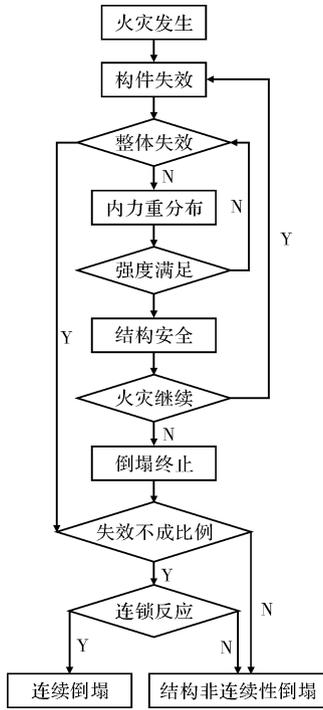


图 1 火灾下工程结构连续性倒塌判断框图

2 火灾对工程结构破坏作用的特点

目前关于工程结构抗连续性倒塌的研究主要集中在地震、爆炸、撞击等偶然事件, 针对火灾偶然事件的研究基本上是一个空白。尽管在地震或爆炸下的结构抗连续性倒塌的研究对火灾作用下的结构抗连续性倒塌具有一定的借鉴意义, 但是火灾对结构的破坏作用毕竟具有其特殊性。主要表现在:

(1) 火灾对工程结构的破坏作用具有渐进性和逐步累积性。地震、爆炸和撞击作用于结构具有瞬时性, 一般必须考虑结构的动力作用; 而火灾作用于结构具有持续性, 一般可以不考虑其动力作用, 它对结构的破坏是逐步累积的。当某构件在火灾作用下失效, 剩余结构不仅需对原来作用于结构上的荷载重分布, 同时还会继续受到火灾的作用(在火灾结束前)。

(2) 火灾对工程结构的破坏作用具有局部性。火灾一般发生在建筑物的局部范围, 这点与爆炸和撞击具有一定程度的相似, 和地震作用则截然不同, 地震作用显然是作用在整个结构上的。

(3) 火灾对工程结构的破坏作用具有不均匀

性。火灾产生的高温在结构的不同位置存在较大的差异。由于混凝土材料的热惰性, 结构受火后表面温度迅速升高, 而截面内部温度增长缓慢, 形成极不均匀的温度场, 表层温度变化梯度很大。在结构构件的内部对材料的劣化也存在很大的差异。

(4) 火灾对工程结构的破坏作用具有多因素耦合性。分析常温结构时, 一般只需要知道材料的应力-应变关系。但是高温结构的温度值和高温持续时间对材料强度和变形影响很大, 不同的升温加载途径又存在较大的差异, 构成了应力-应变-温度-时间四者的耦合效应, 因此必须研究耦合高温-力学本构关系。

由于火灾对建筑结构的破坏作用的特殊性, 与地震、爆炸和撞击等偶然因素作用下结构的力学性能存在较大的差异。因此, 分析火灾作用下工程结构的连续性倒塌是十分必要的。钢筋混凝土框架结构为超静定结构, 高温构件温度变形受到支座和节点的约束, 以及非高温相邻构件的约束, 在火灾作用下将存在剧烈的内力重分布和应力重分布现象; 随着温度变化和持续时间的增加, 将形成一个连续的内力和应力重分布过程。最终将出现与常温完全不同的破坏机构和破坏形态^[6]。

3 火灾下工程结构抗连续性倒塌的设计方法

1977年, Leyendecker 和 Ellingwood 将结构抵抗连续性倒塌的设计方法归为 3 类, 即事件控制、间接设计和直接设计^[7]。事件控制要求突发事件在发生前即予以阻止, 或通过设置隔离在建筑之外, 是结构设计以外的一类措施^[8]。间接设计是指不直接体现突发事件的具体影响, 而采用拉接力进行结构设计, 以提高结构的最低强度、冗余特性和延性能力。直接设计又分为备用荷载路径分析和特殊抗力设计, 前者通过假定主要承重构件的初始失效来研究或评价结构的冗余性能及抵抗连续性倒塌的能力, 或者则是对主要承重构件进行设计, 避免在突发事件下发生局部破坏^[9]。

目前对工程结构抗火设计研究较多, 它是避免结构在火灾中发生破坏或倒塌的前提和保证。主要体现在 4 个方面: ①对建筑火灾的发生和发展过程进行研究, 得到建筑空间的温度场分布和烟气的蔓延规律; ②是对结构材料的高温性能进行研究; ③对建筑构件内部的温度场进行分析;

④结构构件的高温承载力进行分析和研究。随着研究的深入, 展开了对整体结构在火灾下行为的研究及结构的连续性倒塌研究。本文主要对拉杆法和替代路径法进行分析。

3.1 拉杆法

设置拉杆法就是在设计中为钢筋混凝土结构设置拉杆, 提供荷载传递的路径。这些拉杆通过机械方式将建筑物连接在一起, 增强结构的连续性和延性。研究表明, 结构的平面和竖向布置拉结体系可有效防止建筑物发生连续性倒塌, 利用拉索的悬链线作用可有效地防止楼板发生坍塌。拉杆按方向分为水平拉杆和竖向拉杆; 按位置分为内拉杆、周边拉杆及连接于边柱、角柱和墙的拉杆^[3](图2)。在对各种拉杆进行设计时必须考虑火灾对钢筋的力学性能的劣化作用。

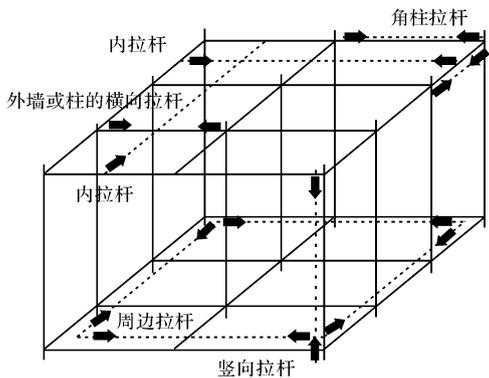


图2 钢筋混凝土框架结构抗连续性倒塌拉杆设置

3.2 替代路径法

替代荷载传递路径就是要使结构丧失某些构件后具有向其他结构构件或组成部分转移荷载的能力^[3](图3)。中心思想就是将失效构件从结构中移除后, 分析剩余结构的承载能力。荷载替代路径法包括线性静力分析、非线性静力分析和非线性动力分析3种分析方法。

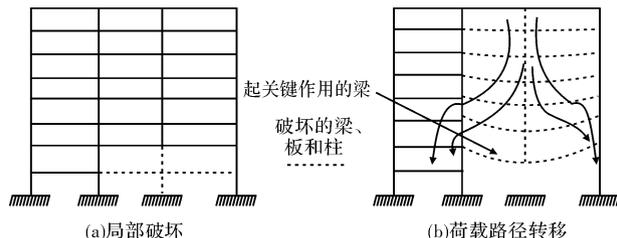


图3 结构破坏后的荷载路径转移

线性静力法以小变形理论为基础, 除在结构部分位置嵌入塑性铰外, 将材料视为线弹性。全部荷载一次施加到结构上, 此时移除竖向承重构件。在计算中考虑二阶效应和 $P-\Delta$ 效应。由于分

析过程中仅在超过极限承载力的位置加入塑性铰, 其余部分均按线弹性考虑, 分析方法相对简单, 但是与实际结构构件的受力情况存在较大差异。非线性静力分析法考虑结构材料和几何的非线性, 在移除竖向承重构件后, 荷载按多级(一般分为10级)逐渐施加到结构上, 计算得到的构件拉力和变形与可接受的准则进行对比, 直到加载到规定数值。如果此时所有构件和连接没有超过可接受准则, 则结构具有适当的抗连续倒塌能力。非线性动力分析法考虑材料和几何非线性, 从满载的结构上瞬时移除竖向承重构件, 分析产生的运动。

由于钢筋混凝土是由两种力学性能差别较大的材料组成, 受力极为复杂, 在正常使用阶段, 大部分钢筋混凝土拉、弯构件的受拉区已存在裂缝而进入非弹性状态, 又钢筋与混凝土之间的粘结遭到破坏时两者间出现滑移并使结构或构件变形过大, 这时用线弹性方法分析结构的内力和变形就不能反映结构的实际工作状态^[10]。火灾作用于结构上, 是通过改变构件截面温度从而影响结构材料性能, 并进而降低构件承载力的。跟爆炸、撞击等偶然荷载不同, 火灾作用不是瞬时的冲击荷载, 而是随时间的变化而变化的缓慢过程, 分析时可以不考虑其动力效应。因此分析工程结构火灾作用下抗连续性倒塌采用非线性静力分析方法比较好。

分析工程结构火灾作用下抗连续性倒塌时应结合火灾作用的特点, 不仅要考虑材料的非线性、几何的非线性, 还应考虑火灾作用下的时间-温度效应。可以将火灾作用持续时间分成许多离散的时间段, 假设每个时间段内构件截面温度分布不变, 从0时间段开始逐个时间段向后分析, 直至火灾结束。同时从火灾对结构作用的特点来看, 火灾发生时, 结构竖向承重构件仍然处在正常工作状态下, 随着火灾的发展, 水平构件和竖向承重构件承载能力逐步降低, 至最终超过可接受准则被移除, 这与火灾持续的时间及释放的能量等因素有关。因此分析时一次移除竖向承重构件并不合理, 对于竖向承重构件的移除相对更加复杂, 目前我们正对此展开深入的研究。

4 结语

本文在目前国外关于连续性倒塌定义的基础上, 给出了火灾下连续性倒塌的定义和判断流程。又通过对比火灾作用和其它偶然事件对结构影响

的区别,得出火灾对结构的破坏作用具有渐进性和逐步累积性、局部性、不均匀性、多因素耦合性的特点。分析了目前常用的工程结构抗连续性倒塌设计方法,指出针对火灾作用进行分析时不仅要考虑材料的非线性、几何的非线性,还应该考虑火灾作用的时间温度效应。提出采用非线性静力分析方法分析结构在火灾下的抗连续性倒塌比较符合实际,为以后火灾下结构的抗连续性倒塌研究指明方向。

参考文献:

- [1] 霍然,胡源,李元洲. 建筑火灾安全工程导论[M]. 合肥:中国科技大学出版社,1999:1-5.
- [2] 路春森,屈立军,薛武平,等. 建筑结构耐火设计[M]. 北京:中国建材工业出版社,1995:1-4.
- [3] 贡金鑫,魏巍巍,胡家顺. 中美欧混凝土结构设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007:684-708.
- [4] Dusenberry D O. Review of existing guidelines and provisions related to progressive collapse [R]. Washington: National Workshop on Prevention of Progressive Collapse in Rosemont, II1, 2002.
- [5] 贾金刚,徐迎,石磊,等. 关于连续性倒塌定义的探讨[J]. 爆破,2008,25(1):22-24.
- [6] 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,2003:2-4.
- [7] Leyendecker E V, Ellingwood B R. Design methods for reducing the risk of progressive collapse in buildings [R]. Washington D C: National Bureau of Standards. 1977.
- [8] 田志敏,张想柏,杜修力. 防恐怖爆炸重要建筑物的概念设计[J]. 土木工程学报,2007,40(1):34-41.
- [9] 江晓锋,陈以一. 建筑结构连续性倒塌及其控制设计的研究现状[J]. 土木工程学报,2008,41(6):1-8.
- [10] 梁兴文,叶艳霞. 混凝土结构非线性分析[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007:9-10.

Discussion on Analysis and Design Methods of Preventing Structural Progressive Collapse in Case of Fire

Li Yaozhuang, Su Linghong and Wu Xiaohua

(*Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China*)

Abstract: The definition of the structural progressive collapse in case of fire is presented. The structural characteristics in case of fire are analyzed and the judgment process of structural progressive collapse is given. On the basis of introduction of commonly used analysis and design methods of structural progressive collapse, a design idea for preventing structural progressive collapse in case of fire is put forward by means of nonlinear static analysis in alternative path method.

Key words: effects of fire; structural progressive collapse; alternative path method nonlinear static analysis