

火灾引起的建筑物坍塌概率估算

孙金华, 孙占辉, 陆守香, 范维澄

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

[摘要] 为了研究不同防灭火安全措施下火灾引起的建筑结构整体坍塌的概率, 对典型建筑物的火灾荷载进行了统计分析。利用建筑物火灾的规律及概率与统计理论, 给出了典型建筑物的火灾荷载及火灾持续时间的概率分布函数。分析了由火灾引起建筑物坍塌的影响因素, 并根据火灾统计结果, 得到了写字楼在极端情况下由火灾引起的楼房坍塌概率与其耐火极限时间的关系, 导出了一般建筑由于火灾引起的坍塌概率的简单估算方法。

[关键词] 建筑物; 火灾; 火灾荷载; 坍塌概率

[中图分类号] TK477 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)11-0051-05

建筑灾害主要有五大类, 即地震、火灾、水灾、风灾及战争灾害。在这五大灾害中又以火灾和地震灾害带来的损失为最大。地震灾害所造成的损失虽然大, 但其发生的概率很低。火灾虽然属于点现象, 但由于发生的概率大、频度高, 累计损失却相当可观。仅2001年我国发生各类建筑火灾215 863次, 死亡2 314人, 伤3 752人, 直接财产损失13.9亿元^[1]。特别是当今社会, 公共娱乐场所、大型和超大型建筑的大量建设, 一次火灾死亡几十人到上百人的特大伤亡事故屡见不鲜。火灾不仅会造成巨大的财产损失和大量的人员伤亡, 有时还会造成整个建筑物的整体坍塌, 使灾害进一步扩大。由于当今城市的地价非常昂贵, 建筑物由传统的低层或多层建筑向中高层或超高的大型建筑转变, 建筑材料也由传统的砖瓦向钢材转变。钢材不仅具有良好的力学性能和可加工性, 而且在建筑行业具有安全、环保(不易着火、低污染、低能耗、重复利用)、经济(结构及基础造价低、施工工期短)等特点, 钢结构建筑已逐步显示出优势。我国的建筑用材方针也已从节约用钢转为鼓励用钢^[2]。

钢以及混凝土受热后力学性能下降是它们的共同弱点, 特别是钢材受热后力学性能下降尤为明

显^[3-6]。虽然钢材为非燃烧材料, 但如果由于火灾发生时的长时间烧烤, 当温度达到400℃时, 钢材的屈服强度将下降到常温下的一半。当温度达到600℃时, 钢材基本失去其强度和刚度。所以当火灾的持续时间超过建筑物的最大耐火时间时, 极有可能造成该建筑物的整体坍塌。“9.11”世贸大厦的整体坍塌就是最典型事例, 它不仅造成了巨额财产损失, 还造成数以千计的人失去了宝贵的生命。在我国由于火灾造成的建筑物特别是钢架结构建筑物坍塌的事例也很多。例如1986年2月8日发生于唐山棉纺厂的火灾造成了钢架结构的厂房整体坍塌^[2]。再如1987年4月21日发生于江油电厂俱乐部的火灾, 在燃烧20 min后整体坍塌^[2]。

切实可行的建筑物火灾安全性能化设计离不开科学的火灾风险评估方法。对于不同功能结构的建筑物, 要不要对其主体结构进行防火保护? 如果要进行防火保护需要达到一个什么样的保护程度? 要回答这样的问题不仅要充分了解不同建筑材料在不同温度下的力学特性^[7], 还必须对不同功能结构建筑物发生火灾时的坍塌概率进行估算。

由于不同功能建筑物的火灾荷载不同, 当火灾一旦发生并发展成盛期火灾时, 它的燃烧持续时间不同, 则由火灾而引起的建筑物整体坍塌的可能性

[收稿日期] 2003-05-06; **修回日期** 2003-07-09

[基金项目] “九七三”计划资助项目(2001CB409600); 中国科学院“百人计划”和国家自然科学基金重大国际合作研究资助项目

[作者简介] 孙金华(1962-), 男, 江苏金坛市人, 中国科学技术大学教授, 博士生导师

也就不同。作者利用概率与统计理论对典型建筑物火灾荷载进行了统计,给出了典型建筑物在极端和一般情况下由火灾引起的坍塌概率的估算方法。

1 建筑火灾

1.1 建筑火灾的一般规律

通常建筑物火灾可分成3个阶段,即火灾成长期、盛期和衰减期,其一般规律可用图1来表示^[8]。在火灾的成长期,火灾的释热速率与时间的2次方成正比。当火灾到达盛期时,这时火灾释热速率主要受换气以及可燃物等条件制约,其值几乎不随时间的变化而变化,并一直维持到可燃物燃尽。当建筑物内的可燃物燃尽后火灾将迅速衰减直至熄灭。

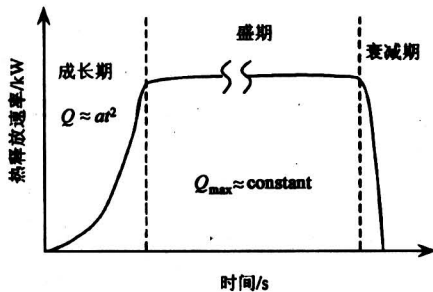


图1 建筑火灾热释放速率的一般规律

Fig.1 Heat generation characteristic of building fire

发生火灾时建筑物内人员的避难安全主要受成长期火灾的蔓延规律、建筑物内可燃物的燃烧特性、建筑物的空间结构以及烟气的毒性和抽排放等因素的影响。一般火灾的成长系数 α 越大,火灾成长期就越短,允许人员逃生的时间也越短。另一方面,要对建筑物进行性能化设计,确定建筑物的耐火时间,评定建筑物整体的火灾危险性,则火灾时的热释放速率的上限值以及盛期火灾的持续时间就非常重要。一般来说,盛期火灾的持续时间越长,建筑物整体坍塌的可能性就越大,所要求的建筑物材料的耐火性能就越高。盛期火灾持续时间不仅与建筑物的火灾荷载有关,还与建筑物的结构有关(窗口的开口面积和高度)。

1.2 不同功能建筑物火灾荷载的分布特性

一个建筑物的火灾荷载的大小主要与该建筑物的使用功能有关,除此以外还与该建筑物的使用年数有关。也就是说,即便是同类使用功能的建筑

物,其火灾荷载也不尽相同,一般是随使用年数的增加而增加。如果建筑物内的火灾荷载较大,火灾一旦发生又没有有效的扑救措施,火灾就会迅速地从成长期发展到盛期并持续较长一段时间直至结束。此时,如果建筑构件和结构的耐火时间小于火灾的持续时间,就会造成建筑物的坍塌。

松山贤的研究结果表明^[9],相同功能建筑物内的火灾荷载具有正态分布的规律。即各类功能建筑物内的火灾荷载的分布规律可近似用式(1)来表示

$$f(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w} \exp\left[-\frac{(w - \mu_w)^2}{2\sigma_w^2}\right], \quad (1)$$

其中, w 是火灾荷载(kg/m^2); $f(w)$ 是火灾荷载分布的概率函数; μ_w , σ_w 分别是火灾荷载 w 的平均值和标准差(kg/m^2)。一般,标准差值越小,分布范围将越小,正态分布的图形将越窄。根据概率与统计理论, μ_w , σ_w 可用式(2),式(3)计算。

$$\mu_w = w_1 f(w_1) + \dots + w_n f(w_n) = \sum w f(w), \quad (2)$$

$$\sigma_w = \sqrt{\sum (w - \mu_w)^2 f(w)}. \quad (3)$$

图2是一些办公楼内各个房间火灾荷载的统计结果。由图2可见,办公楼内各个房间的火灾荷载具有正态分布的规律,与松山贤的研究结果一致。将统计数据代入式(2)和式(3)可得办公楼火灾荷载的平均值和标准差分别为 $24.5 \text{ kg}/\text{m}^2$ 及 $6.4 \text{ kg}/\text{m}^2$,则办公楼的火灾荷载概率分布函数为

$$f(w_0) = \frac{1}{16.0} \exp\left[-\frac{(w_0 - 24.5)^2}{81.9}\right], \quad (4)$$

式中 w_0 表示办公楼的火灾荷载。

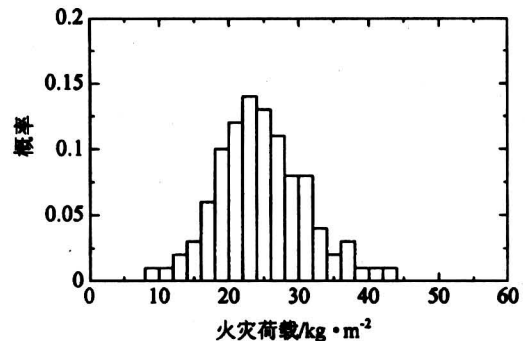


图2 办公楼内各个房间火灾荷载统计

Fig.2 Fire load distribution of office rooms

1.3 火灾持续时间

火灾盛期的持续时间是建筑物耐火设计的一个

重要依据,特别是对高层建筑和超常规大空间建筑的耐火设计。极端情况下不同功能建筑物火灾盛期的持续时间不仅与该建筑物内的火灾荷载有关,还与该建筑物的空间特性以及开口的大小和位置有关。假定火灾成长期可燃物的消耗可以忽略,则盛期火灾的持续时间 $t(s)$ 可根据该建筑物的火灾荷载与火灾时可燃物的质量减少速度来估算。

$$t = \frac{W}{m_b} = \frac{A_f w}{m_b}, \quad (5)$$

式中 W , A_f 分别表示建筑物出火层可燃物的总质量(kg)以及地表面积(m^2), m_b 表示盛期火灾时可燃物燃烧的质量消耗速率(kg/s)。

盛期火灾的燃烧速度主要受换气条件制约,其质量燃烧速度可近似用式(6)来表示^[8]

$$m_b = 0.092A\sqrt{H}, \quad (6)$$

式中 A , H 分别表示着火室窗口的开口面积和开口高度(m)。

将式(6)代入式(5)得

$$t = \frac{W}{m_b} = \frac{A_f w}{0.092A\sqrt{H}}. \quad (7)$$

令 $k = \frac{A_f}{0.092A\sqrt{H}}$,它是表征建筑物结构特征的一个参数(它与建筑物的地表面积、窗口面积及开口高度有关),则火灾时的持续时间

$$t = kw. \quad (8)$$

由于相同功能建筑物的火灾荷载成正态分布,根据概率与统计的基本规律,火灾的持续时间也将成正态分布,且其概率分布形式基本与火灾荷载相同,则火灾持续时间的分布概率 $f(t)$ 可表示为

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left[-\frac{(t-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right], \quad (9)$$

其中, t 是火灾持续时间, μ_t 、 σ_t 分别是火灾持续时间 t 的平均值和标准差。如果 k 能作为常数来处理,则有如下的关系式:

$$\mu_t = k\mu_w = \frac{A_f}{0.092A\sqrt{H}}\mu_w, \quad (10)$$

$$\sigma_t = k\sigma_w = \frac{A_f}{0.092A\sqrt{H}}\sigma_w, \quad (11)$$

2 建筑物发生火灾时的坍塌概率

2.1 极端情况下建筑物的坍塌概率

这里的极端情况是指建筑物内的某层一旦发生火灾,它便能蔓延成长为盛期火灾直至该层内的可

燃物全部烧尽。发生火灾时建筑物是否会坍塌主要取决于火灾的持续时间和建筑物的耐火时间极限。假定建筑物的耐火时间极限是 t_{\max} ,则当火灾持续时间 $t > t_{\max}$ 时表示建筑物将会发生坍塌。那么极端情况下建筑物的坍塌概率 p_{failure} 为

$$p_{\text{failure}} = \int_{\max}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} \exp\left[-\frac{(t-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right] dt. \quad (12)$$

由于建筑物耐火时间的设计是根据GBJ16-87的《建筑设计防火规范》而进行的,对于不同功能的建筑物或相同功能不同层高的建筑物所要求耐火时间必然不同,其坍塌概率也必然不同。

2.2 极端情况下坍塌概率的算例

要求出建筑物的坍塌概率,首先必须要知道建筑物火灾持续时间的概率分布数学表达式,也就是说,必须要求出式(9)中的 μ_t 和 σ_t 。根据式(10)和(11)可知, μ_t 和 σ_t 不仅与火灾荷载有关,还与建筑物的结构特征有关。为了得到不同功能建筑物的 $\frac{A_f}{0.092A\sqrt{H}}$ 数值,对建筑物结构特性进行了统计分析,表1例出了一些不同功能建筑物的 k 值的平均值。

表1 不同用途建筑物的 k 值的统计平均值

Table 1 Statistical average of k value of different functional buildings

建筑物用途	办公楼	住宅
k (平均值)	86.1	91.1

将办公楼的 μ_w 以及 σ_w 的统计结果和其 k 值的平均值86.1分别代入式(10)及(11)得 $\mu_t = 2109.5$, $\sigma_t = 551.0$,则火灾持续时间的概率分布函数式为

$$f(t) = \frac{1}{1380.8} \exp\left[-\frac{(t-2109.5)^2}{607202.0}\right]. \quad (13)$$

火灾持续时间的概率密度分布如图3所示。

将式(13)代入式(12)可得办公楼在极端情况下坍塌概率的计算式:

$$p_{\text{failure}} = \frac{1}{1380.8} \times \int_{\max}^{\infty} \exp\left[-\frac{(t-2109.5)^2}{607202.0} + 2\right] dt. \quad (14)$$

当办公楼的火灾荷载统计平均值为 24.5 kg/m^2 ,标准差为 6.4 kg/m^2 , $k = 86.1$ 时,根据式(14)可以算出极端情况下办公楼的坍塌概率与其

耐火时间的关系(见图4)。

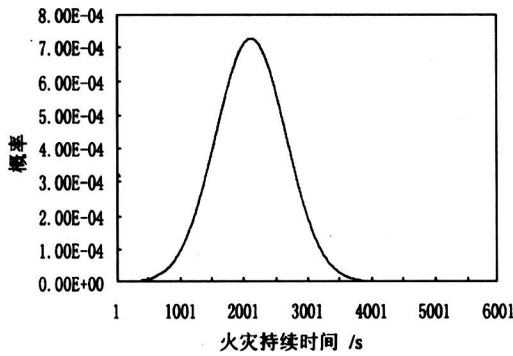


图3 办公楼火灾持续时间与其概率密度分布的关系

Fig.3 Probability distribution of fire duration time of office building

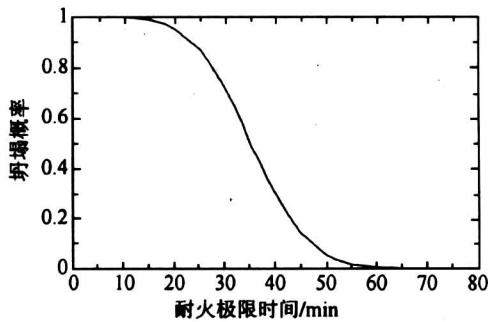


图4 极限情况下办公楼的坍塌概率与其耐火极限时间的关系

Fig.4 The relationship between collapse probability and fire duration time of office building under extreme case

由图4可知,在建筑物的火灾平均持续时间附近,适当增加其耐火时间可有效地减少该建筑物在极端情况下的坍塌概率。

2.3 由火灾引起的建筑物的坍塌概率估算

由火灾造成建筑物坍塌是一系列作用的结果,首先是火灾的发生;接着成长为盛期火灾且扑救失败;最后是火灾的持续时间超过建筑物的耐火极限而造成坍塌。因此,某建筑物在其寿命期内由于火灾而造成坍塌的概率可以用式(15)来估算:

$$P_{failure} = Y_L S p_{fire} p_{grow} p_{fail} p_{failure}, \quad (15)$$

式中 Y_L 及 S 分别表示建筑物的使用寿命及总面积; p_{fire} 表示建筑物发生火灾的概率(起/ $m^2 \cdot a$); p_{grow} 表示由初期火灾发展成盛期火灾的概率; p_{fail} 表示消防扑救失败的概率; $p_{failure}$ 为极端情况下火

灾引起的建筑物的坍塌概率。

对于某个目标建筑物而言, S 为已知, Y_L 可取其设计使用年限, $p_{failure}$ 可用式(12)来求得, p_{fire} 由统计结果而定,虽然我国目前还没有关于单位面积的建筑物1年内发生火灾的概率统计结果,但可以借鉴国外同功能建筑物的统计数据(表2为日本东京消防厅关于不同功能建筑物火灾发生概率的统计结果^[9]), p_{fail} 主要取决于消防队到火灾现场所需要的时间、火灾环境和消防环境等,工程计算一般取经验值。关键的问题是如何确定 p_{grow} 。

表2 不同功能建筑物的火灾发生概率^[10]

Table 2 Fire probability of different functional buildings

建筑物用途	火灾发生概率(起/ $m^2 \cdot a$)
办公楼	6.67×10^{-7}
商店	4.12×10^{-6}
住宅	6.43×10^{-6}

建筑物火灾发生后能否发展成盛期火灾主要取决于以下几个因素,首先是建筑物有没有安装火灾探测、报警及自动灭火设备,如果有,其探测、报警和自动灭火的有效概率是多少?其二是第一步失效后有没有进行人工早期扑救(这里的早期扑救主要是指小型灭火器类的灭火),如果有早期扑救,其有效扑救的概率有多大?其三是如果早期扑救失败后,有没有用建筑物内消火栓进行扑救,如果有,扑救成功的概率有多大?

如果用 p_{de} 表示有效探测、报警的概率; p_{auto} 表示有效自动灭火概率; p_z 表示有效早期扑救概率,它主要取决于火灾成长系数、早期对应行动的快慢、是否是职业消防人员等; p_x 表示消火栓的有效扑救的概率,它的主要影响因素与 p_z 的基本一致;则由初期火灾发展成盛期火灾的概率为

$$p_{grow} = (1 - p_{de} p_{auto})(1 - p_z)(1 - p_x). \quad (16)$$

式(16)中的 p_{de} 及 p_{auto} 可以根据统计结果得到,但 p_z 和 p_x 的数值还是以经验取值为主。将式(16)代入式(15)得到由火灾引起的建筑物坍塌概率的估算式:

$$P_{failure} = Y_L S p_{fire} (1 - p_{de} p_{auto}) \times (1 - p_z)(1 - p_x) p_{fail} p_{failure}. \quad (17)$$

式(17)中的大部分数据能从统计结果得到,

但在工程计算上有些数据还须取经验值。

3 结论

1) 对典型建筑物的火灾荷载进行了统计分析, 并将建筑物火灾的一般规律与概率统计理论相结合, 得到了典型建筑物火灾荷载及火灾持续时间的概率分布规律和概率分布函数。

2) 给出了建筑物在极端情况下由火灾而引起的坍塌概率的计算方法, 得到了写字楼的耐火时间极限与坍塌概率的关系曲线。结果表明, 在建筑物的火灾平均持续时间附近, 适当增加它的耐火时间, 可以有效地减小该建筑物在极端情况下的坍塌概率。这对建筑物火灾防火性能设计具有一定的指导意义。

3) 分析了由火灾引起建筑物坍塌的影响因素, 并根据火灾统计结果, 给出了一般建筑物由于火灾引起的坍塌概率的简单估算方法。

参考文献

- [1] 陈家强. 我国火灾形势和发展趋势 [A]. 第九届国际消防设备技术展览会学术研讨会论文集 [C]. 北京: 2002. 1~5
- [2] 王有为. 建筑防火的新动向 [A]. 第九届国际消防设备技术展览会学术研讨会论文集 [C]. 北京: 2002. 28~36
- [3] Zhao J C. Application of the direct iteration method for non-linear analysis of steel frames in fire [J]. Fire Safety Journal, 2000, (35): 241~255
- [4] Najjar S R, Burgess I W. A non-linear analysis for three-dimensional steel frame in fire condition [J]. Engng Struct, 1996, (18): 77~89
- [5] Becker R. Structural behavior of simple steel structures with non-uniform longitudinal temperature distributions under fire conditions [J]. Fire Safety Journal, 2002, (37): 495~515
- [6] Al-Khaleefi A M, Terro M J, Alex A P, et al. Prediction of fire resistance of concrete filled tubular steel columns using neural networks [J]. Fire Safety Journal, 2002, (37): 339~352
- [7] Valdir P S, Ricardo H F. Brazilian standards for steel structures fire design [J]. Fire Safety Journal, 2002, (37): 217~227
- [8] Ohmiya Y, Tanaka T, Notake H. Design fire Load density based on risk concept [J]. J Archit Plann Environ Eng, 2002, 55 (1): 1~8
- [9] 松山賢, 等. 区画火災性状の簡易予測法 [J]. 日本建築学会構造系論文集, 1995, (469): 159~164
- [10] 日本東京消防庁予防部. 火災の実態 [M]. 日本: 日本東京消防庁予防部, 1998

Collapse Probability of Building Caused by Fire

Sun Jinhua, Sun Zhanhui, Lu Shouxiang, Fan Weicheng

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

[Abstract] With the architectonic development, steel structure is used in more and more architectures. Because of the bad fire performance of steel structure, collapse may occur. In the American 911 accidents, the fire caused by airplane crash led to collapse of WTC, mass and personnel loss is huge. Therefore researches of building collapse caused by fire are very necessary. The absence of knowledge regarding fire dynamics linked to the fact that fire can be considered a random phenomenon has led to general use of prescriptive fire regulations all over the world. This paper mainly introduces the research on collapse probability of building.

According to statistical theory and characteristics of building fire, the probability distribution functions of fire load and the fire duration time of office buildings are presented. The influencing factors to the building collapse under the condition of fire are studied. Based on the fire statistic results, fire dynamical theory and characteristics of building fire, an evaluation method of the collapse probability of building caused by fire is developed in this paper.

[Key words] building; fire; fire load; collapse probability