

文章编号: 1004-4574(2009) 01-0095-05

# 火灾后钢筋混凝土梁的抗弯可靠性

白丽丽<sup>1,2</sup>, 王振清<sup>1</sup>, 苏娟<sup>1</sup>, 乔牧<sup>1</sup>

(1 哈尔滨工程大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2 黑龙江科技学院 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150027)

**摘要:**利用 ANSYS 软件对火灾发生时钢筋混凝土梁截面的最高温度分布进行了分析, 确定了火灾后钢筋混凝土梁的抗力折减系数, 建立了火灾后梁的抗力模型和极限状态方程。利用改进的一次二阶矩法计算了不同温度作用下钢筋混凝土梁在承受原设计荷载时的可靠性指标, 分析了不同受火时间对钢筋混凝土梁可靠性指标的影响, 为火灾后钢筋混凝土构件的破损评估分析提供了理论基础。算例分析表明, 不同受火时间对钢筋混凝土梁的可靠性有很大的影响, 梁在受火时间超过 120 分钟时, 需进行加固维修。

**关键词:** 火灾; 钢筋混凝土梁; 抗弯可靠性

**中图分类号:** TU 378.2      **文献标识码:** A

## Bending reliability of RC beam after fire exposure

BAI Li-li<sup>1,2</sup>, WANG Zhen-qing<sup>1</sup>, SU Juan<sup>1</sup>, QIAO Mu<sup>1</sup>

(1 College of Civil Engineering Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2 College of Civil Engineering Heilongjiang Institute of Science & Technology, Harbin 150027, China)

**Abstract** The ANSYS software was utilized to analyze the maximum temperature distribution of reinforcement concrete (RC) beam section during exposure to fire. Reduced coefficient of resistance of the RC beam after fire was decided, resistance model and limit state equation of the RC beam after fire was determined. Reliability index of RC beam after different fire duration was calculated through the AFORM method for the beam under original design load. Influence of different fire duration on reliability index of RC beam was analyzed and this paper supplies some theoretical basis to the damage assessment of the RC member. The results of specific calculated example indicate that different fire duration have impact on the reliability of the RC beam, and the beam should be strengthened when the fire duration is over 120 minutes.

**Key words** fire; RC beam; bending reliability

灾对建筑物的破坏主要是高温作用, 建筑物的受害程度主要取决于火灾的持续时间和火灾温度。但是火灾温度和结构表面温度一般不易在火灾当时测出来。随着现代科学技术的进步, 国内外学者对火灾作用下着火区的升温过程及构件内的温度分布、以及钢筋混凝土在高温时和高温后的力学性能、热工性能等问题进行了大量的研究, 取得了一系列研究成果。而且为了能够全面地分析建筑物的防火安全水平, 性能化评估方法作为一种新的火灾风险评估方法<sup>[1]</sup>。一般对受火后钢筋混凝土结构的破损评估主要靠现场经验检测, 根据检测结果来推断其受损程度, 缺少一定的理论基础。依据目前的研究成果来看, 对受火后钢筋混凝土构件的可靠性研究并不多, 因此研究火灾后钢筋混凝土构件的安全问题就存在着很大困

收稿日期: 2007-06-21    修订日期: 2007-10-13

基金项目: 高等学校博士点科研专项基金(20060217010)资助

作者简介: 白丽丽(1977-), 女, 博士研究生, 主要从事防灾减灾方面研究。E-mail: bailil333@yahoo.com.cn

难<sup>[2-4]</sup>。我们知道火灾发生后的结构或构件不仅需要满足极限承载力的要求,而且对其可靠性也需要进行验算<sup>[5]</sup>。因此迫切需要对火灾发生后混凝土构件可靠性和进行评估,以便于采取合理措施,如维护、加固或改造、重建等。国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068-2001)明确规定<sup>[6]</sup>:“结构构件的可靠性宜采用可靠性指标度量,结构构件的可靠性指标宜采用考虑基本变量概率分布类型的一次二阶矩方法进行计算。”

## 1 火灾后钢筋混凝土梁的极限状态方程

本文只考虑火灾后钢筋混凝土梁正截面抗弯可靠性指标的变化,正截面受弯承载力的计算可按现行国家标准规定进行计算。火灾后钢筋混凝土简支梁正截面抗弯强度计算公式为

$$M \leq \sum \bar{\varphi}_{CT} a_1 f_c b (h_0 - \frac{x}{2}), \quad (1)$$

式中,  $a_1$  为常温下混凝土强度折减系数,当混凝土强度等级不超过 C50 时取为 1.0,当混凝土强度等级为 C80 时取为 0.94,其间按线形内插法确定,  $\bar{\varphi}_{CT}$  为混凝土强度折减系数,在这里它是一个确定的值。

考虑永久荷载与一种可变荷载组合的情况,火灾后钢筋混凝土梁可靠度分析的极限状态方程如下:

$$Z = R - S_G - S_Q, \quad (2)$$

式中:  $R$  为钢筋混凝土梁的抗力,  $S_G$  和  $S_Q$  分别为永久荷载效应和可变荷载效应随机变量。

火灾后钢筋混凝土梁抗力计算方法与常温下混凝土梁的计算方法相同,区别在于火灾后混凝土强度的取值不同。由于火灾后混凝土强度的统计参数无法得出,所以我们用火灾前的混凝土强度来表示火灾后混凝土强度。在本文计算中,假定火灾后构件的截面尺寸不变,先确定构件截面温度场,根据构件截面的温度场分布,把构件分成几个平行的条状区域,考虑每个区域中心混凝土所受温度,在这里,混凝土强度在不同区域的取值不相同,具体取值应根据截面温度场来确定,关键就是  $\bar{\varphi}_{CT}$  值的确定。根据大量统计资料<sup>[7-9]</sup>随机抽取了有代表性的不同受火温度的混凝土强度结果作回归分析,在规定的保证率下再按照概率统计的方法,得出它们平均值和变异系数(其中实际检测到的强度值<sup>[10-11]</sup>判定为设计值,而根据试验回归公式<sup>[12]</sup>得到的值为计算值,两者比值作为强度的平均值),其中,混凝土强度折减系数的变异性很小,所以在这里我们不考虑它的随机性。

在确定构件边界条件和材料的热工参数后,本文利用 ANSYS 软件对钢筋混凝土梁截面内的温度场进行分析,把截面内的温度场分成若干个区域,再根据每一区域的平均温度,由温度-强度曲线<sup>[12]</sup>得出每一个小区域所对应的混凝土抗压强度降低系数  $\bar{\varphi}_{CTi}$ ,然后在整个截面内进行加权平均获得  $\bar{\varphi}_{CT}$ 。对于三面受火的矩形截面钢筋混凝土梁,整个截面的混凝土强度降低系数可用下式求得:

$$\bar{\varphi}_{CT} = \frac{\sum \bar{\varphi}_{CTi} \cdot b_i}{b}, \quad (3)$$

式中:  $\bar{\varphi}_{CTi}$  ——第区域内混凝土强度降低系数,由第  $i$  区域内的平均温度  $T_i$  由温度-强度曲线查得;

$b_i$  ——第温度区域内的截面宽度;

$b$  ——钢筋混凝土梁的整个截面宽度。

## 2 火灾后钢筋混凝土梁抗弯可靠性指标和统计参数的分析

对于火灾后钢筋混凝土梁,在进行可靠性指标计算时,应按设计荷载考虑。基于式(2)所表示的结构功能函数,可以利用改进的一次二阶矩方法计算火灾后钢筋混凝土梁的可靠性指标,在使用改进的一次二阶矩方法计算可靠性指标时,应使用随机变量的分布概型及其统计参数进行计算。按照统一标准<sup>[6]</sup>,建筑结构的永久荷载效应服从正态分布,可变荷载效应服从极值 I 型分布。对于本文中钢筋混凝土梁的抗力,为多个随机变量乘积及乘积之和的形式,可以由中心极限定理推知其近似服从对数正态分布。

式(2)中抗力  $R$  可通过下式来计算:

$$R = X_p R_p, \tag{4}$$

式中:  $R_p$  为由式(1)确定的钢筋混凝土梁的抗力;  $X_p$  为考虑计算模式不确定性的变量。

由于火灾后混凝土强度分布的不均匀性, 计算时将其作为随机变量, 统计参数按规范取值。因此, 抗力  $R$  的统计参数可以表示为

平均值:  $\mu_R = \mu_{KP} \mu_{RP}$ ; 变异系数:  $\delta_R = \sqrt{\delta_{RP}^2 + \delta_{KP}^2}$ 。考虑抗力计算模式不确定性, 变量参数取为:  $\mu_{KP} = 1.0$ ,  $\delta_{KP} = 0.04$

由文献<sup>[13]</sup>可得到: 混凝土强度分布参数  $\mu_{\kappa} \text{③} = 1.41$ ,  $\delta_{\kappa} \text{③} = 0.19$ 。梁截面宽度  $b$  的分布参数  $\mu_{\kappa} \text{④} = 1.00$ ,  $\delta_{\kappa} \text{④} = 0.02$ 。梁的有效高度  $h_0$  分布参数  $\mu_{\kappa} \text{⑤} = 1.00$ ,  $\delta_{\kappa} \text{⑤} = 0.02$ 。而  $x$  的分布特征可根据误差传递求出:  $\mu_{\kappa} \text{⑥} = 1.00$ ,  $\delta_{\kappa} \text{⑥} = 0.03$ 。

### 3 算例

某简支梁跨中截面钢筋强度等级为 HRB335, 混凝土强度等级 C30, 轴心抗压强度  $f_c = 14.3 \text{ N/mm}^2$ , 石灰岩骨料混凝土, 梁三面升温 (按标准火灾升温曲线加热) 且自然冷却。永久荷载标准值和可变荷载准值在梁跨中产生的弯矩分别为  $S_{CK} = 70.26 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,  $S_{QK} = 43.24 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。试计算该梁在受火时间分别为 30 min, 60 min, 90 min 后可靠性指标  $\beta$ 。

按常温情况下进行计算并配筋, 净保护层厚度取 35 mm, 简支梁跨中截面尺寸和配筋如图 1。

火灾场温度-时间曲线采用国际标准化组织 (ISO) 建筑构件耐火试验曲线:

$$T - T_0 = 345 \lg(8t + 1) \tag{5}$$

其中:  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  为初始温度;  $T$  为火灾燃烧  $t$  分钟的温度。

混凝土的热工参数为:

$$\begin{cases} c_c = 900 + 80 \left( \frac{T}{120} \right) - 4 \left( \frac{T}{120} \right)^2 \text{ (kal/(kg}\cdot^\circ\text{C))}, \\ \lambda_c = 1.6 - 0.16 \left( \frac{T}{120} \right) + 0.008 \left( \frac{T}{120} \right)^2 \text{ (kal/(h}\cdot\text{m}\cdot^\circ\text{C))}, \\ \rho_c = 2300 \text{ kg/m}^3. \end{cases} \tag{6}$$

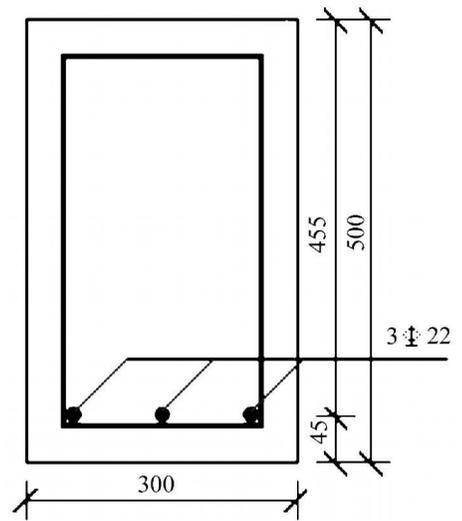


图 1 截面尺寸和配筋  
Fig 1 Dimension and reinforcement of section

#### 3.1 梁截面火灾温度场计算结果及 $\bar{\varphi}_{cr}$ 计算结果

由受火时梁内温度场分布分析, 我们给出这 3 个温度作用后梁的简化等温线, 见图 3。

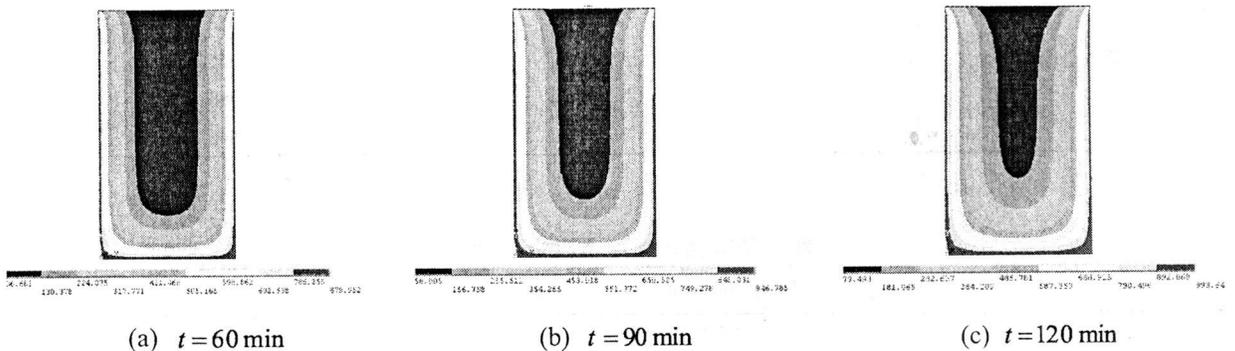


图 2 梁截面在不同温度作用下的温度场

Fig 2 Temperature distribution on section of beam under different temperature action

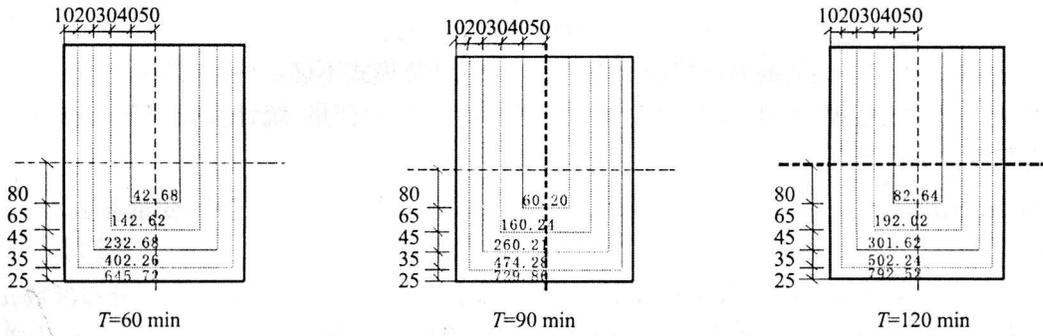


图 3 不同温度作用后梁内等温线的简化图

Fig 3 Schematic drawing of Isothermal in beam under different temperature

如前所述, 我们可得到在 3 个受火时间后梁截面的  $\bar{\varphi}_{CT}$  见表 1

表 1 梁在不同受火时间后的  $\bar{\varphi}_{CT}$  值

Table 1 Values  $\bar{\varphi}_{CT}$  of beam after different fire duration

受火时间 $t/m\ in$	60	90	120
$\bar{\varphi}_{CT}$	0.725	0.612	0.402

### 3.2 火灾后钢筋混凝土梁可靠性指标的计算结果

式 (2) 中, 永久荷载服从正态分布, 且有: 平均值 标准值  $k_{SG} = 1.06$  变异系数  $\delta_{SG} = 0.07^{[8]}$ , 楼面可变荷载服从极值 I 型分布, 此处只考虑办公楼活荷载情况, 对于办公楼有: 平均值 标准值  $k_{SQ} = 0.26$   $\delta_{SQ} = 0.47^{[8]}$ 。按文献 [14] 提出的非正态随机变量当量化的方法, 对极值 I 型分布进行了当量正态化。同时对梁的正截面抗力进行了处理, 本文利用 FORTRUN 软件编制了相应的有限元程序, 经迭代分析得出梁在上述 3 个不同温度作用后的可靠性指标  $\beta$ , 允许误差  $\varepsilon = 0.1$ 。在这里我们给出受火时间为  $T = 60\ min$  的迭代计算过程, 见表 2。由此我们得出不同温度作用后梁的可靠性指标, 见表 3。

表 2  $T = 60\ min$  时  $\beta$  的迭代计算过程

Table 2 Iterative process of reliability index  $\beta$  for  $T = 60\ min$

迭代次数		1	...	18	19	20
验算点坐标初值	$y_1^*$	0	...	-3.574	-3.57	-3.556
	$y_2^*$	0	...	0.374	0.370	0.368
	$y_3^*$	0	...	1.683	1.652	1.646
可靠性指标 $\beta$		4.432	...	3.613	3.612	3.610
方向余弦	$a_{Y1}$	-0.979	...	-0.988	-0.972	-0.978
	$a_{Y2}$	0.123	...	0.102	0.106	0.108
	$a_{Y3}$	0.163	...	0.457	0.458	0.460
新的验算点坐标值	$y_1^*$	-4.339	...	-3.570	-3.556	-3.553
	$y_2^*$	0.545	...	0.370	0.368	0.388
	$y_3^*$	0.722	...	1.652	1.646	1.660

表 3 不同温度作用后梁的可靠性指标

Table 3 Reliability index of beam after different temperature action

受火时间 $t/m\ in$	可靠性指标 $\beta$	失效概率 $P_f$
60	3.610	$0.1591 \times 10^{-3}$
90	3.474	$0.2602 \times 10^{-3}$
120	3.142	$0.8448 \times 10^{-3}$

由分析我们可以得出在受火时间从到时梁的失效概率变化并不大, 而从到失效概率已经变化很大了, 而且当时梁的可靠性指标已经不满足规范的要求, 所以, 此梁需进行加固维修。

## 4 结论

(1) 确定边界条件和材料的热工参数后, 本文利用 ANSYS 软件对不同温度作用下梁截面的温度场进行了分析, 并得出了不同温度作用后混凝土梁抗力的折减的系数。

(2) 建立了火灾后梁的抗力模型和极限状态方程, 并对影响抗力的各随机变量进行了分析。

(3) 利用 FORTRUN 软件对不同受火时间后梁的可靠性指标进行了计算。具体算例表明, 梁的可靠性指标随着受火时间增长而减小, 当受火时间达到 120min 时梁的可靠性指标已经不满足规范的要求。

## 参考文献:

- [1] 林鹏, 赵春梅, 卢兆明, 袁国杰. 性能化火灾安全评估应用个案研究[J]. 自然灾害学报, 2006 15(1): 74-78页.
- [2] G. TG. Mohanedbhai. The residual strength of concrete subjected to elevated temperatures[J]. Concrete, 1983(11): 22-27P.
- [3] U. Schneider. Reliability of fire damaged structures. CIBW 14 Report[J]. Fire Safety Journal 1990 15(4): 251-338P.
- [4] 闵明保等. 建筑物火灾后诊断与处理[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1994, 55-72页.
- [5] R. Folić V. Radonjanić, M. Maleskić. The assessment of the structure of Novi Sad Open University damaged in a fire[J]. Construction and Building Materials 2002 (16): 427-440P.
- [6] 共和国建设部. GB50068-2001 建筑结构可靠度设计统一标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [7] Bing Chen, Juanyu Liu. Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures, Cement and Concrete Research 2004(34): 1065-1069P.
- [8] Zhan-Fei Huang, Kang-Hai Tan, Wee-Siang Toh, Guan-Hwee Phng. Fire resistance of composite column with embedded I-section steel—Effects of section size and load level. Constructional steel Research.
- [9] 吕天启. 高温后混凝土静置性能的试验研究及已有建筑物的防火安全评估. 大连理工大学博士学位论文, 2002 53-68页.
- [10] L. Sarvaranta and E. Mikkola. Fiber mortar composites under fire conditions—effect of ageing and moisture content of specimens. Materials and Structures V 27, 1994 532-538P.
- [11] 谢获敏, 钱在兹. 高温(明火)作用后混凝土强度与变形试验研究. 工程力学(增刊), 1996 54-58页.
- [12] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能[M]. 北京: 科学出版社, 2003 36-58页.
- [13] 李继华, 林志民, 李明顺等. 编著, 建筑结构概率极限状态设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990 324-350页.
- [14] Madsen H O, Krenk S, Lind N C. Methods of Structural Safety. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1986