

文章编号:1671-8879(2009)01-0054-05

## 火灾下钢筋混凝土梁桥高温场形变分析

张 岗<sup>1</sup>, 贺拴海<sup>1</sup>, 郭 琦<sup>2</sup>, 宋一凡<sup>1</sup>

(1. 长安大学 桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘 要:**利用数值模拟程序分析了火灾高温下钢筋混凝土矩形截面简支梁任意时刻的温度场分布, 研究了保护层厚度、荷载等级对火灾下的钢筋混凝土简支梁高温场时程形变的影响规律, 建立了钢筋和混凝土的内力积分模型, 以等比数列推导了非线性加速迭代方程。研究表明:截面温度分布与测点至梁体表面距离相关;保护层厚度对钢筋混凝土简支梁跨中挠度影响较大;火灾场钢筋混凝土简支梁跨中挠度时程曲线随荷载等级的增加呈非线性增长趋势, 挠度时程曲线增大的程度随保护层厚度增加而减小;增加混凝土保护层厚度, 可有效提高火灾场钢筋混凝土梁桥的耐火极限, 控制其变形。

**关键词:**桥梁工程; 钢筋混凝土; 简支梁; 高温形变; 非线性有限元

**中图分类号:**TU375.1; TU352.5 **文献标志码:**A

### High temperature deformation of reinforcement concrete beam bridges exposed to fire

ZHANG Gang<sup>1</sup>, HE Shuan-hai<sup>1</sup>, GUO Qi<sup>2</sup>, SONG Yi-fan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an

710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering, Xi'an University of

Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** The temperature field distributions of rectangle section for RC simply supported beams exposed to the ISO834 standard fire are studied by numerical simulation program, and the influence laws of the covering layer thickness and load grades on the time-independent deformation of RC beams at high temperature are presented. Based on mechanical balance principle and influence parameters, the model of inner force integration is proposed, and the nonlinear acceleration iteration equation is deduced with geometric progression. The simulation results indicate that the covering layer thickness has a great contribution to the deflection of RC simple beams, the time-dependent curves for deflection presents a non-linear increase tendency with the raise of load grades; and its increase degree decrease with the increase of covering layer thickness; the increment of covering layer thickness is effective to fire resistance and control of deformation for RC simple beams. 8 figs, 10 refs.

**Key words:** bridge engineering; reinforcement concrete(RC); simply supported beam; high tem-

收稿日期:2008-03-18

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2005 318 812 15)

作者简介:张 岗(1980-),男,甘肃庆阳人,工学博士研究生,E-mail:zhangg\_2004@126.com.

perature deformation; nonlinear FEM

0 引 言

目前,随着交通建设的发展,交通基础设施风险也随之增多,桥梁火灾问题日益突出,如何对火灾下钢筋混凝土简支梁高温场形变分析显得尤为重要。有关普通混凝土、高强混凝土和钢筋等材料的高温特点、抗压强度及抗弯性能的试验研究<sup>[1-2]</sup>取得了一些成果;圆钢管偏压柱<sup>[3]</sup>以及火灾后矩形钢管混凝土偏心受压构件<sup>[4]</sup>的极限承载力得到了进一步研究;吴波等<sup>[5]</sup>对多种钢筋混凝土柱的耐火极限进行了大量分析,拟合了弯压构件的火灾高温计算方法;继而,国外学者<sup>[6]</sup>做了组合结构以及简支梁的抗火计算;本文作者研究了简支梁三维温度应力分布<sup>[7]</sup>、变形特点及计算方法,并进行了安全评价<sup>[8-10]</sup>。本文在此基础上,建立火灾场钢筋混凝土任意截面力学模型,引入等比数列,推导了非线性加速迭代方程,对火灾场钢筋混凝土简支梁进行非线性分析,研究了不同保护层厚度和荷载等级下钢筋混凝土简支梁的高温形变状况。

1 截面平衡方程

选取某钢筋混凝土梁正截面,分析其内力状态,如图 1 所示。

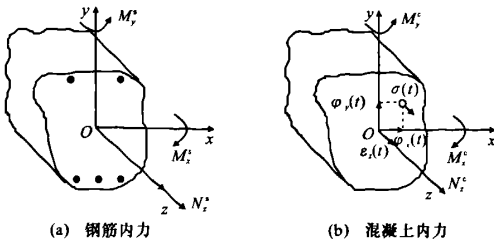


图 1 钢筋混凝土内力

由图 1 可得方程为

$$\Delta P = F_i - \lambda F_e \tag{1}$$

式中:  $F_i$  为截面内力向量;  $F_e$  为外部荷载向量;  $\lambda$  为外部荷载因子;  $\Delta P$  为荷载残余向量。

不同温度状态下  $F_i$  可分为

$$F_i = F_i^s + F_i^c \tag{2}$$

式中:  $F_i^s$  为截面钢筋的内力向量,  $F_i^c$  为截面混凝土的内力向量。

图 1(b) 中:  $\varphi_x(t)$ 、 $\varphi_y(t)$  分别为  $x$  轴和  $y$  轴的弯曲曲率;  $\epsilon_x(t)$  为轴向应变;  $\sigma(t)$  为混凝土应变。

$$F_i^s = \begin{bmatrix} M_x^s \\ M_y^s \\ N_z^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n \sigma_k(t) y_k A_k \\ \sum_{k=1}^n \sigma_k(t) x_k A_k \\ \sum_{k=1}^n \sigma_k(t) A_k \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中:  $M_x^s$ 、 $M_y^s$  分别为钢筋对  $x$  轴和  $y$  轴方向的弯矩;  $N_z^s$  为钢筋轴向合力;  $\sigma_k(t)$  为火灾高温场任意时刻钢筋应力;  $x_k$ 、 $y_k$  均为钢筋至截面中性轴的距离;  $A_k$  为截面积。

$$F_i^c = \begin{bmatrix} M_x^c \\ M_y^c \\ N_z^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \iint \sigma_x(t) y_c dA \\ \iint \sigma_y(t) x_c dA \\ \iint \sigma(t) dA \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中:  $M_x^c$ 、 $M_y^c$  分别为混凝土对  $x$  轴和  $y$  轴方向的弯矩;  $N_z^c$  为混凝土轴向合力;  $\sigma_x(t)$ 、 $\sigma_y(t)$  分别为火灾高温场任意时刻混凝土  $x$  方向和  $y$  方向的应力;  $x_c$ 、 $y_c$  均为混凝土至截面中性轴的距离;  $dA$  为面积微元。

2 加速迭代求解

加速迭代求解可跟踪各种复杂的非线性平衡路径全过程,适合极值点问题的求解以及压弯构件屈曲后的形变情况。为了改进欧拉法的精度,使用 N-R 求解方法,在每一增量步内进行多次迭代,则

$$\Delta P_{m+1}^{n+1} = (F_i)_{m+1}^{n+1} - \lambda_{m+1}^{n+1} F_e = (F_i)_{m+1}^n - \lambda_{m+1}^{n+1} F_e + (K_i)_{m+1}^n \Delta u_m^n = 0 \tag{5}$$

式中:  $\Delta P_{m+1}^{n+1}$  为  $m+1$  次增量步的第  $n+1$  次迭代残余值;  $(F_i)_{m+1}^{n+1}$ 、 $(F_i)_{m+1}^n$  分别为  $m+1$  次增量步的第  $n+1$  次和第  $n$  次迭代内力向量;  $\lambda_{m+1}^{n+1}$  为对于  $m+1$  次增量步的第  $n+1$  次迭代因子;  $\Delta u_m^n$  为  $m$  次增量步的第  $n$  次修正量;  $(K_i)_{m+1}^n$  为  $m+1$  次增量步的第  $n$  次切线刚度矩阵。

由式(5)求得

$$\Delta u_m^n = [(K_i)_{m+1}^n]^{-1} [\lambda_{m+1}^{n+1} F_e - (F_i)_{m+1}^n] \tag{6}$$

使用 N-R 迭代时,每次迭代后重新形成和分解  $(K_i)_{m+1}^n$  矩阵,计算量较大,可采用 mN-R 方法,其方程为

$$(K_i)_{m+1}^n = (K_i)_{m+1}^l \tag{7}$$

令  $l = n/2^q$ , 利用等比数列加速缩减式(6) 的求

解次数,则有

$$\Delta u_m^l = [(K_l)_{m+1}^l]^{-1} [\lambda_{m+1}^{l+1} F_c - (F_l)_m^l + 1] \quad (8)$$

式中:  $\Delta u_m^l$  为  $m$  次增量步的第  $l$  次修正量;  $\lambda_{m+1}^{l+1}$  为对于  $\lambda$  的  $m+1$  次增量步的第  $l+1$  次迭代因子;  $[(K_l)_{m+1}^l]^{-1}$  为  $m+1$  次增量步的第  $l$  次切线刚度矩阵的逆;  $(F_l)_m^l$  为  $m+1$  次增量步的第  $l$  次迭代内力向量。

### 3 火灾场景的确定

#### 3.1 标准火灾曲线

国际标准化组织(ISO834) 建议的建筑构件火灾试验曲线如图 2 所示,其计算式为

$$\theta(t) = 345 \lg(8t + 1) + \theta_0 \quad (9)$$

式中:  $\theta_0$  为试验炉内的初始温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $\theta(t)$  为燃烧开始  $t(\text{min})$  后试验炉的空气平均温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

ISO834 标准火灾温度-时间曲线如图 2 所示,其升温过程单调。作为计算标准,它在结构的高温性能分析或火场极限验算中统一应用。

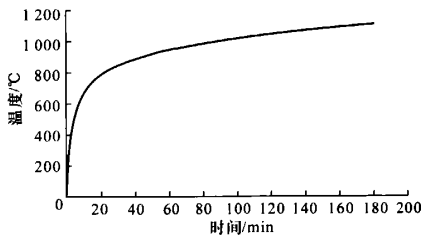


图2 标准火灾温度-时间曲线

#### 3.2 火灾模型

如图 3 所示,某简支梁跨中截面主筋采用 III 级钢筋,常温下屈服强度  $f_{sy} = 400 \text{ N/mm}^2$ ,采用 C30, 轴心抗压强度  $f_{c,20} = 20 \text{ N/mm}^2$ ,三面升温承受均布荷载  $q (\text{kN/m})$ ,计算火灾高温 180 min 不同保护层厚度下和不同荷载下简支梁的变形状况,确定耐火极限。

#### 3.3 温度测点设计

如图 4 所示( $C$  为混凝土保护层厚度),由于截面对称,对称结构在对称火灾作用下,温度效应分布存在对称性,所以在火灾模型梁截面中心线一侧共布置 5 个温度测点。测点  $T_1$  位于截面最下缘外侧迎火面,直接得到火场升温曲线;测点  $T_2$ 、 $T_3$  布置在钢筋层处,实时监测钢筋温度;测点  $T_4$  位于背火层,可测得火场中最低温度时程曲线;测点  $T_5$  布置在迎火面和背火层交合处,测其交合温度;测点  $T_2$ 、 $T_3$  的温度随混凝土保护层厚度变化;跨中挠度观测采用竖直刻度尺随时跟踪观测。

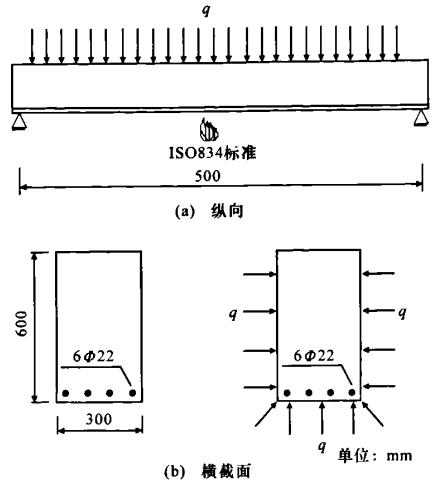


图3 标准火灾作用下受弯构件模型

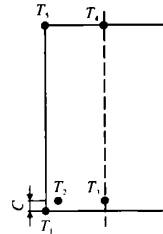


图4 火灾模型截面温度测点布置

结合多种结构火场温度试验参数,计算高温场各测点温度时程曲线和挠度时程曲线,确定钢筋混凝土简支梁的耐火极限。

### 4 高温场形变分析

#### 4.1 温度场分析

图 5(见下页)为钢筋混凝土矩形截面简支梁三面火灾高温时的温度梯度分布。由图 5 可看出,从外侧到内侧,火灾温度逐渐降低,呈 ISO834 标准的“U”形梯度分布,受热侧温度相对其他部位较高。随着火灾时间的增加,高温层逐渐向内扩展,高温层厚度小于相应低温层厚度,梯度分布宽度由外及内逐渐增大。

图 6(见下页)为任意时刻钢筋混凝土简支梁矩形截面各测点的温度时程曲线。由图 6 可见,各测点温度随时间增加而升高,测点  $T_1$ 、 $T_5$  直接受火场高温辐射,短时间内温度骤然上升,其曲线形式类似于 ISO834 标准火灾温度-时间曲线升温形式;由于混凝土是不良热导体,所以测点  $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$  的温度缓慢升高;测点  $T_4$  处于背火层,未受火场高温辐射,所以温度相对于其他测点较低;测点  $T_2$  至混凝土表面距离短,温度高于测点  $T_3$  温度。测点温度高

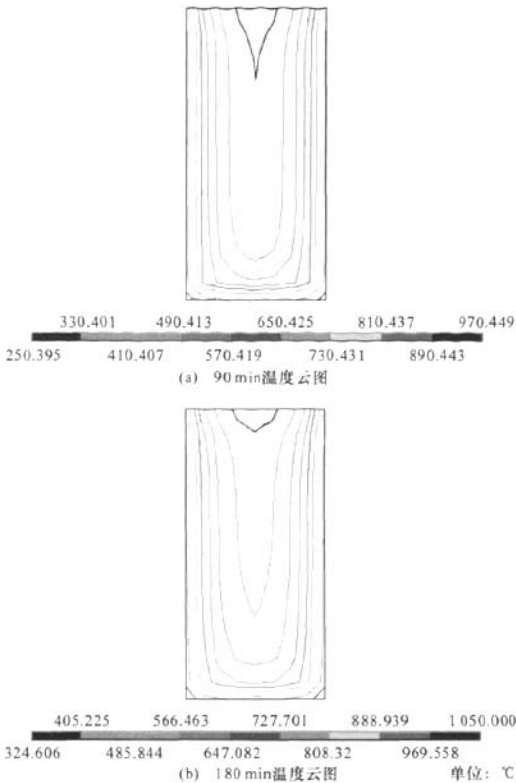


图 5 截面的温度梯度分布

低及升温速度与火场的接触程度相关,靠近火场,升温快、温度高;远离火场,升温慢、温度低。

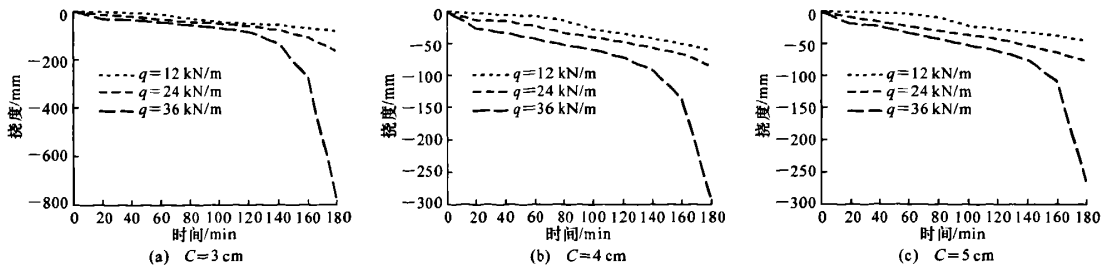


图 7 荷载与挠度的时程曲线

相对增大,挠度值增加了 5 倍。

混凝土保护层为 5 cm、荷载为 36 kN/m 时,挠度随时间延伸直线下降,180 min 挠度值为 46 mm;荷载提高 2 倍,挠度时程曲线斜率略为增大,180 min 挠度值为 78 mm;荷载提高 3 倍,140 min 内挠度线性下降,180 min 跨中挠度为 260 mm,挠度值增加了 4 倍。

图 8 为火灾高温 180 min 时不同混凝土保护层厚度下荷载与钢筋混凝土简支梁跨中挠度的关系曲线。由图 8 可知,混凝土保护层厚度为 3 cm 时,钢

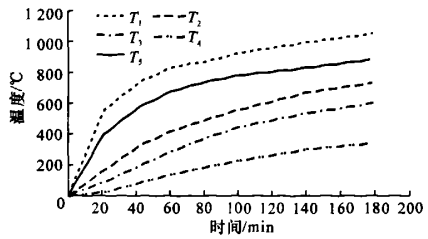


图 6 任意时刻截面各测点的温度时程曲线

## 4.2 挠度分析

图 7 为不同混凝土保护层厚度下的荷载与钢筋混凝土简支梁跨中挠度时程曲线。由图 7 可看出,火灾场钢筋混凝土简支梁挠度时程曲线随荷载的增加呈非线性增长趋势,挠度时程曲线增大的程度随混凝土保护层厚度增加而减小。混凝土保护层为 3 cm、荷载为 12 kN/m 时,挠度随时间延伸直线下降,180 min 挠度值为 76 mm;荷载提高 2 倍,挠度时程曲线线型基本保持不变,180 min 挠度值为 162 mm;荷载提高 3 倍,140 min 内挠度线性下降,140 min 后挠度有突增现象,180 min 跨中挠度为 779 mm,其值增加了 10 倍。

混凝土保护层为 4 cm、荷载为 24 kN/m 时,挠度随时间延伸直线下降,180 min 挠度值为 57 mm;荷载提高 2 倍,挠度时程曲线线型基本保持不变,180 min 挠度值为 82 mm;荷载提高 3 倍,140 min 内挠度线性下降,180 min 跨中挠度为 290 mm,挠度

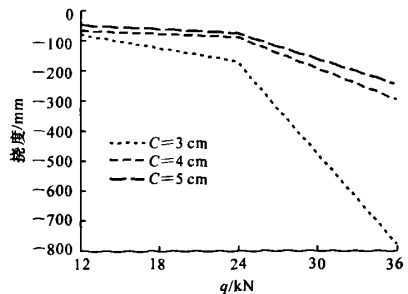


图 8 荷载与挠度的关系曲线

筋混凝土矩形截面简支梁三侧火灾高温 180 min, 加载至 36 kN/m, 挠度远大于混凝土保护层为 4 cm 和 5 cm 时相应荷载等级的对应值。由此可见, 提高混凝土保护层厚度, 可有效控制火灾场钢筋混凝土梁桥形变。

## 5 结 语

(1) 通过截面力学平衡原理, 研究了钢筋和混凝土的内力和外荷载向量积分计算式。基于有限元空间分析程序的参数化语言, 引入等比数列, 推导了火灾下钢筋混凝土简支梁高温场形变加速迭代求解方程。

(2) 结合多种结构火灾场试验参数, 确定矩形截面简支梁火灾场景及热工参数, 利用高温辐射及热传导理论, 对火灾场简支梁进行了高温场数值分析, 热传导及热辐射的速度与测点至混凝土表面的距离相关, 测点靠近混凝土表面, 升温快; 远离混凝土表面, 升温缓慢; 截面温度分布呈“U”形, 温度梯度分布宽度由外及内逐渐增加。

(3) 火灾下钢筋混凝土简支梁高温挠度时程曲线随荷载增加呈非线性增长趋势, 挠度时程曲线增大的程度随保护层厚度增加而减少; 提高混凝土保护层厚度, 可有效控制火灾场梁桥的形变。

## 参考文献:

### References:

- [1] 余志武, 王中强, 史召锋. 高温后新Ⅲ级钢筋力学性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 112-116.  
YU Zhi-wu, WANG Zhong-qiang, SHI Zhao-feng. Experimental research on material properties of new Ⅲ grade steel bars after fire[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 112-116.
- [2] Metin H. The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete[J]. Fire Safety Journal, 2006, 41(2): 155-163.
- [3] 余志武, 丁发兴. 圆钢管混凝土偏压柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 40-46.  
YU Zhi-wu, DING Fa-xing. Mechanical behavior of concrete filled circular steel tubular columns under eccentric compression[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 40-46.
- [4] 韩林海, 杨 华, 霍静思, 等. 标准火灾作用后矩形钢管混凝土柱剩余承载力的研究[J]. 工程力学, 2002, 19(5): 78-86.  
HAN Lin-hai, YANG Hua, HUO Jing-si, et al. Residual strength of concrete filled steel tubular columns with rectangular sections after exposure to standard fire[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(5): 78-86.
- [5] 吴 波, 徐玉野. 钢筋混凝土 T 形柱的耐火极限研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 32-39.  
WU Bo, XU Yu-ye. Fire resistance of reinforced concrete columns of T-shaped cross section[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(3): 32-39.
- [6] Samantha F, Magdalena C, Christina H, et al. Thermal and structural behaviour of a full-scale composite building subject to a severe compartment fire[J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(3): 183-199.
- [7] 张 岗, 任 伟, 贺拴海, 等. 箱梁水化热温度场时效模式及时变应力场[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 51-56.  
ZHANG Gang, REN Wei, HE Shuan-hai, et al. Time dependent effect on hydration heat temperature and stress field for concrete box girder[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 51-56.
- [8] 张 岗, 贺拴海, 宋一凡, 等. 火灾高温下钢筋混凝土梁桥非线性计算方法[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(3): 317-322.  
ZHANG Gang, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan, et al. Nonlinear computation method for simply supported beam of reinforcement concrete exposed to fire[J]. Journal of Xi'an Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(3): 317-322.
- [9] 张 岗, 贺拴海, 宋一凡. 混凝土箱梁水化热温度损伤修正耦合方法[J]. 交通运输工程学报, 2008, 8(1): 54-60.  
ZHANG Gang, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan. Updating coupling method of hydration heat temperature damage for concrete box girder[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(1): 54-60.
- [10] 张 岗, 贺拴海, 宋一凡, 等. 钢筋混凝土梁桥火灾安全评价[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(3): 153-157.  
ZHANG Gang, HE Shuan-hai, SONG Yi-fan, et al. Safety evaluation for reinforcement concrete girders exposed to fire[J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(3): 153-157.